

Abschlussbericht

| | |
|---|--------------------------------------|
| ZE: Thermosensorik GmbH | Förderkennzeichen: 13N9546 |
| Vorhabenbezeichnung: Verbundprojekt: Infrarot-Laser gestützte abbildende Detektion von Explosivstoffen (IRLDEX) Teilvorhaben: Erforschung von sicherheitsrelevanten Explosivstoffs Signaturen und systemtechnische Gestaltung eines Sensors zur Explosivdetektion | |
| Laufzeit des Teilvorhabens: 1.1.08 – 30.06.09 | |
| Berichtszeitraum: 1.1.08 – 30.06.09 | |

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|-------|--|----|
| 1 | Aufgabenstellung | 1 |
| 2 | Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde, | 2 |
| 3 | Planung und Ablauf des Vorhabens, | 2 |
| 4 | Stand von Wissenschaft und Technik | 2 |
| 5 | Zusammenarbeit mit anderen Stellen..... | 4 |
| 6 | Wissenschaftlich-technische Ergebnisse | 4 |
| 6.1 | AP 1.4: Erarbeitung geeigneter Rückstreu-Messverfahren für reale Messbedingungen | 4 |
| 6.2 | AP 1.5: Verfahren zur Kontrasterhöhung..... | 4 |
| 6.3 | AP 1.6: Gerätekonzept..... | 6 |
| 6.3.1 | Gerätfunktionen..... | 6 |
| 6.3.2 | Systemkonzept..... | 6 |
| 6.4 | AP 2.1 Geräteaufbau und Integration eines transportablen Funktionsmusters..... | 7 |
| 6.4.1 | IR-Kamera | 7 |
| 6.4.2 | Vis-Kamera..... | 8 |
| 6.4.3 | IR-Objektiv..... | 8 |
| 6.4.4 | Rechnersystem | 9 |
| 6.5 | AP 2.2 Erarbeitung der Mess-, Auswerte- und Darstellungssoftware für das Funktionsmuster | 9 |
| 6.6 | AP 2.3 Labortest des Funktionsmusters..... | 10 |
| 6.6.1 | Funktionstests von Kamerasystem, Trigger und Datenerfassung | 10 |
| 6.6.2 | Erzeugung multispektraler Testdaten | 10 |
| 7 | Die wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises, | 11 |
| 8 | Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit | 11 |
| 9 | Verwertbarkeit des Ergebnisses | 11 |
| 10 | Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen | 12 |
| 11 | Veröffentlichungen | 12 |

1 Aufgabenstellung

Ziel des Verbundprojektes IRLDEX ist die Realisierung eines praxistauglichen, spektroskopischen Detektionsverfahrens für Explosivstoffe zum Nachweis sowohl konventioneller Verbindungen, wie z.B. TNT, als auch neuartiger Peroxid-basierender Formulierungen wie z.B. TATP.

Gegenstand des von der Thermosensorik GmbH bearbeiteten Teilprojektes ist die Erarbeitung eines infrarot-optischen Rückstreu-Messverfahrens zur bildgebenden Explosivstoffdetektion mit praxisgerecht kurzer Messzeit. Dazu wird Thermosensorik ein Infrarotkamarasystem mit gezielt einstellbarer spektraler Empfindlichkeit im Wellenlängenbereich zwischen 5 und 9 μm realisieren. Darüber hinaus trägt Thermosensorik zur Ausarbeitung eines Gerätekonzepts, zur Definition der Schnittstellen zum Funktionsmuster und zur Multi-Sensor-Plattform bei und erarbeitet die Steuer-, Mess- und Auswertesoftware. Eine wesentliche Aufgabe hierbei ist die Erarbeitung von Algorithmen, die mittels multivaria-

ter Datenanalyse und unter Nutzung einer im Verbund zu erarbeitenden Stoff-Datenbank eine automatische Entscheidung bzgl. des Vorhandenseins von Explosivstoffen treffen können.

2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Die Komplexität der Aufgabenstellung erforderte eine Kooperation von Partnern mit unterschiedlichen Kompetenzen und Erfahrungen: Neben einem Projektpartner, der die konkreten Randbedingungen im beabsichtigten Einsatzfeld detailliert beschreiben konnte (BKA), war ein Projektpartner erforderlich, welcher bzgl. der zu detektierenden Explosivstoffe über entsprechendes chemisches/stoffliches Grundlagenwissen und Handhabungsmöglichkeiten verfügt (ICT), sowie ein Projektpartner, der geeignete Anregungslaserquellen beisteuern konnte, welche im vorgesehenen Wellenlängenbereich gezielt zwischen mehreren Laserwellenlängen umgeschaltet werden konnten (IAF). Darüber hinaus waren Projektpartner hilfreich, welche Systemkompetenz zur Einbindung von Subkomponenten einbrachten (IPM) und ein Projektpartner der als Systemhersteller über eine produktnahe Systemplattform verfügte, welche die Markteinführung des zu entwickelnden Systems hätte beschleunigen können.

3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Die Thermosensorik GmbH war an folgenden Arbeitspaketen beteiligt:

AP 1.4: Erarbeitung geeigneter Rückstreu-Messverfahren für reale Messbedingungen

AP 1.5: Erarbeitung von Verfahren zur Kontrasterhöhung in der Bildgebung unter MIR-Laserbeleuchtung

AP 1.6: Erarbeitung Gerätekonzept

AP 2.1: Geräteaufbau und Integration eines transportablen Funktionsmusters

AP 2.2: Erarbeitung der Mess-, Auswerte- und Darstellungssoftware für das Funktionsmuster

AP 2.3: Labortest des Funktionsmusters

AP 2.4: Untersuchung von Querempfindlichkeiten und Umgebungseinflüssen

AP 2.6: Grundlegende Identifizierung weiterer Anwendungsfelder

AP 3.1: Weitere Verbesserung des Rückstreu-Messverfahrens bzgl. maximaler Detektionsentfernung und Empfindlichkeit

AP 3.2: Erarbeitung Messplan für Feldtests

AP 3.3: Durchführung von Feldtests zur Leistungsdemonstration

AP 3.5: Bewertung des technischen Standes und Anwendungspotenzials

Aufgrund der vorzeitigen Beendigung des Teilvorhabens wurden nicht alle Arbeitspakete bearbeitet. Entsprechend beschränkt sich der Abschlussbericht auf die bearbeiteten Arbeitspakete.

4 Stand von Wissenschaft und Technik

Der berührungslose Nachweis von Explosivstoffen über Entfernungen von mindestens einigen Metern hinweg stellt eine bisher weltweit noch ungelöste Aufgabe dar. Die hier angestrebte bildgebende berührungslose Detektion von Explosivstoffen unterscheidet sich grundlegend von den heute bereits etablierten Verfahren wie sie z.B. bei Portalsystemen an Flughäfen zur Anwendung kommen. Im Bereich der sog. 'Bulk Detection' von Explosivstoffen in Gepäck oder Containern greifen Detektionsmethoden, die auf der Anwendung von Röntgen-Strahlen oder Neutronen beruhen. Hinzu kommen physikalisch-chemische Nachweisverfahren zur Spurendetektion von Explosivstoffen unter Einsatz relativ großer Analysegeräte wie GC/MS (Gas-Chromatograph / Massen-Spektrometer) oder GC/IMS (Gas-Chromatograph / Ionen-Mobilitäts-Spektrometer). Diesen Verfahren ist gemeinsam, dass entweder größere Luftmengen an die Detektoren geführt werden müssen oder aber sog. Wischproben verdächtiger kontaminierter Oberflächen genommen werden müssen, um brauchbare Analysenergebnisse zu erzielen. Beim Aufspüren versteckter Explosivstoffe liefern bis jetzt immer noch Spürhunde die besten Ergebnisse, aber auch Bienen und Ratten werden in jüngster Zeit in Versuchen zur Explosivstoffsuche herangezogen.

Röntgen- und Neutronenbeugung werden zur Durchleuchtung von Gepäck oder Warencontainern eingesetzt. Für die Durchleuchtung von Passagieren sind diese Methoden jedoch aus Gründen des

Strahlenschutzes unbrauchbar. Die Röntgenrückstreuung wird in einigen Ländern zur Passagierkontrolle akzeptiert, ist aber in den meisten Ländern wegen der - wenn auch geringen Strahlenbelastung - sehr umstritten und damit wohl auch nicht durchsetzbar. Anders sieht es mit Strahlung im sub-THz und THz Bereich aus. Diese durchdringt Kleidung und ermöglicht somit in bildgebenden Verfahren die Entdeckung verborgen getragener Gegenstände. Allerdings sind auch die individuellen körperlichen Merkmale der Personen zu erkennen, was die Persönlichkeitsrechte beeinträchtigt. Außerdem versagen μ - und mm-Wellen Verfahren bei Metallen oder feuchten Materialien. Spektrale Charakteristika für Explosivstoffe im μ - bzw. mm-Wellenlängenbereich sind in Einzelfällen beschrieben worden, eine Verifizierung solcher Resultate ist bislang nicht gelungen.

Neben militärischen Sprengstoffen wie TNT und gewerblichen Sprengstoffen (AN, EGDN, NC) kommen heute zunehmend auch **unkonventionelle, selbst hergestellte Explosivstoffkompositionen (IED)** bei terroristischen Angriffen zum Einsatz. Im Vorfeld dieses Antrages wurde bereits die Relevanz der verschiedenen IED-Kompositionen recherchiert. So wird das **stickstofffreie Triaceton-Triperoxid (TATP)** von Selbstmordattentätern häufig benutzt. Für Autobomben werden in vielen Fällen Ammoniumnitrat / Kraftstoff-Mischungen verwendet. Beide Systeme können aus frei verfügbaren Ausgangsstoffen hergestellt werden.

Alle in Frage kommenden Substanzen, d.h. also auch neuartige stickstofffreie Explosivstoffe, zeigen charakteristische spektrale Absorptionen im mittleren Infrarot (MIR) Bereich, die zur Spurenanalyse in der Gasphase oder auf Oberflächen genutzt werden können. In der Gasphase ist die Konzentration meist sehr gering (ppb Bereich), sodass Verfahren zur Anreicherung oder lange optische Wegstrecken zur Verfügung stehen müssen, um verwertbare Signalintensitäten zu erhalten. Es gibt kommerziell verfügbare FTIR Messgeräte, die für „open path“ Gas Messungen eingesetzt werden können. Diese Geräte benötigen eine sehr große Strahlquelle und eine außerordentlich aufwändige Optik, um interpretierbare IR-Absorptionen zu registrieren. Ihre Hauptanwendung liegt im Nachweis großvolumiger Gaswolken im Bereich des Immissionschutzes. Neben konventionellen Fourier-Transform-Infrarot (FTIR) Spektrometern werden Mehrfach-Weg-Messzellen oder photoakustische Verfahren zum Nachweis von Explosivstoffspuren in der Gasphase erprobt. Bislang hat jedoch noch kein Verfahren die technische Reife eines kommerziell verwertbaren Produktes erreicht.

Neben dem Nachweis in der Gasphase sind besonders **Explosivstoffspuren** zu betrachten, die sich bei **IEDs** adsorptiv an umgebenden **Oberflächen** niederschlagen. So werden bei der Handhabung und dem Befüllen von IEDs oft Explosivstoffspuren verschleppt, die ebenfalls zu deren Detektion herangezogen werden können. Solche Explosivstoffspuren finden sich an Kleidung, Taschen, Griffen sowie bei Fahrzeugen an z.B. Türen und Kofferraumabdeckungen. Hierfür sind Verfahren interessant, die eine Oberflächenkontamination analytisch zugänglich machen. Prinzipiell greift hier das LIBS Verfahren („laser induced breakdown spectroscopy“). Allerdings ist diese Methode nicht augensicher und hinterlässt Spuren auf der zu analysierenden Oberfläche. Für den militärischen Einsatz mag das in Kauf genommen werden können, für eine zivile Anwendung dieses Verfahrens sind diese Nebeneffekte jedoch prohibitiv.

Eine **interessante Lösung** bietet die **MIR Laser-Rückstreu-spektroskopie** als Verfahren zur **Detektion** von **Explosivstoffspuren** an **Oberflächen**. Bei Verfügbarkeit geeigneter MIR-Halbleiterlaser werden in Kombination mit einer MIR-Kamera sogar abbildende MIR-Messverfahren mit aktiver wellenlängenselektiver Beleuchtung, wie hier vorgeschlagen, möglich. Ein solches Verfahren ist über die schmalbandigen MIR-Laser als Beleuchtungsquelle explosivstoffselektiv. Das erhaltene **Bild** gibt durch die Verknüpfung der optischen Information mit der spektralen Information eine **schnelle Entscheidungsmöglichkeit**.

MIR-Halbleiterlaser (QCL), die diesen Anforderungen genügen, befinden sich weltweit erst in der Entwicklung, wobei das Fraunhofer IAF hierbei eine Spitzenstellung einnimmt. MIR-Kameras unterschiedlicher Leistungsklassen, ursprünglich überwiegend für den militärischen Einsatz entwickelt, werden zunehmend auch für zivile Anwendungen zugänglich. Die in der vorliegenden Projektskizze beschriebene Kombination einer MIR-Kamera mit einer wellenlängenvariablen MIR-Laserbeleuchtung zur Explosivstoffdetektion ist jedoch weltweit noch nicht verfügbar und deshalb ein zentraler innovativer Ansatz dieses Vorhabens. Es ist davon auszugehen, dass entsprechende Entwicklungen vor allem in den USA vorangetrieben werden. Über Ergebnisse und eine mögliche Nutzung für die zivile Sicherheitstechnik ist jedoch nichts bekannt.

Die Absorptionsbanden der meisten Explosivstoffe liegen in einem Spektralbereich, der für die bisherigen typischen Anwendungen von Infrarotkameras uninteressant war, da hier in der irdischen Atmo-

sphäre ebenfalls starke Absorptionsbanden liegen. Aus diesem Grund werden auch üblicherweise die beiden Infrarotbereiche MWIR (middle wave IR) und LWIR (long wave IR) voneinander unterschieden. Sie grenzen nicht direkt aneinander, sondern lassen eine Lücke zwischen $5\mu\text{m}$ und $7\mu\text{m}$ frei. Alle am Markt erhältlichen IR-Kameras vermeiden diesen Zwischenbereich, um von atmosphärischen Einflüssen unabhängiger zu bleiben. Es muss daher eine IR-Kameras aufgebaut werden, die auch in diesem interessanten Zwischenbereich empfindlich ist.

5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Zusammenarbeit mit Stellen außerhalb des Projektes erfolgte nicht.

6 Wissenschaftlich-technische Ergebnisse

Die von Thermosensorik GmbH im Bearbeitungszeitraum durchgeführten Arbeiten fallen in die Arbeitspakete 1.4 Erarbeitung geeigneter Rückstreu-Messverfahren für reale Messbedingungen (siehe Abschnitt 6.1), 1.5 Erarbeitung von Verfahren zur Kontrasterhöhung in der Bildgebung unter MIR-Laserbeleuchtung' (siehe Abschnitt 6.2), 1.6 Erarbeitung Gerätekonzept' (siehe Abschnitt 6.3), 2.1 Geräteaufbau und Integration eines transportablen Funktionsmusters (siehe Abschnitt 6.4), 2.2 Erarbeitung der Mess-, Auswerte- und Darstellungssoftware für das Funktionsmuster (siehe Abschnitt 6.5), 2.3 Labortest des Funktionsmusters (siehe Abschnitt 6.6). Das Teilvorhaben wurde vorzeitig beendet, daher konnten nicht alle Arbeitspakete abgeschlossen werden.

6.1 AP 1.4: Erarbeitung geeigneter Rückstreu-Messverfahren für reale Messbedingungen

Im Berichtszeitraum stand noch kein Detektor zur Verfügung mit dem unter realen Messbedingungen gearbeitet werden konnte (siehe auch Abschnitt 6.4.1). Unter Einsatz eines vergleichbaren Systems wurde (1) die Analyse der Eigenstrahlungseigenschaften schmalbandiger optischer Filter durchgeführt (siehe auch Abschnitt 6.2), und (2) Triggerfunktionen in Zusammenhang mit der sog. Multi-IO-Box (flexible, softwaregesteuerte Elektronik zur hochgenauen Steuerung der Bildaufnahme in Bezug zu externen Triggersignalen) und Hochgeschwindigkeitsdatenaufnahme getestet. Bis zu einer Triggerrate von 6kHz konnte eine zuverlässige und zeitgenaue (10ns) Bildauslösung gezeigt werden.

Thermosensorik-Software (siehe Abschnitt 6.5) und -Hardware (siehe Abschnitt 6.4.4) wurden für die Messaufgaben um entsprechende Funktionalität erweitert, die es erlauben, ein Funktionsmuster für einen bildgebenden Sprengstoffdetektor aufzubauen.

6.2 AP 1.5: Verfahren zur Kontrasterhöhung

Aus den von ICT und BKA im Projekt zur Verfügung gestellten Streuspektren typischer Kontaminationen folgt, dass der erforderliche Wellenlängenbereich auf $7,0\mu\text{m}$ bis $8,6\mu\text{m}$ gelegt werden muss, um gute Selektivität zu erhalten.

Die Einschränkung des Wellenlängenbereichs einer Infrarotkamera kann über Befilterung an verschiedenen Stellen im Strahlengang erfolgen. Zunächst wurde untersucht, ob eine Befilterung zwischen Optik und Detektorkühlgefäß hinreichende Sensitivität liefern kann. Experimente in einer Klimakammer mit schmalbandigen Filtern integriert in einem Filterrad direkt vor dem Detektorgehäuse zeigen, dass die Eigenstrahlung der Filter zu stark ist und nicht hinreichend gut korrigiert werden kann. Die Eigenstrahlung schränkt die für das Messsignal zur Verfügung stehende Detektordynamik ein. Zur Gewinnung von Korrekturdaten für die Eigenstrahlung der Filter wurde das System in einer Klimakammer vermessen. Die Daten aus Abb. 1 zeigen beispielhaft den signifikanten Einfluss der Filtertemperatur auf das Detektorsignal bei Ausrichtung der Kamera auf einen Flächenstrahler (25°C). Die Filtertemperatur wurde über die Klimakammertemperatur von 1°C bis 48°C variiert und direkt am Filter mit einem in das Filterrad (siehe Abb. 2) integrierten Thermoelement vermessen. In diesem Temperaturbereich nimmt die Eigenstrahlung von den Filtern um fast eine Größenordnung zu (siehe grüne und rote Kurve). Zum Vergleich zeigen die blauen Kurven für konstante Filtertemperatur (28°C) bei Variation der Temperatur des Flächenstrahlers einen deutlich geringeren Signalhub. Kontrollexperimente

belegen, dass der Einfluss der Filtertemperatur auf das Hintergrundsignal dominierend im Vergleich zum Einfluss der Gehäuse- und Objektivtemperatur ist.

Weitergehende Experimente mit Anregungslasern und schwankender Szenentemperatur zeigen, dass eingestrahlte Energie zu schnellen Schwankungen der Filtertemperatur um mehrer Grad Kelvin führt. Diese kurzfristigen Schwankungen in der Eigenstrahlung können auch mittels der Messung der Filtertemperatur und Anwendung der so gewonnen Korrekturdaten nicht zuverlässig korrigiert werden.

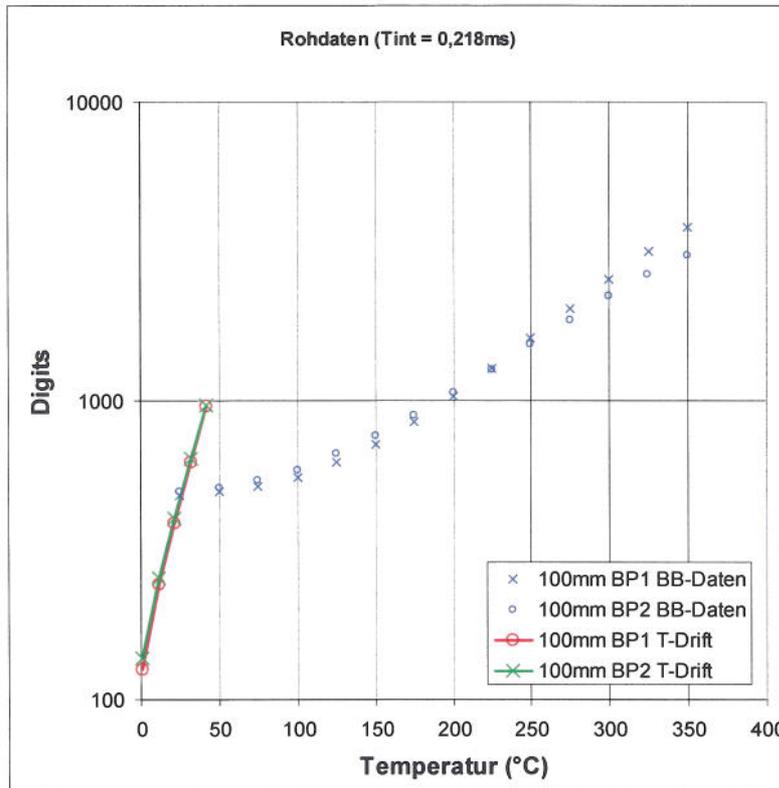


Abb. 1: Einfluss der Temperaturdrift der Filter auf das Detektorsignal für zwei schmalbandige Bandpassfilter BP1 (3,90µm, rot) und BP2 (4,65µm, grün).

Die oben beschriebenen Experimente wurden mit einer Hochgeschwindigkeits-MWIR-Kamera CMT 256 durchgeführt. Die optischen Eigenschaften dieses Systems entsprechen den Eigenschaften, die für das Irdex System geplant wurden, sodass die experimentellen Resultate vollständig übertragbar sind.



Abb. 2: Kamerakopf CMT 256 mit integriertem Filterrad. Filtertemperatur, Gehäusetemperatur und Objektivtemperatur (Objektiv nicht dargestellt) können unabhängig voneinander kontinuierlich gemessen werden.

Eine Kontrasterhöhung durch Elimination störender Hintergrundstrahlung gelingt also nur mit stark gekühlten Bandpässen, die direkt vor dem gekühlten Detektor angebracht sein müssen. Daher wurde

entschieden, zur Realisierung obigen Bereiches, in der IR-Kamera einen Bandpass mit cut-on 7,0µm und cut-off 8,6µm fest als Kaltfilter im Detektorkühlgefäß einzubauen. Ein Filterwechsel während des Betriebs z.B. mittels Filterrad ist so nicht möglich. Daher ist eine dynamische Einengung der Kameraempfindlichkeit oder eine Anpassung des Empfindlichkeitsbereichs, z.B. auf die gerade verwendete Laserlinie, nicht möglich. Daher wurde diese Option nicht weiter verfolgt.

6.3 AP 1.6: Gerätekonzept

6.3.1 Gerätefunktionen

Das IRLDEX-Gerät soll folgende Funktionen realisieren:

1. Detektion chemischer Signaturen im Wellenlängenbereich 7,0µm bis 8,6µm in einer zu überwachenden Szenerie
2. Darstellung eines visuellen Übersichtsbildes der Szenerie mit Markierung des darin enthaltenen IR-Bildausschnitts
3. Manuelle Nachführung der Kamerasichtlinie
4. Darstellung des passiven (im visuellen Bild markierten) IR-Bilds
5. IR-Laserspot ca. 2-3 cm Durchmesser innerhalb des IR-Kamerasichtfeldes
6. Manuelle Nachführung des IR-Beleuchtungslasers innerhalb des Kamerasichtfeldes
7. Zieldesignation des IR-Beleuchtungslasers mit VIS-Laserpointer
8. Gemeinsamer Strahlengang von Laserpointer und IR-Beleuchtungslaser
9. Darstellung des laserbeleuchteten Bereichs im passiven IR-Bild

6.3.2 Systemkonzept

Das Gerät zur berührungslosen Detektion von Sprengstoffen besteht aus folgenden Subsystemen:

- Quantenkaskadenlaser mit zugehöriger Elektronik zur spektral selektiven, abstimmbaren Beleuchtung der Objektebene,
- Empfänger inklusive IR-Kamera und zugehöriger Elektronik,
- Strahlführungssystem zur Kombination der Sende- und Empfangskanäle,
- Signal- und Bildverarbeitungshardware und -software,
- Systemplattform zur Führung der Systemsichtlinie,
- Systemsoftware zur Steuerung des Geräts.
- Systemelektronik mit Schnittstelle zu einem externen Sensormanagementsystem,
- Systemkühlung.

Das IRLDEX-Gerät wird in 19"-Rack-Technik aufgebaut. Der mechanische Aufbau wird in Abb. 3 dargestellt. Das Gerät besteht aus zwei Funktionsblöcken: Kamerakopf und Rechnerrack. Die beiden Funktionsblöcke können zu Transportzwecken voneinander getrennt werden.

Die Funktionsblöcke beinhalten folgende Komponenten:

1. IRLDEX-Kamerakopf:
 - IR-Kamera (Thermosensorik)
 - VIS-Kamera (Thermosensorik)
 - IR-Leistungsmonitor (IPM)
 - VIS-Laserpointer
 - Chassis (IPM)
 - Stativkopf (DBD)
 - Adapter Stativkopf-Rack (DBD)
 - Schnittstellenplattform Optik (DBD)
 - IR-Strahlführung (DBD)
2. IRLDEX-Rack
 - IR-Laser (IAF)
 - System Control Unit (IPM)
 - Masterrechner (Thermosensorik)
 - PC-Terminal (Thermosensorik)
 - Externe Leistungsversorgung (Thermosensorik)
 - Rack-Gestell (IPM)

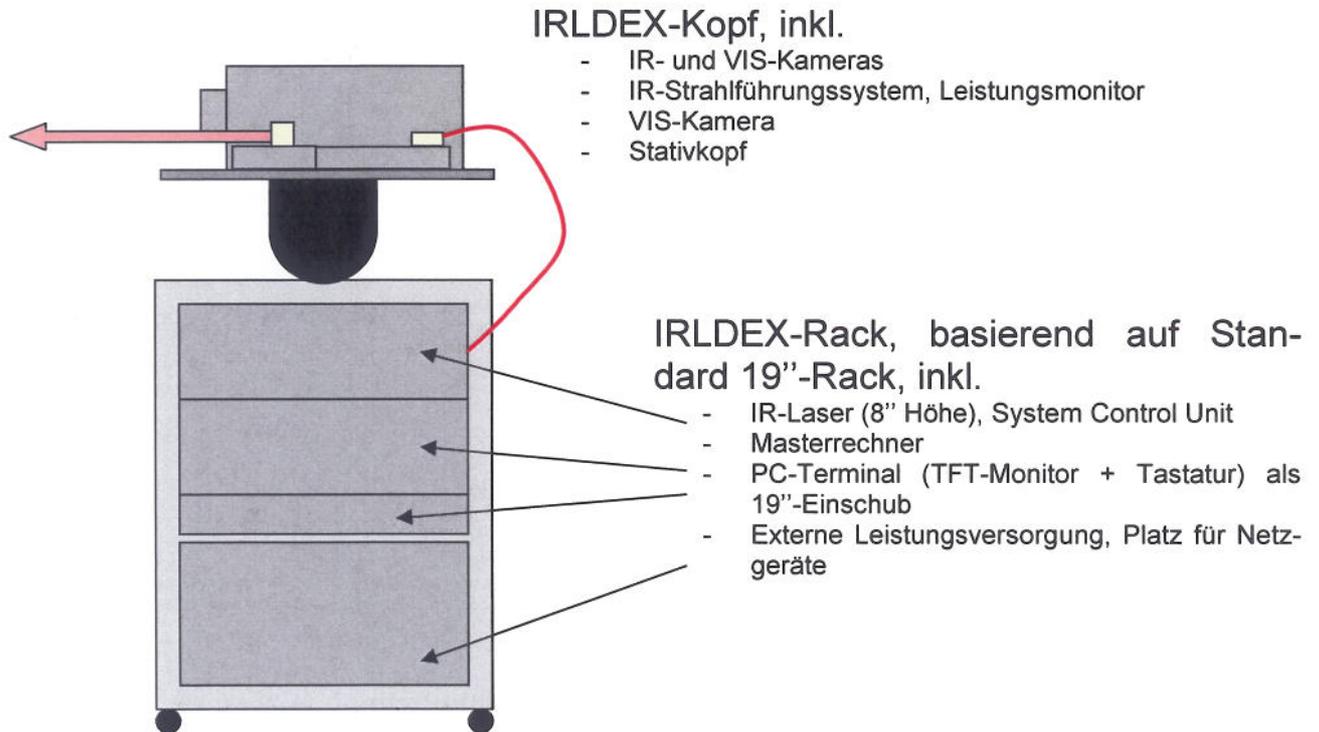


Abb.3: IRLDEX-Gerät auf Rack-Basis

6.4 AP 2.1 Geräteaufbau und Integration eines transportablen Funktionsmusters

6.4.1 IR-Kamera

Der Wellenlängenbereich wurde auf $7,0\mu\text{m}$ bis $8,6\mu\text{m}$ festgelegt, siehe 1.1 „AP 1.5: Verfahren zur Kontrasterhöhung“. Die einzusetzende Kamera muss mit einem entsprechenden Kaltfilter ausgestattet werden, da, wie in Kapitel 6.2 dargestellt, die Temperaturschwankung externer Filter dominierende Störeffekte einbringt. Die herstellerseitige Modifikation des ursprünglich für den Aufbau der Kamera vorgesehenen Detektors IDCA 256 CMT LW der Fa. AIM GmbH (Einbau des Kaltfilters + Test) lag außerhalb des im Projekt vorgesehenen Kosten- und Zeitrahmens. In Verhandlungen mit verschiedenen Detektorherstellern zu dieser speziellen Befilterung wurde Selex (Großbritannien) als der geeignetste alternative Hersteller identifiziert. Das in Frage kommende Produkt (Hawk, siehe Abb. 4) ist kostengünstiger, hat eine kürzere Lieferzeit und scheint zudem technisch überlegen zu sein, sodass ein besseres Signal-Rausch-Verhältnis des Messsystems prognostiziert werden kann. Es war daher vorgesehen, die Zeit bis zur Fertigstellung der Projekt-IR-Kamera durch Ausleihe der bei IAF vorhandenen Kamera CMT 256 L HS zu überbrücken. Diese Kamera ist mit Ausnahme der Befilterung baugleich mit der ursprünglich vorgesehenen Kamera und mit einem passenden Objektiv (s.u., 6.4.3) ausgestattet.



Abb. 4: Bild des als Alternative gefundenen Detektors Hawk LWIR (Selex, Großbritannien).

Die Spezifikationen des alternativen Systems stellen sich wie folgt dar:

- 640x512 Pixel, freie Auswahl von Teilbildern, 2-fach Binning
- 16 μm Pitch
- NETD <40mK
- LWIR (8 – 9,4mm, Standard-Kaltfilter)
- Volle Kontrolle der Integrationszeit
- 4 Kondensatoren (umstellbar)
- Testaufbau mit Möglichkeit zum Kaltfilterwechsel verfügbar

Diese Liste der Spezifikationen zeigt neben einer erhöhten Pixelanzahl zwei wesentliche Möglichkeiten auf, die mit dem ursprünglich vorgesehenen System nicht hätten realisiert werden können.

Vorteil 1:

Selex kann einen Testaufbau zur Verfügung stellen, der den schnellen Austausch des Kaltfilters erlaubt und damit in der experimentellen Phase mehr Flexibilität zur Optimierung der Empfindlichkeit des Gesamtsystems ermöglicht.

Vorteil 2:

Der Selex Detektor erlaubt die ns-genaue Kontrolle der Integrationszeit (Ladungsträgerakkumulation in den Kondensatoren) über ein externes Steuersignal. Mit dieser Option kann eine verbesserte Abstimmung von Detektor und Laser erzielt werden, die zu einer signifikanten Erhöhung der Messempfindlichkeit des Systems führt.

Der Einsatz des flexiblen Selex-Testaufbaus wirkt führt zu Erschwernissen im Aufbau des transportablen Systemdemonstrators. Die erforderliche Stickstoffkühlung erfordert einen horizontalen Betrieb des Detektors. Infolgedessen muss ein zusätzlicher Spiegel vor der Optik integriert werden um eine vertikale Blickrichtung zu ermöglichen. Der Testaufbau beinhaltet keinen integrierten Stirlingkühler, so dass zusätzlich eine Vakuumpumpe integriert werden muss.

6.4.2 Vis-Kamera

Als Vis-Kamera wird das Sony-Modell DFW 500 vorgeschlagen. Die Datenübertragung erfolgt über FireWire und der zugehörigen PC-Karte D-Link DFW 500, welche in den Systemrechner eingesetzt wird. Die Integration der VIS-Kamera in die Thermosensorik Software ist erfolgt.

6.4.3 IR-Objektiv

Die für das Projekt zu verwendende Brennweite wurde auf 100mm festgelegt, was auf Basis von zwei bestehenden Objektivdesigns realisiert werden könnte:

- Ein Midwave-Objektiv mit spezieller „Dual-Band“-Beschichtung der Linsen, die eine zusätzliche Longwave-Tauglichkeit eröffnet. Nachteilig für die Empfindlichkeit des Gesamtsystems ist in diesem Fall die hohe Eigenemission der Linsenmaterialien im Spektralbereich von 7,0 μm bis 8,6 μm
- Ein reines Longwave-Objektiv für 7,5 μm bis 10,5 μm . Der im Projekt erforderliche Spektralbereich von 7,0 μm bis 8,6 μm wird durch dieses Objektiv nicht vollständig abgedeckt. Daher wurde eine Anpassung bis 7,0 μm untersucht. Die beste erreichbare Transmission beträgt für dieses Konzept 92% (drei Linsen).

Als dritte Variante wurde eine speziell auf minimale Eigenemission und maximale Transmission genau im Spektralbereich 7,0 μm bis 8,6 μm optimierte Optik untersucht. Die Rechnungen ergaben ein Zweilinsensystem (davon eine Asphäre) mit einer hervorragenden Transmission von 96%. Dieses Design ist kompatibel mit den geometrischen und optischen Anforderungen des Selex Detektors. In Kombination mit den hervorragenden optischen Eigenschaften stellt dieses Objektiv das Optimum für das Irdex System dar.

6.4.4 Rechnersystem

Als Grundlage des Sensors dient ein standardmäßiges Thermosensorik-Rechnersystem inklusive des auf die Belange des Vorhabens zu modifizierenden Standard-Softwarepakets. Zur Synchronisation zwischen Kamera (Integrationszeit) und Anregungslaser wurde die Thermosensorik Multi-IO-Box um Funktionen für die hochgenaue Steuerung eines Zeitversatzes (Delay) erweitert. Insbesondere im Hinblick auf die hochgenaue zeitliche Steuerung des Messablaufes (vgl. Abb. 5) war es erforderlich eine ns-genaue Steuerung zu implementieren.

Das Thermosensorik Datenerfassungssystem wurde bezüglich Hard- und Software erweitert, um die Anbindung des Selex-Detektors zu ermöglichen. Seitens Selex wurde leihweise ein System zum Hard- und Softwaretest zur Verfügung gestellt. Abb. 5 zeigt ein entsprechendes Einzelbild aus dem erfolgreichen Systemtest. Hierbei wurde ein Selex Dual-Band Detektor (MWIR + LWIR) verwendet. Gleichzeitig wurden neu entwickelte Algorithmen zur Kontrastverstärkung an multispektralen Datensätzen auf die Dual-Band-Daten angewendet. Für die Darstellung wurde die Daten analysiert und entsprechend der relativen Intensität zwischen MWIR und LWIR wurden Bereiche blau (MWIR) und rot (LWIR) eingefärbt. Die genannten Algorithmen sind nicht auf Daten aus zwei Spektralbereichen beschränkt und können entsprechend als Grundlage für die Analyse spektraler Auffälligkeiten in multispektralen Daten eingesetzt werden. Für die grundlegenden Prinzipien zur Erkennung oberflächlicher Verunreinigungen mit Sprengstoff sind nach derzeitigem Stand zwei Spektralbereiche ausreichend.



Abb. 5: Umsetzung einer Zweifarben-Aufnahme in eine farbige Darstellung im RGB-Modus. Der dritte Farbkanal (grün) wurde durch den Mittelwert der beiden belegten Kanäle belegt. Durch diese Auswahl erscheinen Bereiche, die in den beiden belegten Kanälen die gleichen Intensitäten aufweisen, als Graustufen.

6.5 AP 2.2 Erarbeitung der Mess-, Auswerte- und Darstellungssoftware für das Funktionsmuster

Basis der Steuerungssoftware bildet die Thermosensorik SCS, eine spezielle Anlagensoftware zur Steuerung komplexer Messabläufe, die es ermöglicht neue Hardware in die Abläufe zur Echtzeit-Datenerfassung und -auswertung von Hochleistungs-Infrarotkameras einzubinden. Die Modifikation der SCS betrifft hauptsächlich die Schaffung weiterer Schnittstellen, die Einbindung des Auswertalgorithmus (parallele Aufnahme mehrerer Videosequenzen und Verarbeitung zusammengehöriger Bilder) und die Anpassung der Anzeige- und Bedienoberfläche (Anzeige des Vis-Bildes mit eingeblenndem Rahmen am Ort des IR-Bildes, Anzeige des IR-Bildes in einem eigenen Fenster + Markierung des Laserspots und des Detektionsergebnisses sowie Bedienung des Detektionslasers, des Laserpointers und der Strahlführung).

Für die experimentelle Phase und für die Weiterentwicklung der Auswertung wurden Matlab-Funktionen realisiert, die über die genannten Schnittstellen einfach in die Standard-Software eingebunden werden können. So können in der experimentellen Phase einfach Modifikationen in den Auswerteargorithmen durch die Projektpartner durchgeführt werden.

Eine Schnittstelle zu Selex Detektoren (siehe Abschnitt 6.6.1) und Algorithmen zur Analyse multispektraler Daten wurden geschaffen. Die Visualisierung multispektraler Daten erforderte erheblichen Aufwand, da die bisherige Software für die Darstellung eines einzelnen Bilddatenstroms ausgelegt war. Multispektrale Daten erfordern die Behandlung und zuverlässige Synchronisierung mehrerer paralleler Bilddatenströme.

6.6 AP 2.3 Labortest des Funktionsmusters

6.6.1 Funktionstests von Kamerasystem, Trigger und Datenerfassung

Für die experimentelle Überprüfung der Hard- und Softwarelösungen wurde ein Laboraufbau geschaffen, der es erlaubt, wellenlängenabhängige Daten mit hoher Bildrate zu erzeugen und durch Objektbewegung die Verlustfreiheit der Datenerfassung auch bei hohen Datenraten (110 Mbyte/sec) zu überprüfen.

Abb. 6 zeigt den Linearschienteststand für die Überprüfung der zuverlässigen Hochgeschwindigkeitstriggerung und der verlustfreien Datenerfassung und -aufzeichnung. Die Linearschiene erlaubt Bewegungen mit bis zu 6m/s und liefert jeden Millimeter einen Triggerimpuls, der eine Bildaufnahme auslöst. So konnte anhand von Objekten mit konstanter Geschwindigkeit die Zuverlässigkeit der Triggerung bis zu einer Frequenz von 6kHz nachgewiesen werden. Für Frequenzen über 880Hz (maximale Bildwiederholrate CMT 256 im Vollbild) wurde in geeigneten Teilbildmodi der CMT 256 gearbeitet.

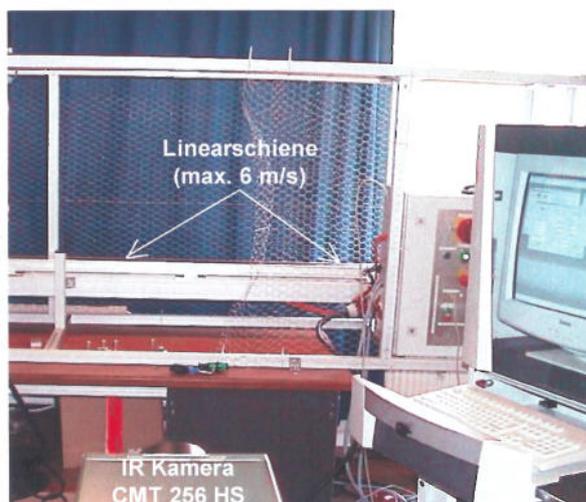


Abb. 6: Linearschienteststand für die Verifikation der verlustfreien Hochgeschwindigkeitstriggerung und Datenaufnahme, sowie der geplanten Erzeugung multispektraler Daten ohne Laseranregung.

6.6.2 Erzeugung multispektraler Testdaten

Abb. 7 zeigt den experimentellen Aufbau zur Erzeugung multispektraler Daten zu Testzwecken und ein Ergebnisbild. Über ein NaCl-Prisma wird das Bild einer Fadenlampe auf dem Detektor in x-Richtung spektral zerlegt, wobei in y-Richtung die Ortsinformation erhalten bleibt. Es war geplant über die Bewegung der Fadenlampe auf dem Linearschienteststand aus einem dreidimensionalen Orts- (y), Wellenlängen- (λ) und Zeit- (t) Datensatz mit vorhandenen Algorithmen einen x-y- λ -Datenwürfel der Fadenlampe zu erzeugen. Dieser hätte verwendet werden können, um Erkennungsalgorithmen in einem einfach beeinflussbaren Modell, nämlich bei Veränderung der Temperatur der Fadenlampe, bei voller Datenrate in Echtzeit zu testen.

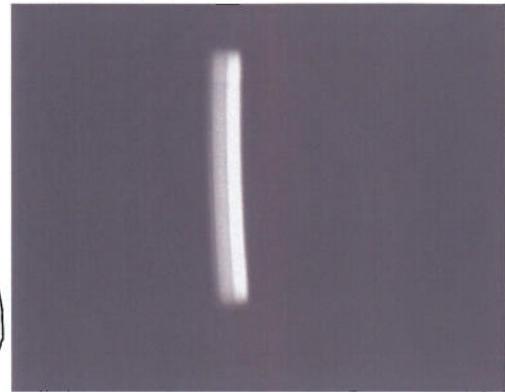
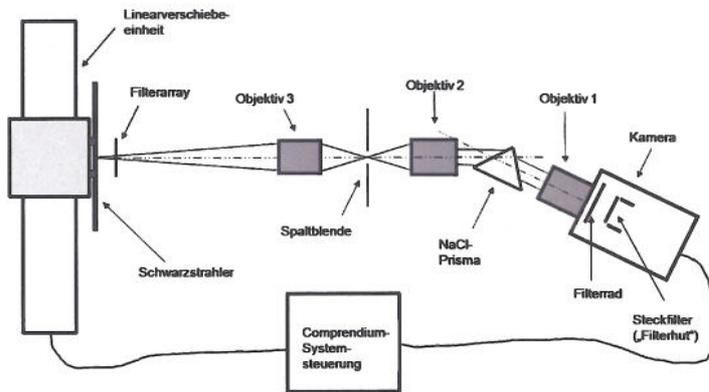


Abb. 7: Aufbau und Testaufnahme zur Erzeugung spektraler Information in x-Richtung auf dem IR-Matrixdetektor. Ein NaCl-Prisma im Strahlengang zerlegt die Emission einer Fadenlampe spektral in x-Richtung. Die y-Dimension auf dem Detektor beinhaltet weiterhin die Ortsinformation.

7 Die wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Zur Bewältigung der gestellten Forschungs- und Messaufgaben war der Einsatz einer Hochgeschwindigkeitskamera sowie der Linearschienteststand (gem. Beschreibung in Kapitel 6.6.) erforderlich (vgl. Kapitel 6.1; 6.2; 6.4). Im Berichtszeitraum stand der ursprünglich geplante Detektor CMT 256 LWIR allerdings nicht zur Verfügung. Um die im Projekt festgelegten Aufgabenpakete dennoch frühzeitig abarbeiten zu können, war der Einsatz eines vergleichbaren Systems zwingend erforderlich. Das eingesetzte Kameramesssystem CMT 256 HS erfüllte die Anforderungen insb. an die hohe Bildwiederholrate und erweist sich damit als geeignet für die Erfüllung der Forschungs- und Messaufgaben. Ein geeignetes Kamerasystem CMT 256 HS stand der Thermosensorik kurzfristig als Leasing-System zur Verfügung. Das System wurde über die komplette Projektlaufzeit (18 Monate) genutzt. Zur Abrechnung kamen nur die tatsächlich entstandenen Kosten.

Für Konzeption, Konstruktion und Aufbau des Linearschienteststandes wurde neben Material auch Fremdleistungen eines Ingenieurdienstleisters benötigt. Darüber hinaus musste der Aufbau während der Abarbeitung der Arbeitspakete des Forschungsvorhabens kontinuierlich von dem Ingenieurdienstleister betreut und weiterentwickelt werden, um die notwendigen Funktionen der Linearschiene sicherzustellen. Die Linearschiene wird mit einer Steuer- und Kommunikationseinheit bedient, die wie die Linearschiene an sich mit Starkstrom betrieben wird. Für den sehr komplexen Aufbau und die Freigabe der Anlage für den Betrieb ist eine entsprechende Qualifikation notwendig, die in der Thermosensorik ebenfalls nicht vorhanden ist.

8 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Alle geleisteten Arbeiten wurden auf die Ziele in den jeweiligen Arbeitspaketen ausgerichtet. Zunächst wurde durch einige Grundlagenuntersuchungen messtechnisches Verständnis geschaffen. Ein Gerätekonzept wurde erarbeitet und anhand der Grundlagenergebnisse und neuer technischer Konzepte verfeinert. Nicht am Markt verfügbare Soft- und Hardware wurde geschaffen, um den Aufbau eines Funktionsmusters für einen bildgebenden Sprengstoffsensoren vorzubereiten.

9 Verwertbarkeit des Ergebnisses

An der weiteren Verwertung des bildgebenden Sprengstoffsensors ist Thermosensorik durch die vorzeitige Beendigung des Teilprojektes nicht beteiligt. Für die geschaffenen Hard- und Softwarelösungen werden derzeit alternative Anwendungen gesucht.

10 Fortschritts auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Es wurden keine relevanten Ergebnisse bekannt.

11 Veröffentlichungen

Die Projektergebnisse wurden bisher nicht veröffentlicht.

Erlangen, 4.06.2010
St. Höl