Abschlussbericht 2013 Verbundprojekt: Sicherheits-Untersuchung mittels Röntgenbild-Analyse (SICURA)

Teilvorhaben: Mustererkennung in Röntgenbildern zur Detektion von gefährlichen Objekten im Reisegepäck (FKZ: 13N11122)

Zahlungsempfänger **Smiths Heimann GmbH**	**Förderkennzeichen:** **13N11122**
Vorhabenbezeichnung: **Sicherheitsuntersuchung mittels Röntgenbildanalyse (SICURA)** **Teilprojekt: Mustererkennung in Röntgenbildern zur Detektion von gefährlichen Objekten im Reisegepäck**	
Laufzeit des Vorhabens: **01.06.2010 – 31.05.2013**	
Berichtszeitraum: **01.06.2010 – 31.05.2013**	
Projektleiter/Autor: **Dr. Pia Dreiseitel**	

Datum: 28. November 2013

Unterschrift:

……..
(P. Dreiseitel)

 ©Smiths Heimann GmbH

1 Kurzdarstellung

1.1 Aufgabenstellung

Ziel des Vorhabens war die Erkennung gefährlicher Objekte in Röntgenbildern im Rahmen der automatischen Gepäckkontrolle an Kontrollstellen im Luftverkehr. Die beiden Schwerpunkte waren dabei Verfahren der Objekterkennung einerseits und die optimale Darstellung für das Bedienpersonal andererseits. Im Verlauf des Projektes sollten dann auch übliche Gegenstände in Reisegepäck identifiziert werden.

In der Objekterkennung wurden zunächst mit Hilfe der Bundespolizei als beratendem Projektpartner die wichtigsten Objekte definiert, die in der Fluggepäckkontrolle von besonderem Interesse sind. Dabei wurden vor allem zwei Kategorien gefährlicher Gegenstände definiert, einerseits die klassischen Handfeuerwaffen und zum zweiten Flüssigsprengstoffe und deren Behältnisse. In näherer Zukunft soll die Detektion von Flüssigsprengstoffen verpflichtend für Gepäckkontrollstellen werden, um den generellen Bann von Flüssigkeiten aufheben zu können. Für die Detektion von Flüssigsprengstoffen ist natürlich die Verpackung von sehr großer Bedeutung. Es war dabei eine hohe Trefferwahrscheinlichkeit von mindestens 90% spezifiziert.

Für die optimierte Darstellung (Indikation gefährlicher Gegenstände) sollte einerseits die Markierung von automatisch detektierten Objekten betrachtet werden und andererseits eine Verbesserung des Bildes insgesamt untersucht werden, um damit eine Nachkontrolle für das Bedienpersonal am Monitor zu erleichtern.

Schließlich bestand für die Smiths Heimann GmbH und die beiden universitären Forschungspartner innerhalb des Projekts auch die Aufgabe, einen Demonstrator zu erstellen, in dem die automatische Erkennung von Flaschen und Schusswaffen gezeigt werden kann.

1.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Zum Zeitpunkt der Antragstellung existierte an Kontrollstellen im Flughafen das Fluggepäck vornehmlich eine visuelle Inspektion mit Hilfe von zweienergetischen Röntgenbildern. Lediglich feste Sprengstoffe wurden hier zumindest teilweise automatisch detektiert. Zeitgleich wurde das bestehende Verbot von jedweden Flüssigkeiten von Seiten der zuständigen Behörden diskutiert und über eine Aufhebung dieses Verbotes nachgedacht. Von Seiten der Industrie waren viele Speziallösungen vorgestellt worden, die entweder mit zusätzlichen Kontrollsystemen oder mit vorhandenen Röntgenscannern und speziellen Halterungen gefährliche von ungefährlichen Flüssigkeiten unterscheiden konnten. Gewünscht wurde von Seiten der Behörden und natürlich auch von Seiten der Fluggesellschaften jedoch eine einfache Kontrollmöglichkeit, die es erlaubt, die zu scannenden Flüssigkeiten innerhalb des Gepäcks zu prüfen und damit den Aufwand an der Kontrollstelle nicht erhöht.
Grundsätzlich kann auf Seiten der Behörden der Trend gesehen werden, dass immer mehr automatisch detektierende Systeme gewünscht werden, so dass die Kontrollkräfte entlastet werden. Um jedoch die vollautomatische Kontrolle umsetzen zu können, müssen neben den Sprengstoffen auch die übrigen Gegenstände, die gegenwärtig nicht mit an Bord eines Flugzeuges genommen werden dürfen, automatisch detektiert werden.

 ©Smiths Heimann GmbH

1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Projekt war in drei Projektphasen eingeteilt: Erstens die Definition der Bildobjekte, sowie die Bildvorverarbeitung, um optimierte Materialbilder zu erstellen, die die Objekterkennung verbessern sollten. Dazu mussten die Detektionsobjekte definiert werden und eine große Bilddatenbank von Röntgenbildern aufgezeichnet werden. In der zweiten Projektphase wurden dann die eigentlichen Methoden zur Objekterkennung erforscht. Neue Verfahren aus dem Bereich des Maschinellen Sehens wurden erfolgreich mit klassischen Algorithmen gekoppelt. Zum Halbzeitmeilenstein stand wie geplant das Konzept für die Objekterkennung fest. Mit der aufgezeichneten Bilddatenbank konnten dann die Verfahren auf ihr Detektionsvermögen getestet werden.
In der letzten Projektphase wurden schließlich die verschiedenen Algorithmen zusammen getragen und in den Demonstrator integriert. Außerdem konnten an allen Algorithmen noch Verbesserungen erzielt werden.

1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

1.4.1 Benutzte Schutzrechte und Verfahren, sowie bekannte Konstruktionen

Die von Smiths Heimann GmbH gehaltenen Schutzrechte zur Auswertung von Zwei-Energie-Röntgenbildern wurden für dieses Projekt herangezogen.

1.4.2 Verwendete Fachliteratur

Für die Objekterkennung in Röntgenbildern gibt es bisher erstaunlicherweise sehr wenig Fachliteratur. Einige Methoden konnten aus der noch am nächsten verwandten Medizintechnik herangezogen werden, wobei jedoch diese Methoden oft sehr stark Formwissen über die menschlichen Organe und Körperteile einbringen. Einige wenige Veröffentlichungen befassten sich auch mit Fluggepäck, die dann natürlich ebenfalls analysiert wurden.
Die Verwendung von Symmetrieinformation wurde aus der klassischen digitalen Bildverarbeitung abgeleitet und neu in der Röntgenbildverarbeitung eingesetzt.

[1] Jiang Y. et al.: **X-ray bone fracture segmentation by incorporating global shape mode** 2004

[2] Dhawan: **Medical Image Analysis**, 2003

[3] Liang J. et al.: **Automatic X-ray Image Segmentation for Threat Detection,** 2003

[4] Singh, M. et al.: **Image segmentation optimisation for X-ray images of airline luggage,** 2004

[5] Loy, Eklund: **Detecting Symmetry and Symmetric Constellations of Features**," 2006

[6] Li, Zhang & Kleeman: "**Real Time Detection and Segmentation of Reflectionally Symmetric Objects in Digital Images**", 2006

 ©Smiths Heimann GmbH

Neben den hier aufgelisteten Zeitschriftenartikeln und Büchern wurden auch die Klassiker der digitalen Bildverarbeitung und Mustererkennung verwendet.

1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Im Förderprojekt wurde zunächst natürlich eng mit den anderen Forschungspartnern zusammengearbeitet, zumal die übergeordnete Aufgabenstellung teilweise für alle Projektpartner gleich war (Detektion von Objekten). Daher gab es einen sehr regen Austausch mit 14-tägigen Telefonkonferenzen, in denen neue Erkenntnisse vorgestellt und diskutiert wurden. Damit konnte auch verhindert werden, dass an den genau gleichen Algorithmen gearbeitet wurde. Außerdem wurden die Daten für die Bestimmung der Detektionsergebnisse, die genaue Vorschrift für die Bewertung der Detektion und schließlich der Demonstrator gemeinsam erarbeitet. Die Bundespolizei als assoziierter Partner stand regelmäßig als Diskussionspartner zur Verfügung, wenn es um die genaue Ausrichtung der Vorgaben ging. Außerdem wurden diese Vorgaben auch mit Behörden aus anderen europäischen Ländern diskutiert, um einen möglichst guten Eindruck von den in der näheren Zukunft benötigten Systemen zu erhalten.

2 Eingehende Darstellung

2.1 Erzielte Ergebnisse mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

Im Folgenden werden die verschiedenen Themenschwerpunkte getrennt aufgeführt und jeweils in ihrem gesamten Projektverlauf dargestellt.

2.1.1 Optimierte Materialbilder

Das AP2 wurde in etwas gekürzter Version abgearbeitet, da die wesentlichen Ziele bereits nach dem Ende des 1. Projektjahres erreicht wurden.
Die Vorverarbeitungsschritte für die automatische Detektion beziehen sich vor allem auf eine Auswertung des Zweienergie-Verfahrens, das in der Fa. Smiths Heimann schon seit vielen Jahren sowohl für die Kolorierung der Röntgenbilder als auch für die Detektion von Sprengstoffen angewendet wird (vgl. Abbildung 1, linke Seite). Ziel des Arbeitspaketes war es, möglichst gut einzelne Objekte aus dem Kofferinhalt hervorzuheben und dabei störende Überdeckungen möglichst ganz oder zumindest teilweise zu unterdrücken (vgl. Abbildung 1, rechte Seite). In diesem Fall sind beispielsweise unten im Bild Schuhe enthalten, die man im rechten Bild deutlich besser erkennen kann.

Segmentieralgorithmen, die auf optischen Bildern gute Ergebnisse erzielen, weisen häufig Schwierigkeiten mit der Vielzahl von überlagernden Kanten auf, wie sie durch die Transparenz von Röntgenbildern entstehen und sind damit für die Verarbeitung von Röntgenbildern zunächst nicht brauchbar. Durch dieses Arbeitspaket wurden die Voraussetzungen für die verschiedenen Segmentierverfahren deutlich verbessert.

 ©Smiths Heimann GmbH

Abbildung 1: Typisches Gepäckstück mit Wäscheinhalt. Man erkennt die metallische Verstärkung am Kofferrand sowie die eingezogenen Trolleystangen an der blauen Farbe. Im rechten Bild ist das Bild über eine Koordinatentransformation in ein Acryl- und ein Eisenbild umgerechnet. Reine Metallanteile sind daher nur noch schwach zu erkennen, organische Bildanteile deutlich hervorgehoben.

Das Verfahren beruht auf einer Transformation der Eingangssignale, dem sogenannten Hi- und dem Lo-Bild (diese Bezeichnungen stehen für die hohe und die niedrige Röntgenenergie, die mit dem Zwei-Energie-Verfahren gewonnen werden). Das Verfahren beruht auf der Tatsache, dass das Absorptionsverhalten im Hi-Lo-Diagramm (siehe Abbildung 2) für Einzelmaterialien in gekrümmten Kurven beschrieben werden kann, wobei der Laufparameter die Dicke des Materials ist.

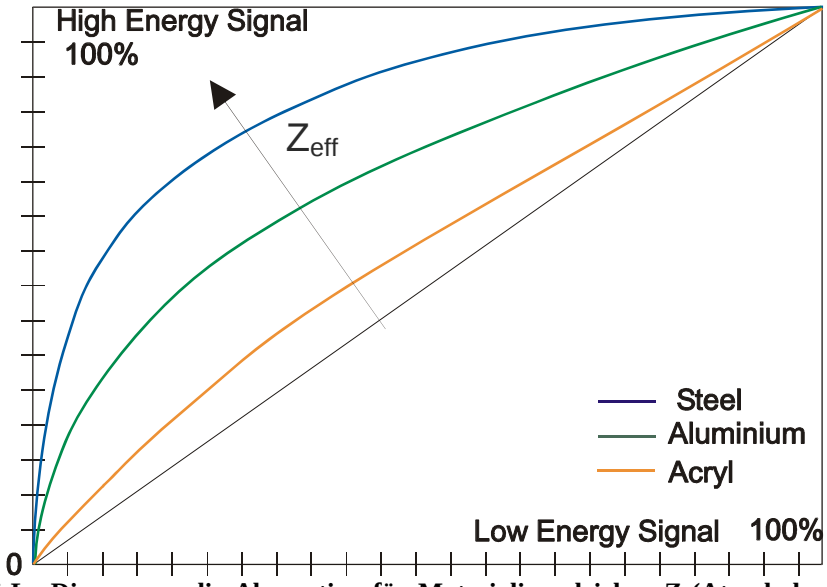

Abbildung 2: Hi-Lo-Diagramm, die Absorption für Materialien gleichen Z (Atomladungszahl) verläuft entlang der verschiedenen gekrümmten Kurven von der oberen rechten Ecke (keine Absorption) mit Materialdicke d=0, bis zur unteren linken Ecke (vollständige Absorption) mit Materialdicke unendlich.

Durch Umformung der Gleichungen auf eine Zwei-Material-Darstellung durch Erstellen einer großen Anzahl sogenannter Look-Up-Tabellen, kann nun auch eine Ein-Material-Darstellung als Projektion auf die entsprechende Materialkurve gewählt werden gewählt werden. Hier kann im Grunde jedes Grundmaterial ausgewählt werden (im oberen Bild ist es ein Kunststoff). Typischerweise wählt man hier Materialien, die im Gepäck häufig vorkommen bzw. im Röntgenbild von besonderer Bedeutung sind. Sinnvoll ist ein Stoff, der Wäsche gut repräsentiert. Zumeist wählt man als zweites Material ein Metall (z.B. Kupfer oder Eisen) aus, da auch das im Koffer vielfach vorkommt und zumeist zu einer Verdeckung von interessanten Objekten führt.

In Abbildung 3 kann in den drei Bildern zum einen ein Überlagerungsszenario von Flaschen (Glas und Plastik) sowie Kleinelektronik erkannt werden. Im mittleren Bild, dem Metallbild, sieht man deutlich, dass die zuvor orangen Kunststoffobjekte ausgeblendet wurden. Es sind nur noch ganz geringe Schatten zu erkennen. Umgekehrt ist im rechten Bild der Metallanteil ausgeblendet, so dass plötzlich hinter dem Mobiltelefon im oberen Bildteil ein Stück Seife deutlich erkennbar wird. Diese Vorverarbeitung ist für die spätere Objekterkennung von entscheidendem Vorteil, da alle Kantenalgorithmen nun erheblich bessere Merkmale aufweisen und sehr viel stabiler detektiert werden können.

Abbildung 3: Ausblenden von Metallanteilen (rechtes Bild) und vorn organischen Bildanteilen (mittleres Bild) zur Verbesserung der Erkennung von Objekten in Überlagerungsszenarien

Diese Bilddarstellung lässt sich sowohl als Vorverarbeitung für Detektionsalgorithmen als auch als direkte Bildaufbereitung der Anzeige für das Bedienpersonal verwenden.
Aufgrund des hohen Quantenrauschens in Röntgenbildern werden die oben angegebenen Operationen auf einem zuvor segmentierten Bild durchgeführt. Dazu wurde ein Kantendetektor auf das Dickenbild im Zwischenergebnis angepasst und ein neuartiges Filter entwickelt, das auf Basis eines Histogramms die Kanten und die Glaspixel zueinander in Beziehung setzt.

2.1.2 Ausblenden von Objekten

Das Ausblenden von Objekten erscheint in der Anwendung der Gepäckkontrolle eine sehr günstige Möglichkeit, die Komplexität des Gepäckstücks für das Bedienpersonal zu verringern. Zum Zweiten ist es auch für die weiteren Auswertealgorithmen einfacher, wenn nur die Einzelobjekte vermessen werden müssen. Daher wurden die oben beschriebenen

Methoden auf die in Abbildung 4 dargestellten Wannen mit Flaschen angewendet. Da das Wannenmaterial exakt bekannt ist, lassen sich die beiden Flaschen vollständig freistellen, so dass im Anschluss die Analysealgorithmen zum Einsatz kommen können.

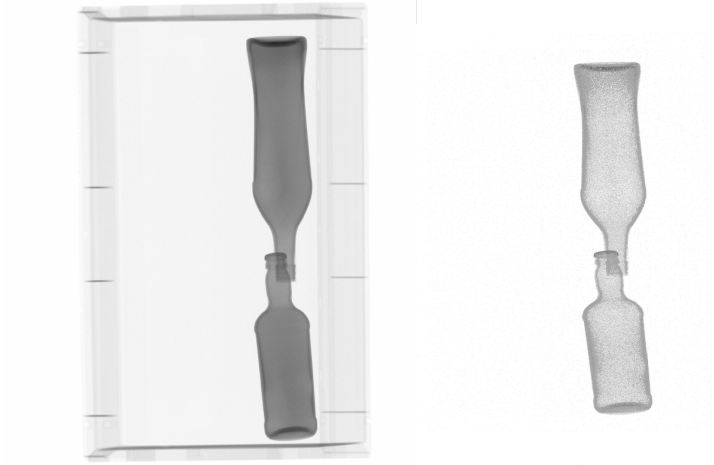

Abbildung 4: Anwendung der Materialzerlegung auf Glasflaschen. Da die Flaschen in diesem Fall einen organischen Inhalt haben und auf einer organischen Wanne liegen, kann eine perfekte Trennung im Glasbild erreicht werden.

Als zweites Beispiel lässt sich in Abbildung 5 die Anwendung dieser Vorverarbeitung für Segmentierverfahren verdeutlichen. Im linken Bild ist das Originalröntgenbild dargestellt. Man erkennt die häufig in Fluggepäck vorkommenden und stark absorbierenden Drahtkleiderbügel, die eine Segmentierung der überlagerten Flaschen sehr schwierig macht. Im mittleren Bild ist der Algorithmus angewendet, die Flaschen treten deutlicher hervor. Für das rechte Bild wurde zusätzlich ein Medianfilter verwendet, so dass sich nun die Flaschen klar segmentieren lassen.

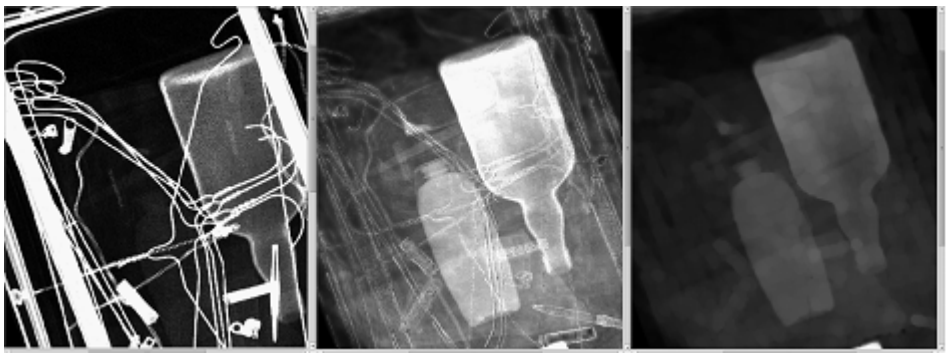

Abbildung 5: Unterdrückung der Kanten durch Kleiderbügel, Darstellung verschiedener Materialbilder mit Bildfilterung zur Unterdrückung kleinerer störender Strukturen (hier die Kleiderbügel, deutlich reduziert im mittleren und rechten Bild.

2.1.3 Kalibration

Um eine präzise Materialbestimmung gewährleisten zu können, ist auch schon jetzt eine Kalibration der Röntgensysteme nötig. Diese ist vor allem wegen verschiedener Generatorspektren und der Materialtoleranzen der gebauten Systeme notwendig. Um eine gegenüber dem

Stand der Technik deutlich erhöhte Materialauflösung zu erzielen, wird in diesem Projekt eine neue Methode untersucht, die erheblich mehr Stützstellen verwendet.

Als Kalibrationsmaterialien wurden diejenigen Materialien ausgewählt, die für die Untersuchung von Gepäck vorkommende Materialien hinsichtlich des effektiven Z nach oben (Kupfer) und unten (Polyethylen = PE) eingrenzen. Polyethylen (PE) ist das Material mit dem kleinsten Z-effektiv, welches unter „normalen“ – d.h. als Gebrauchsgegenstand – Verhältnissen im Umlauf ist. Kupfer (Cu) ist das Material mit dem größten Z-effektiv. Weichere Materialien sind nicht relevant, härtere Materialien (Gold, Silber, Blei) absorbieren Röntgenstrahlung so stark, dass eine Materialauswertung ebenfalls nicht benötigt wird. Des Weiteren deckt die Materialauswahl PE (Z=5.5) und Cu (Z=29) die Bandbreite der unterschiedlichen Materialien im Fluggepäck ab. Alle auftretenden Materialidentifikationsprobleme können somit durch Interpolationsansätze gelöst werden. Dies ist in unserer Anwendung numerisch stabiler als Extrapolationsmethoden. In der Praxis treten in Ausnahmefällen auch Zinkbleche auf (Z=30), die jedoch in der Materialkalibration durch geeignete Maßnahmen berücksichtigt werden können.

Kupfer hat gegenüber anderen Metallen noch den Vorteil, dass es relativ klar definiert erhältlich ist. Variationen können durch eine „industrielle Materialspezifikation“ weitestgehend eingeschränkt werden. Auch PE ist bezahlbar, kann gut bearbeitet werden und ist unabhängig von der Rohstoffquelle dasselbe Material.
Eisen erfüllt die letztgenannte Bedingung beispielsweise nicht. Materialspezifikationen für Eisen sind entweder so weit gefasst, dass man je nach Lieferant oder Schmelze ein röntgentechnisch anderes Material erhält, oder aber das entsprechende Eisen ist unverhältnismäßig teuer.

Die Kalibrationskörper sind als Treppen so aufgebaut, dass man die Kupfer und PE-Treppen quer zueinander fixieren kann. Von diesen Treppen wurden insgesamt 25 Stück verwendet.

Abbildung 6: Durch die verschiedenen Kombinationen von Kupfer und PE kann ein Schachbrettmuster aufgenommen werden, wie es verschiedenen Mischmaterialien entspricht. Insgesamt sind 168 Abbildungen entstanden mit 2596 Stützstellen.

 ©Smiths Heimann GmbH

2.1.3.1 Ergebnisse

Im folgenden Bild sind die Ergebnisse der Vorverarbeitung sichtbar. Metallanteile sind im rechten Kofferbild deutlich hervorgehoben. Genauere Angaben über die tatsächliche Materialdicke wurden von den anderen Projektpartnern nicht benötigt, so dass die Arbeiten auf diesem Stand abgeschlossen werden konnten.

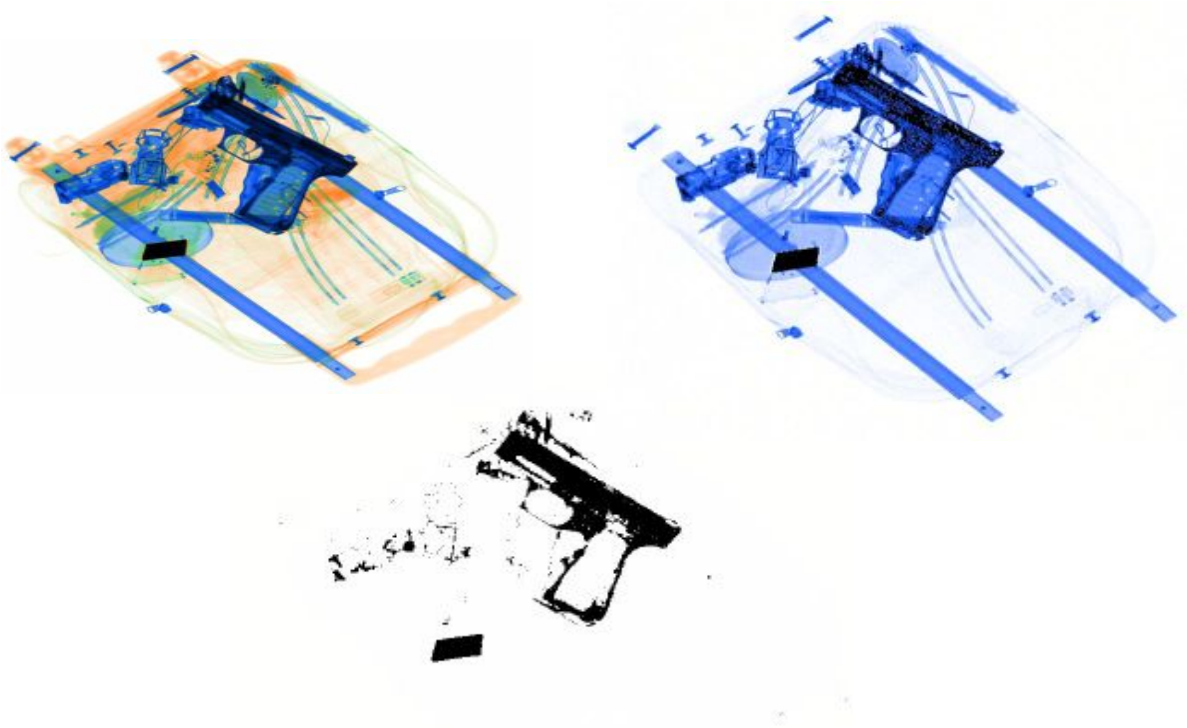

Abbildung 7: Beispiel für die verbesserte Erkennbarkeit einer Waffe mit Hilfe des Metallbildes.

2.1.4 Detektion von Flaschen

Nach intensiven Diskussionen mit der Bundespolizei als beratender Projektpartner, wurden als weiteres Objekt zur Detektion die Behältnisse für Flüssigsprengstoffe definiert. Diese werden im weiteren Bericht als Flaschen bezeichnet, was auch andere Behältnisse (z.B. Tetra-Pak) und untypische Formen mit einschließt.

Da zu Projektbeginn Flüssigkeiten im Handgepäck komplett verboten waren, es aber schon Hinweise gab, dass bei Vorhandensein von technischen Lösungen zur Detektion gefährlicher Flüssigkeiten, dieses Verbot aufgehoben werden soll, wurde die Flaschendetektion für Smiths Heimann zu einem der wichtigsten Aufgaben im Förderprojekt. Dabei reicht es nicht aus, die Existenz der Flaschen zu detektieren, es ist auch notwendig, die genaue Konturkurve der Flaschen festzustellen.

 ©Smiths Heimann GmbH

Es ergaben sich dabei zwei Schwierigkeiten. Zum einen die Detektion von Flaschen verschiedenen Materials direkt im Handgepäck (vgl. Abbildung 8) als Zukunftsvision für Passagiere: Flaschen müssen nicht mehr aus dem Gepäck herausgenommen werden; und zum zweiten die Überlagerung von Flaschen bei der Einzelkontrolle. Diese Aufgabe erscheint für den menschlichen Betrachter wesentlich einfacher, ist aber für die bisher existierenden Algorithmen völlig unmöglich.

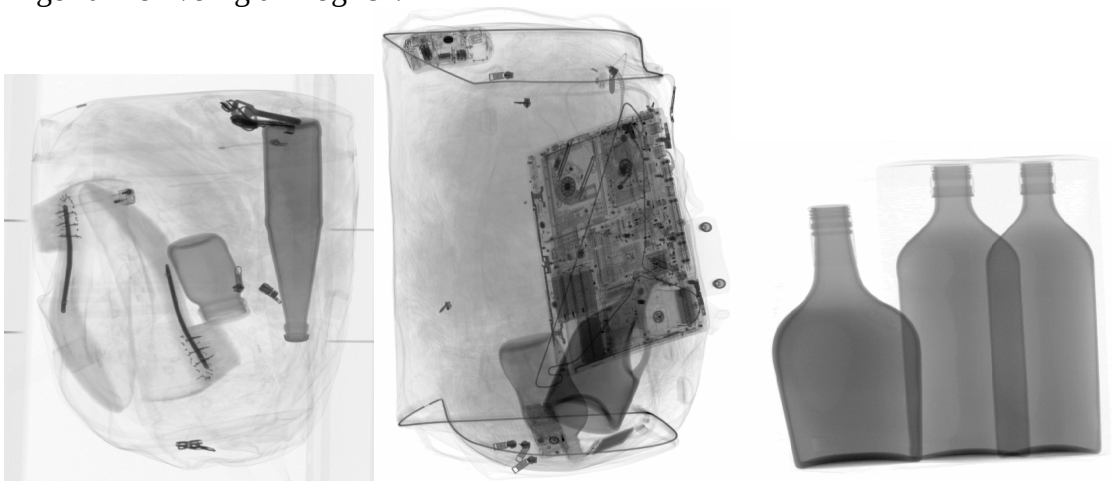

Abbildung 8: Röntgenbilder mit 2 Glasgefäßen im Handgepäck. Die Szene links ist noch als ungestört zu bezeichnen, während die Überlagerung mit einem Laptop die Herausforderung in der Flaschendetektion darstellt. Auch die Überlagerung von Flaschen gleichen Typs ist als Referenzfall geeignet, da viele Algorithmen an dieser Aufgabenstellung scheitern.

In der Detektion von Flaschen konnten über den gesamten Projektverlauf erhebliche Fortschritte gemacht werden. Die zunächst verfolgten Ansätze erwiesen sich jedoch nicht als ausreichend gut, da sie Flaschen zwar im Allgemeinen gut detektieren konnten, jedoch bei Überlagerungen Schwächen zeigten. Diese sind jedoch für die praktische Anwendung im Flughafen sehr relevant, so dass neue Konzepte gefunden werden mussten. Schließlich konnte ein zusätzliches Merkmal zur Detektion herangezogen werden: die typischerweise auftretende Symmetrie von Flaschen. Damit konnten schließlich Kanten von den verschiedenen Seiten der Flaschen zueinander in Bezug gebracht werden, was die Detektionsraten erheblich erhöhte. Insbesondere der Fall der sich gegenseitig überlagernden Flaschen ist damit weitestgehend gelöst.

2.1.4.1 Aktive Konturen

In der ersten Szene liegen die beiden Gefäße in einem Rucksack aus Stoff in einer Kunststoffwanne. Als zusätzliche Objekte sind lediglich ein Paar Schuhe, ein Schlüssel sowie etwas Kleidung vorhanden. In diesem Szenario arbeitet das Verfahren nahezu perfekt.

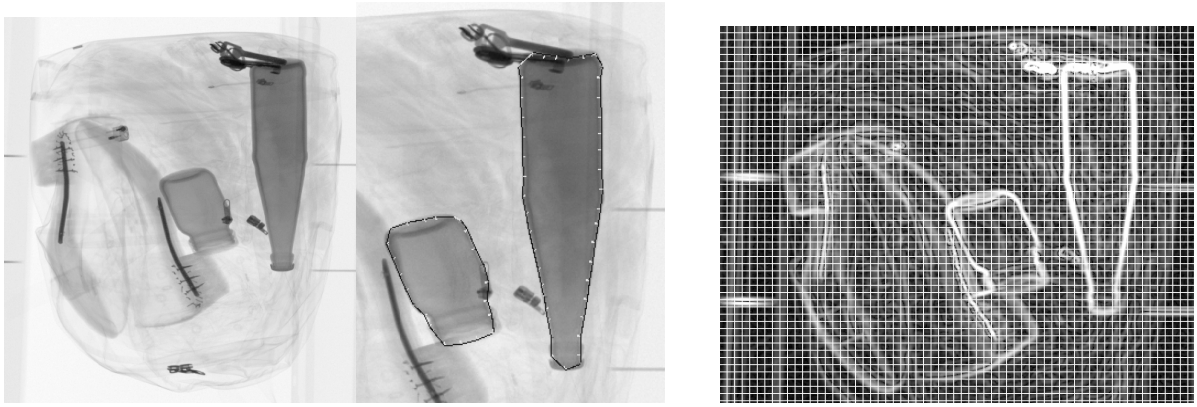

Abbildung 9: In der einfachen Szene werden die Umrisse der beiden Flaschen mit Hilfe von aktiven Konturen genau detektiert. Das rechte Bild zeigt ein Gradientenbild und das Raster, auf dem die Konturen ausgewertet wurden.

2.1.4.2 Verwendung von Formwissen

Das grundsätzliche Thema in 2012 war weiterhin die sichere Erkennung von Flaschen in Handgepäck, wie es in Abbildung 10 exemplarisch dargestellt ist. Eine besondere Schwierigkeit stellt die Überdeckung mit Laptops dar. Dieses Szenario wird in der Zukunft weiter Bedeutung gewissen, da sich Bestrebungen innerhalb der EU abzeichnen, Laptops nach Möglichkeit nicht mehr aus dem Handgepäck auspacken zu müssen.

Im rechten Bild ist der Status abgebildet, wie er vor Beginn dieser Arbeiten vorhanden war.

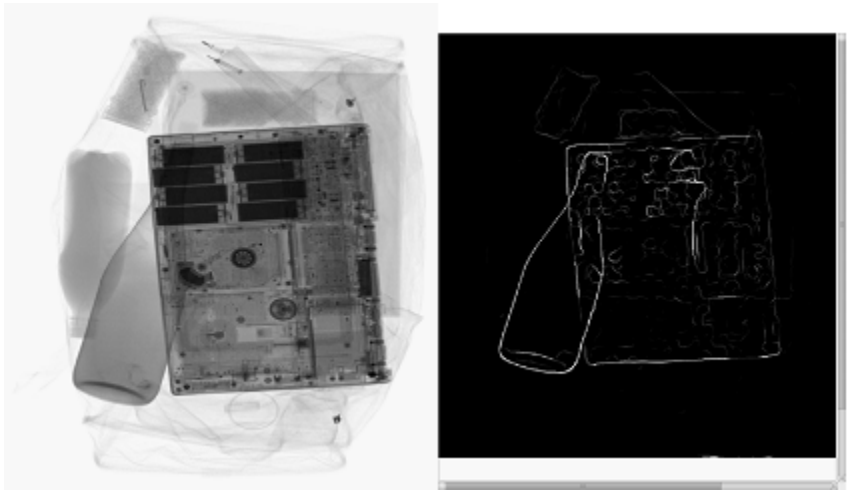

Abbildung 10: Glasflasche, die durch ein Laptop verdeckt ist im Original und Kantenbild. Es sind jedoch zusätzlich viele andere Kanten im Bild vorhanden, so dass die Flasche nicht direkt herausgearbeitet werden kann.

Zwar konnten die Flaschenkanten gut gefunden werden, jedoch erschwerte die Vielzahl von sonstigen Kanten das tatsächliche automatische Finden der Flasche extrem. Dass der Mensch leicht die richtigen Kanten der Flasche herausfiltert, liegt am Formwissen, das der Mensch über typische Flaschenformen hat.

```
// 0 .......xxxxxxx.......          // 0 ......xxxxxxxxx......
// 9 .......xxxxxxx.......          // 9 ......xxxxxxxxx......
// 8 .......xxxxxxx.......          // 8 ......xxxxxxxxx......
// 7 .......xxxxxxx.......          // 7 ......xxxxxxxxx......
// 6 .......xxxxxxx.......          // 6 ......xxxxxxxxx......
// 5 ......xxxxxxxxx......          // 5 ......xxxxxxxxx......
// 4 ......xxxxxxxxx......          // 4 ...xxxxxxxxxxxxxxx...
// 3 .....xxxxxxxxxxx.....          // 3 xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx
// 2 ....xxxxxxxxxxxxx....          // 2 xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx
// 1 ...xxxxxxxxxxxxxxx...          // 1 xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx
// 0 ..xxxxxxxxxxxxxxxxx..          // 0 xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx
// 9 .xxxxxxxxxxxxxxxxxxx.          // 9 xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx
// 8 xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx          // 8 xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx
// 7 xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx          // 7 xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx
// 6 xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx          // 6 xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx
// 5 xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx          // 5 xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx
// 4 xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx          // 4 xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx
// 3 xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx          // 3 xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx
// 2 xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx          // 2 xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx
// 1 xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx          // 1 xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx
// 0 xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx          // 0 xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx
//                                  //
//   01234567890123456789           //   01234567890123456789
```

Abbildung 11: Zwei verschiedene Formmodelle für Flaschen in einer einfachen ASCII-Darstellung.

Daher lag die Idee nahe, das Formwissen über Flaschen ebenfalls für die automatische Detektion zu nutzen. Dazu wurden verschiedene Modelle abgelegt (vgl. Abbildung 11), und die verschiedenen Randkurven aus dem Kantenbild mit diesen Formen verglichen. Damit konnte die Detektion deutlich verbessert werden. Dennoch gab es Situationen, in denen die Konturkurven nicht die tatsächliche Flasche beschrieben, sondern sich aus Teilen der Flasche und Teilen des restlichen Kofferinhaltes zusammensetzen. In diesem Fall ähnelten die Konturen den Formmodellen nicht ausreichend gut, so dass keine Detektion möglich war. Die Verbesserungen der Konturkurven musste also bereits während der Erstellung der Kantenprototypen eingefügt werden.

2.1.4.3 Segmentierung von Flaschen – Verwendung von Symmetrieinformation[1]

Eine Untersuchung von vielen hundert Flaschen hat als ein typisches gemeinsames Merkmal die Symmetrie der Flaschenform ergeben. Nur sehr wenige im Handel erhältliche Flaschen weisen keinerlei Symmetrieeigenschaften auf. Insbesondere bei Überdeckungen scheint auch das menschliche Wahrnehmungssystem eine symmetrische Ergänzung von Flaschenkanten zur Detektion hinzuzunehmen. Aus diesem Grund wurde der Versuch gestartet, die Objekterkennung und damit die Segmentierung von Flaschen um die Eigenschaft der Symmetrie zu ergänzen. Wie in Abschnitt 1.4.2 bereits erwähnt wurden dazu 2 Veröffentlichungen herangezogen, wobei insbesondere die zweite sehr erfolgversprechende Ergebnisse lieferte.

[1] Der Symmetriealgorithmus soll patentrechtlich geschützt werden und ist nicht zu veröffentlichen.

Symmetriealgorithmus

Aufbauend auf einem Kantenbild wird vom Ursprung des Bildes ausgehend, für jede Bildzeile das Auftreten (Ort) von Kanten notiert. Abbildung 12 veranschaulicht dieses Vorgehen. Häufungen führen schließlich zu symmetrischen Objekten (vgl. Tabelle auf der rechten Bildseite). Um Symmetrielinien für alle möglichen Drehwinkel detektieren zu können, wird dazu das gesamte Kantenbild gedreht. Der Algorithmus wird dann für alle Drehwinkel durchgeführt. Mit der folgenden Gleichung wird dann die Symmetrielinie bestimmt:

$$W(d,\delta) = \left(1 - \frac{d}{d_{Max}}\right) + \left(1 - \frac{\delta}{\delta_{Max}}\right) \quad (1)$$

d : Abstand zum Mittelpunkt der Symmetrielinie
δ: Winkeldifferenz der Paare

In Abbildung 12 erkennt man die sich ergebende Symmetrielinie als gelbe Linie. Auch die teilweise Verdeckung der Flasche stört die Detektion nicht.

Die eigentliche Verfolgung der Kantenabschnitte ist über das sogenannte „dynamic programming“ gelöst. Zusätzliche Terme für horizontale bzw. vertikale fortgesetzte Linien, die sowohl als Strafterme als auch als Bonusterme verwendet werden können, erzeugen eine allgemeinere Kostenfunktion, mit der verschiedene Objekttypen detektiert werden können.

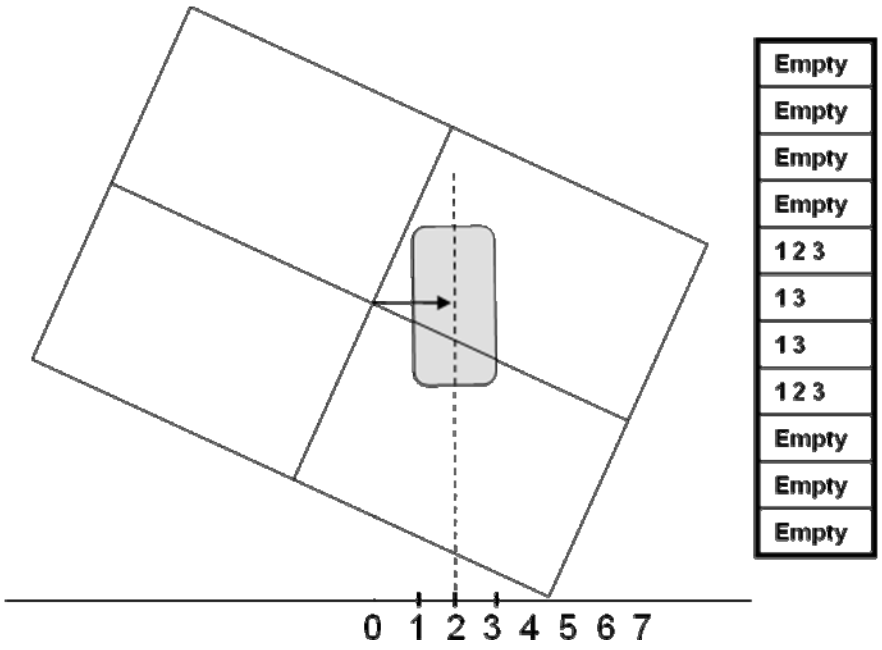

Abbildung 12: Algorithmus zur Detektion von symmetrischen Bildinhalten

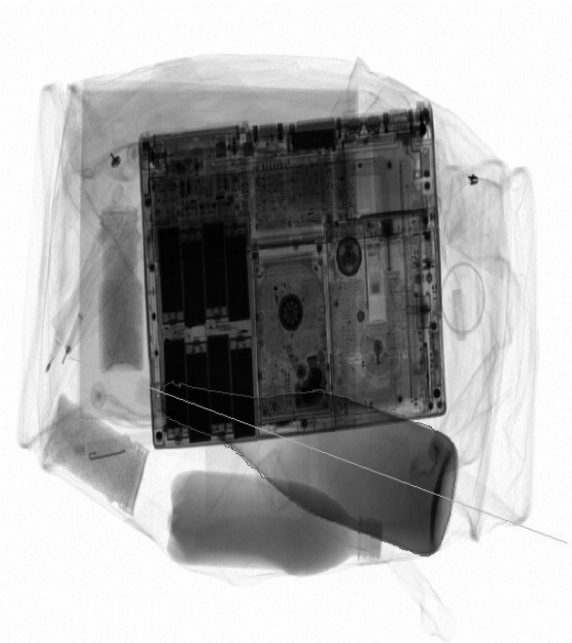

Abbildung 13: Gefundene Glasflasche hinter Verdeckung mit Symmetrieachse

Geometrische Entzerrung

Durch die geometrische Verzerrung der Abbildung typischer Röntgenanlagen ergaben sich für größere Flaschen, wie beispielsweise die Weinflasche in Abbildung 14, dass keine direkte Symmetrie vorhanden ist (mittleres Bild), obwohl die Flasche selbst symmetrisch ist. Um dennoch diese Flasche als symmetrisches Objekt zu erkennen, musste zunächst eine geometrische Entzerrung durchgeführt werden. Dazu wurde das Verfahren eingesetzt, das im vergangenen Jahr durch den Projektpartner TU Darmstadt vorgestellt worden war. Durch diese Entzerrung konnte die Detektion von Flaschen nochmals deutlich erhöht werden.

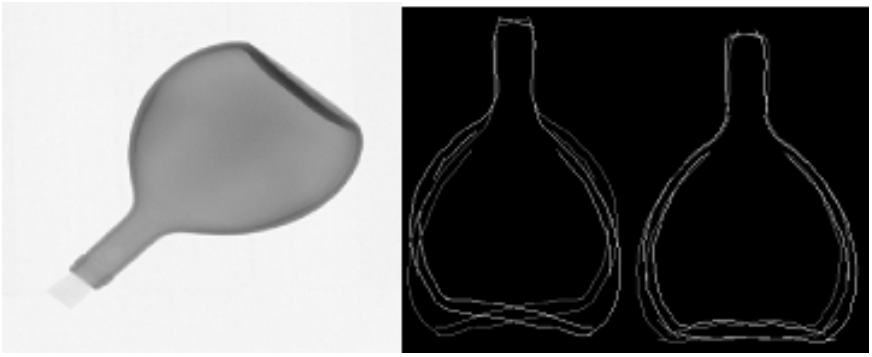

Abbildung 14: Korrektur der geometrischen Verzerrung des Röntgendetektors. Im mittleren Bild ist die Flasche mit ihrem Spiegelbild abgebildet. Man erkennt deutlich, dass das Bild der Flasche durch die geometrische Verzerrung nicht achsensymmetrisch ist, obwohl die Flasche selbst diese Eigenschaft aufweist. Eine Entzerrung der Geometrie (rechtes Bild) konnte das Problem beheben.

 ©Smiths Heimann GmbH

2.1.4.4 Ergebnisse im Fall überlagerter Flaschen

Im folgenden Beispiel handelt es sich um einen für das menschliche Auge einfachen Fall von drei sich überlagernden Flaschen. Praktisch alle Versuche, diese Flaschen korrekt zu segmentieren sind im Vorfeld dieses Projektes gescheitert.

Abbildung 15: Drei sich überlagernde Glasflaschen. Die mittlere Flasche sowie die Flaschenhälse konnten nicht korrekt segmentiert werden.

Erst die Verwendung der neuen Algorithmen brachte den entscheidenden Fortschritt, der dazu führt, dass in der weiteren Verwendung dieser Information zukünftig auch eine Bestimmung des Flascheninhalts möglich erscheint, da es für die meisten bekannten Schätzverfahren im Vorfeld nötig ist, Anzahl und Position der Flaschen zu kennen.

Abbildung 16: Korrekt segmentierte Flaschen trotz Überlagerung

Insgesamt kann man sagen, dass die Flaschenerkennung sehr gut arbeitet. Das Gesamtergebnis der Detektion von Flaschen ist in Abbildung 17 dargestellt. Für den Fall, dass die Flasche in ihrer Fläche zu 65% gefunden werden muss (exakt 65% der Pixelfläche werden korrekt markiert) weist die Detektion bei einer Detektionsrate von etwa 95% nur einen kleinen Anteil an fehlerhaft alarmierten Objekten auf. In der für das maschinelle Sehen typischen Grafik von „Precision“ zu „Recall“ wird dies deutlich. („Precision“ bedeutet die tatsächlichen Treffer bezogen auf alle Bilder, die tatsächlich eine Flasche enthalten; „Recall“ bedeutet die tatsächlichen Treffer bezogen auf alle Bilder, die der Algorithmus alarmiert hat, egal ob eine Flasche enthalten war oder nicht.).

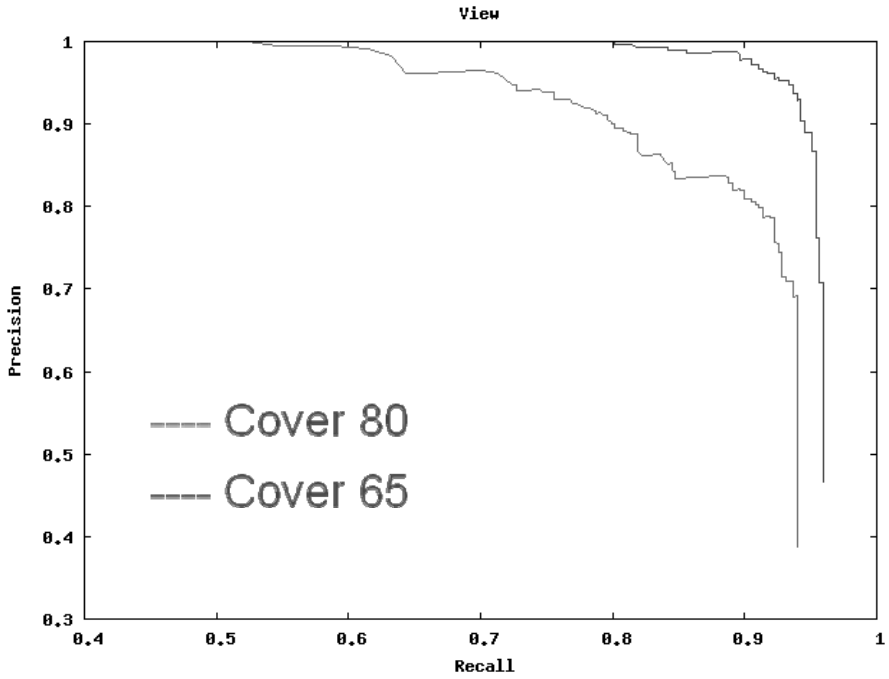

Abbildung 17: Ergebnisse der Flaschenerkennung. Cover 80 bzw. Cover 65 sind hierbei Detektionskritierien, nach denen ein Alarm als Treffer bewertet wird. Cover 80 bedeutet, dass mindestens 80% der Pixel des zu suchenden Objektes tatsächlich gefunden worden sind. Cover 65 entsprechend 65%, was ein einfacheres, aber ausreichendes Kriterium darstellt.

2.1.5 Testdatenerstellung (AP6)

Zu diesem Arbeitspaket wurden von Seiten der Firma Smiths Heimann die Gepäckstücke, verschiedene Gefahrstoffe in Form einer großen Anzahl von Flaschen, sowie verschiedene Verdeckungsmaterialien zur Verfügung gestellt. Zwei weitere große Bildaufnahmen fanden zudem in Lübeck im Kompetenzzentrum der Forschungs- und Erprobungsstelle der Bundespolizei statt. Der Schwerpunkt der Aufnahmen war es, eine möglichste große Anzahl von Schusswaffen aufzunehmen, die vom Kompetenzzentrum der Bundespolizei zur Verfügung gestellt wurden.

In der ersten Bildaufnahme wurden Komplettbilder (also Koffer mit Schusswaffen in verschiedenen Szenarien) aufgezeichnet. Diese Bilddaten wurden anschließend per Hand annotiert. Das bedeutet, dass die Schusswaffen auf Pixelbasis im Bild markiert wurden. Nur mit diesem mühsamen Verfahren ist es möglich, die Bilder später zum Training und Test von Algorithmen verwenden zu können. Es entstanden ca. 1500 Bilder mit verschiedenen Überdeckungen und verschiedenen Waffenpositionen und unterschiedlichem Schwierigkeitsgrad.
In der zweiten Bildaufnahme wurden die Waffen ungestört aufgenommen – also ohne Gepäck, sondern in für Röntgenstrahlung möglichst unsichtbaren Behältnissen, dafür aber in möglichst vielen Positionen (Drehwinkel, Höhe, Bandposition). Dazu mussten die Waffen mit Hilfe von Füllmaterialien geringer Dichte durch die Röntgenanlage gefahren werden (vgl. Abbildung 18). Es ergaben sich bei 8 verschiedenen Rotationswinkeln und 3 Bandpositionen insgesamt 24 Aufnahmen pro Waffe.

 ©Smiths Heimann GmbH

Abbildung 18: Schusswaffe bei der Bildaufnahme mit nahezu transparentem Hintergrund

Es wurde jeweils das gleiche Modell einer Handgepäck-Röntgenanlage mit 4 Projektionsrichtungen verwendet.

Als Nachbearbeitung mussten die einzelnen Waffen freigestellt werden, um den Hintergrund der Bildaufnahme aus dem Waffenbild zu entfernen. Dieser Arbeitsschritt war zwar immer noch manuell, konnte aber mit Hilfe eines kleinen Programms stark beschleunigt werden, da es sich im Gegensatz zur ersten Bildaufnahme um unverdeckte Waffen gehandelt hat. Es durfte jedoch nichts von der Schusswaffe abgeschnitten werden, so dass auch hier alle Bilddaten überprüft werden mussten.

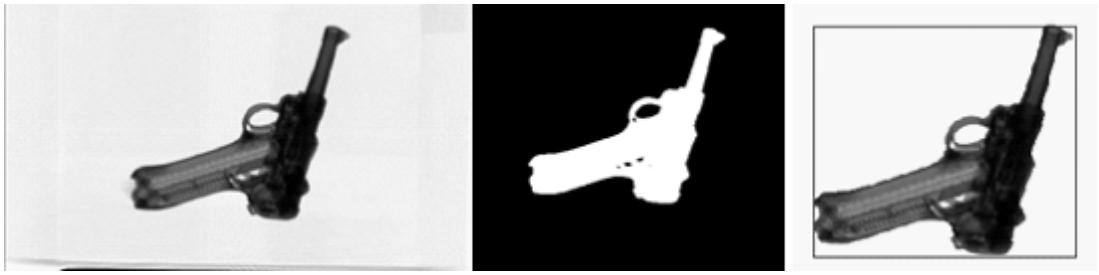

Abbildung 19: Schusswaffe aufgenommen in einer Wanne, Schablone des Waffenbereichs (mittleres Bild) und schließlich freigestellte Schusswaffe (rechtes Bild).

Schließlich kann sich auch die genaue Position der Schusswaffe im späteren Überlagerungsbild gemerkt werden (vgl. Abbildung 20). Damit konnte nun automatisch die Detektionsrate eines Algorithmus bestimmt werden. Dies konnte als einfache Rahmenüberdeckung bis hin zur pixelgenauen Detektion geschehen. Vorteil dieser Vorgehensweise ist die enorme Menge an Bilddaten, die nun automatisch generiert werden kann. Der Markierungsaufwand ist dabei erheblich reduziert, da immer wieder die gleichen Waffen mitsamt ihrer Markierung projiziert werden.

 ©Smiths Heimann GmbH

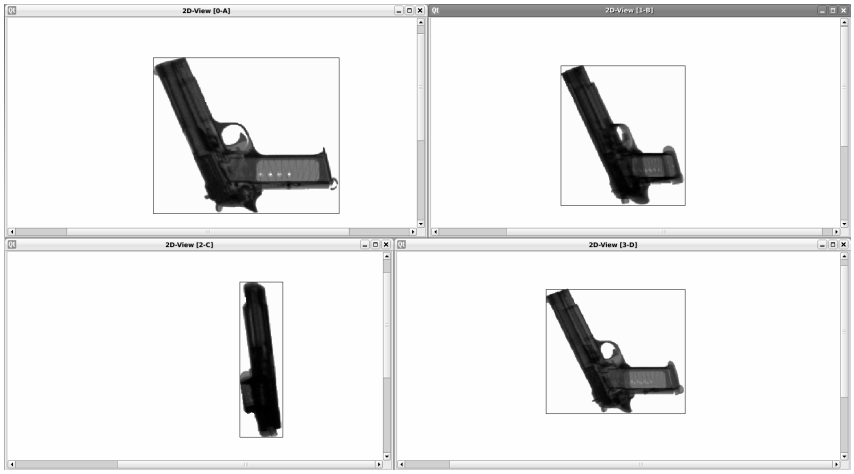

Abbildung 20: Vier Projektionsrichtungen einer Schusswaffe. Der blaue Rahmen zeigt die Position der Waffe im Bild. Mit dieser Information kann schließlich die Detektionsrate des Erkennungsalgorithmus überprüft werden.

Diese Vorgehensweise wurde jeweils für alle vier Projektionen der Röntgenanlage durchgeführt, so dass immer ein Set der geometrisch zueinander passenden Projektionen vorhanden war. Insgesamt entstanden auf diese Weise insgesamt 2700 Bilder. Davon entfallen 1600 auf Waffenbilder, 900 auf Bilder von zerlegten Waffen, 150 auf Bilder von Munition und 120 auf Bilder von typischen Fehlalarmobjekten (z. B. Regenschirmen), um später eine Kreuzvalidierung durchführen zu können, dass tatsächlich die Waffe selbst und keine Artefakte der Bildgenerierung zur Detektion geführt haben.

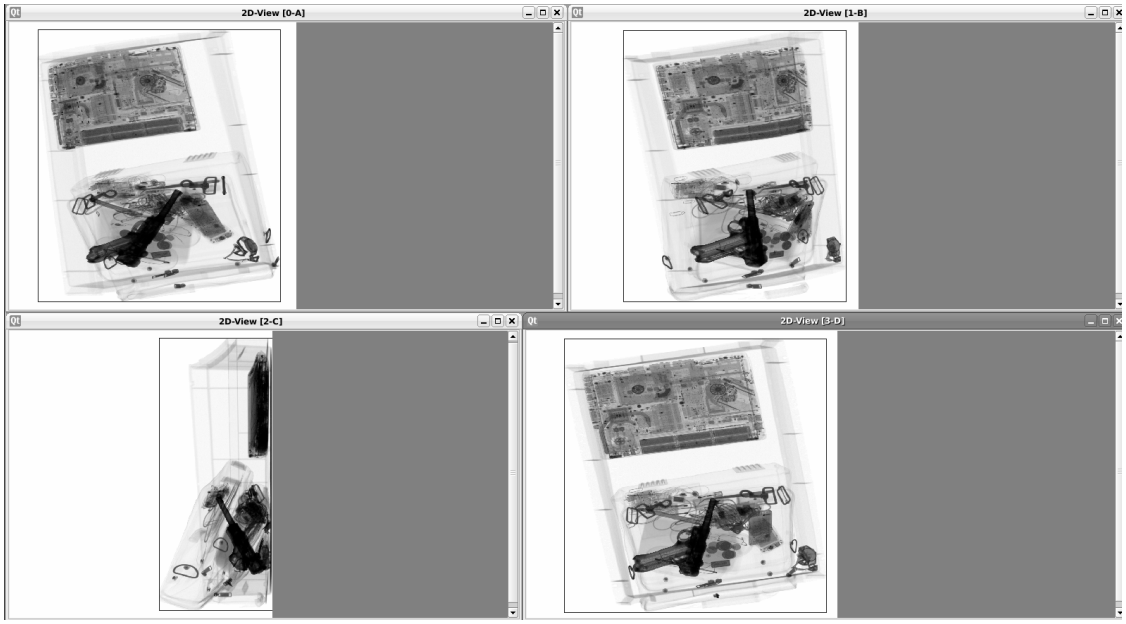

Abbildung 21: Eingeblendete Schusswaffe in das Röntgenbild einer aufgeklappten Laptoptasche.

Ein weiterer Vorteil dieser Vorgehensweise besteht darin, dass genau auch die Abhängigkeit der Detektion von der Komplexität des Gepäckstücks ausgewertet werden kann, wenn vor dem Einblenden die Gepäckstücke kategorisiert wurden. Von Interesse sind Laptoptaschen oder auch kleine Business-Koffer, die sowohl Laptops als auch weitere Metallteile wie Stromversorgung und Kabel, aber auch Kleiderbügel und dicke Aktenordner enthalten können. Zu jeder Zeit können die Waffen auch in neues Gepäck eingeblendet werden, wenn

sich die typische Zusammensetzung der Gepäckstücke ändert. Dies kann beispielsweise durch neue Regularien bezüglich der Mitnahme von Flüssigkeiten nötig werden.

2.1.6 Demonstrator

Im letzten halben Jahr der Projektlaufzeit wurden die Ergebnisse der verschiedenen Forschungsgruppen zusammengetragen. Ziel war es, in einem gemeinsamen Demonstrator alle Verfahren, die sich über den Projektverlauf als gut für die Detektion von Schusswaffen beziehungsweise Flaschen herauskristallisiert haben, gemeinsam auf einem PC vorführen zu können. Bereits zur Halbzeit des Sicura-Projektes stand das grundsätzliche Konzept für den Demonstrator fest, wie es im Flussdiagramm in Abbildung 22 vorgestellt wurde. Um möglichst einfach den verschiedenen Vorgehensweisen der drei Forschungspartner gerecht zu werden, sollten alle Ansätze parallel verfolgt und erst am Schluss zusammengefasst werden. Die Bildvorverarbeitung, wie sie ausschließlich bei Smiths Heimann durchgeführt wurde, sollte jedoch für alle Partner in gleicher Weise zur Verfügung stehen.

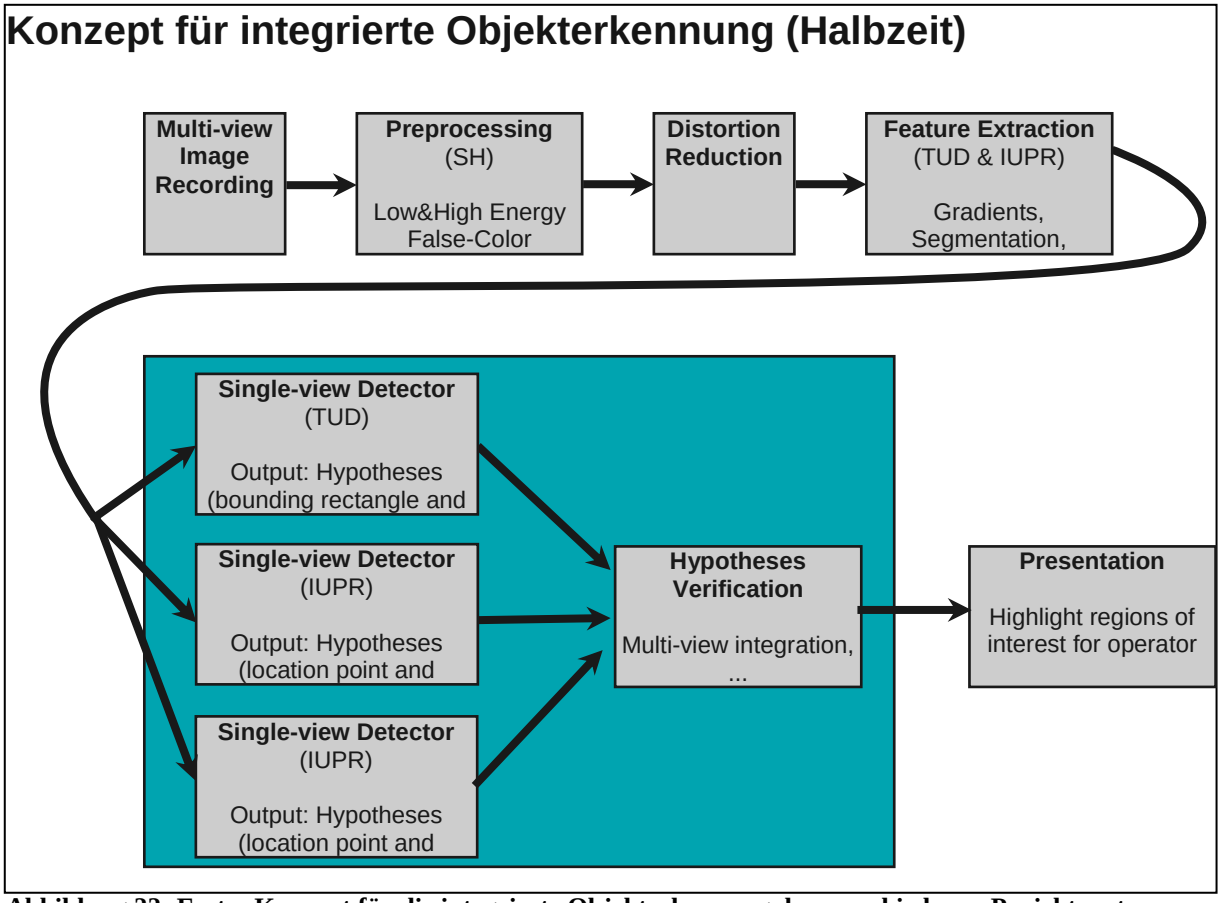

Abbildung 22: Erstes Konzept für die integrierte Objekterkennung der verschiedenen Projektpartner

Es zeigte sich jedoch im Projektverlauf, dass teilweise auch eine angepasste Vorverarbeitung notwendig war, die auf die spezifischen Anforderungen der einzelnen Detektionsmechanismen abgestimmt war. Eine gemeinsame Vorverarbeitung, wie sie zur Halbzeit des Projektes angedacht war, stellte sich als nicht optimal heraus. Daher wurde diese dann innerhalb des Detektionsblocks von den jeweiligen Forschungspartnern durchgeführt und ist hier nicht im Detail erwähnt. Das Flussdiagramm in Abbildung 23 zeigt den finalen Ablauf des Integrators.

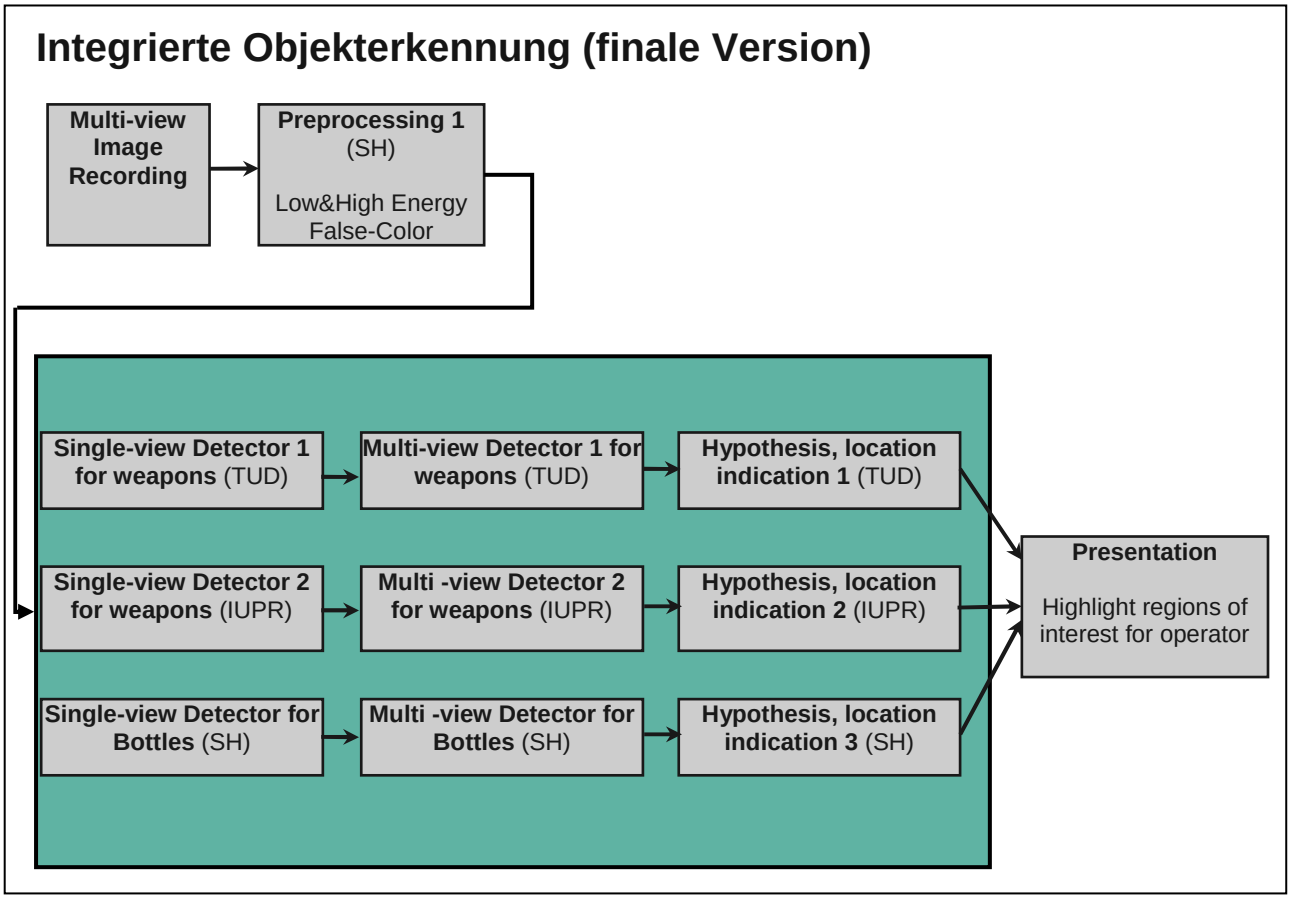

Abbildung 23: Flussdiagramm für die integrierte Objekterkennung der verschiedenen Projektpartner

In Abbildung 24 ist schließlich die grafische Benutzeroberfläche des Demonstrators zu sehen. Abgebildet ist eine typische Wanne aus dem Handgepäck mit eingeblendeter Schusswaffe. Diese Waffe wurde von zwei verschiedenen Modulen erkannt, was durch die beiden Kreise in verschiedenen Farben deutlich wird.

 ©Smiths Heimann GmbH

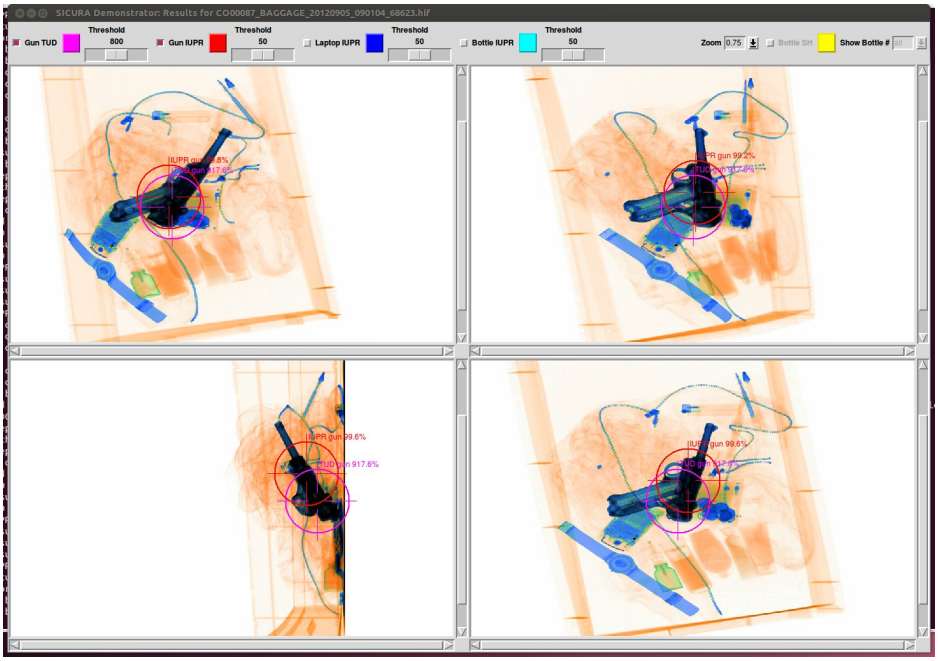

Abbildung 24: Grafische Benutzerschnittstelle für die Objekterkennung.

Für die Abschlusspräsentation wurde dieser Demonstrator schließlich live an eine Röntgengepäckprüfanlage mit 4 Projektionswinkeln angeschlossen (Abbildung 25). Damit konnte gezeigt werden, dass die Verfahren auch in völlig unbekanntem Bildmaterial arbeiten. Es waren die optimierten Detektionsverfahren aller Forschungspartner gleichzeitig und unabhängig voneinander im Einsatz.

Abbildung 25: Live-Aufbau des Demonstrators mit einer Smiths-Heimann HS6040aTiX.

 ©Smiths Heimann GmbH

2.2 Zahlenmäßiger Nachweis

Der weitaus größte Anteil der Projektkosten entfällt auf Personalkosten im Bereich der Erforschung von Algorithmen zur Detektion von Flüssigkeitsbehältern und in der Vorverarbeitung von Röntgenbildern zur Verbesserung der Detektionseigenschaften für die eigenen Algorithmen sowie für die Algorithmen der Projektpartner. Die Arbeiten zur Detektion von Flaschen in den verzerrten Röntgenbildern gestalteten sich schwieriger als erwartet, und nahmen damit einen Großteil der Fördermittel in Anspruch (1900 Stunden für die Arbeiten beschrieben in den Abschnitten 2.1.4.1 und 2.1.4.2). Die Einarbeitung von zusätzlichen flaschentypischen Merkmalen sowie die dazu erforderliche Entzerrung der Geometrie (beschrieben in den Abschnitten 2.1.4.3 und 2.1.4.4) entfielen etwa 1400 Stunden. Insbesondere überlagerte Flaschen stellten ein großes Problem dar, so dass diese Arbeiten ebenfalls länger dauerten als zunächst geplant und damit teurer wurden. Für die Erstellung des Demonstrators (vgl Abschnitt 2.1.6) wurden in etwa 300 Stunden verwendet. Die Arbeiten zur Kalibration, der optimierten Materialdarstellung und dem Ausblenden von Objekten (Abschnitte 2.1.1, 2.1.2 und 2.1.3) hatten insgesamt einen Umfang von etwa 3000 Stunden, ungefähr jeweils zu einem Drittel. Die restlichen Arbeitsstunden entfielen auf das Projektmanagement des Gesamtprojektes (ca. 1000 Stunden) und die Bildaufnahmen sowie die Nachbearbeitung der Bilddaten (ca. 300 Stunden).

Im Bereich der Reisekosten ergaben sich hingegen geringere Ausgaben als ursprünglich geplant. Es konnte nur ein Konferenzbesuch durchgeführt werden, da die Mitarbeiter zum einen auch mit anderen Projekten verplant waren zum anderen auch keine eigenen Veröffentlichungen vorzustellen hatten.
Zwei größere Bildaufnahmen bei der Bundespolizei in Lübeck wurden durchgeführt, um den Bilddatensatz für dieses Projekt zu generieren. Der Reisebericht zum Besuch der DAGM in Graz vom Oktober 2012 liegt vor.

Der Hauptbestandteil der Materialien war im Bereich der Imitate für Sprengstoffe sowie typische ungefährliche Kofferobjekte (z.B. Regenschirme) zur Objekterkennung, die größtenteils bei der Bildaufnahme in Lübeck oder bei den Bildaufnahmen im eigenen Labor verwendet wurden. Dabei handelt es sich auch um Objekte, die im Wesentlichen für die Forschungsarbeiten der universitären Projektpartner benötigt wurden, aber von der Fa. Smiths Heimann angeschafft wurden, da hier auch die Röntgenanlagen für die Bildaufnahmen zur Verfügung gestellt wurden.

Als einzige Investition wurde ein schneller Auswerterechner angeschafft, der über die Laufzeit hinweg für die Simulation der teilweise sehr rechenintensiven Algorithmen diente.

2.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die im vorliegenden Projekt geleisteten Arbeiten zeigen, dass die automatische Objekterkennung auch in Röntgenbildern erfolgversprechend ist. Diese Erkenntnisse wären ohne das Förderprojekt nicht möglich gewesen. Es bedurfte intensiver Forschungsarbeiten, um die anfänglichen Schwierigkeiten zu überwinden und letztlich zu erfolgreichen Algorithmen zu gelangen. Dies betrifft sowohl die Objekterkennung (in diesem Fall die Flaschenerkennung in Abschnitt 2.1.4) als auch die Arbeiten für die optimierte Materialdarstellung. Hier mussten sehr aufwändige Reihenuntersuchungen durchgeführt werden, die im üblichen Entwicklungsgeschäft nur sehr schwer umzusetzen sind. Vor diesem

Forschungsprojekt gab es kaum Arbeiten auf diesem Gebiet gab, da Röntgenbilder außerhalb der Medizintechnik im Gegensatz zu den üblichen Fotos kaum in der breiten wissenschaftlichen Community zu Forschungsarbeiten herangezogen werden. Aus diesem Grund ist der Stand der Technik für Objekterkennung in Röntgenbildern extrem niedrig. Umso bemerkenswerter sind die Ergebnisse, die in diesem Projekt in so kurzer Zeit erreicht werden konnten.
Durch die intensiven Diskussionen mit der Forschungs- und Erprobungsstelle der Bundespolizei konnte auch sichergestellt werden, dass die Notwendigkeit der Arbeiten gewährleistet war.

2.4 Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

Die im Rahmen des Projektes Sicura geleisteten Arbeiten werden zur kontinuierlichen Weiterentwicklung von Fluggast-Kontrollstellen beitragen. Insbesondere die erforschten Algorithmen zur Merkmalsextraktion und Klassifikation von Flaschen könnten schon in naher Zukunft bei der sogenannten BLS („bottled liquid detection“) im gepackten Koffer die Grundlage für eine echte Unterscheidung zwischen gefährlichen und ungefährlichen Flüssigkeiten bilden.
Die neuen Methoden zur Bilddarstellung werden ebenfalls mittelfristig in eine verbesserte Aufbereitung des Röntgenbilds für Kontrollpersonal oder für automatische Algorithmen herangezogen. Die Arbeiten werden deshalb fortgesetzt.
Es ist geplant, im Lauf der nächsten Jahre die Algorithmen zur Produktreife weiterzuentwickeln. Diese Entwicklung und der Vertrieb dieses Produkts erfolgt in Wiesbaden.

2.5 Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Durch die Notwendigkeit, die Segmentierung von Flaschen erheblich zu verbessern, sind wir auf zwei Veröffentlichungen aufmerksam geworden, in denen die Detektion von Symmetrieinformationen aus Bildern beschrieben werden. Dabei handelt es sich um „Detecting Symmetry and Symmetric Constellations of Features” (Loy & Eklund 2006) und um “Real Time Detection and Segmentation of Reflectionally Symmetric Objects in Digital Images” (Li, Zhang & Kleeman, 2006). Insbesondere der zweite Algorithmus arbeitet auch auf Röntgenbildern hervorragend und ist zudem sehr effizient. Aus diesem Grund wurde das AP 1 entgegen der ursprünglichen Planung verlängert. Dies konnte kostenneutral geschehen, da das AP2 schneller zu Ergebnissen geführt hat als ursprünglich geschätzt.

2.6 Erfolgte und geplante Veröffentlichungen nach Nr. 11

Es ergaben sich im Projektverlauf keine Veröffentlichungen in Form von Zeitschriftenartikeln oder Buchkapiteln. Die Patentierung des Flaschenalgorithmus ist momentan in Arbeit.

 ©Smiths Heimann GmbH