

SCHLUSSBERICHT

Projekt **ESecLog**
Erweiterte Sicherheit in der Luftfrachtkette
*Enhanced **Security** for **Logistics***

Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF)
Projektträger VDI Technologiezentrum GmbH
Förderinitiative „Forschung für die zivile Sicherheit - Sicherheit im Luftverkehr“



Teilvorhaben:

Bildgebende Durchstrahlungsverfahren zur Erkennung der Unversehrtheit von Frachtladungen

Zuwendungsempfänger:

Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung BAM

ausführende Stelle – Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung BAM, Fachgruppe VIII.3 – Radiologische Verfahren

Laufzeit des Vorhabens:

01.05.2013 – 30.06.2016

Förderkennzeichen:

13N12642

Autoren:

Vogel, Justus

Kontakt:

Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung BAM

Dr. rer. nat. Justus Vogel

Unter den Eichen 87

12205 Berlin, Germany

Tel: +49 30 8104 4732

Mail: justus.vogel@bam.de

ABBILDUNGSVERZEICHNIS	4
TABELLENVERZEICHNIS	6
ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS	7
I. KURZDARSTELLUNG	8
1. Aufgabenstellung	9
2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde	11
3. Planung und Ablauf des Vorhabens	13
4. Wissenschaftlicher und technischer Stand an den angeknüpft wurde	16
5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen	17
II. EINGEHENDE DARSTELLUNG	18
1. Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse im Einzelnen mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele	18
1.1 IST-Analyse der derzeit eingesetzten Durchstrahlungstechnik, Ableitung von Optimierungsbedarfen im Hinblick auf die Projektziele und Erstellung eines SOLL-Konzeptes	18
1.2 Entwicklung eines Testkörpers für die Frachtprüfung	24
1.2.1 Drahterkennungstest	27
1.2.2 Durchdringungstest (Stahl)	28
1.2.3 Kontrastempfindlichkeitstest	30
1.2.4 Ortsauflösungstest	31
1.2.5 Materialdiskriminierungstest	32
Leichtmetall-Hochdichtes Metall	32
Organisches- Material, Diskriminierungstest nach Ordnungszahl	33

Flüssigkeiten-Feststoffe Diskriminierungstest	34
1.3 Entwicklung eines Röntgensiegels zum Nachweis der Manipulation einer Fracht	36
1.3.1 Entwicklung einer virtuellen Signatur	37
1.3.2 Entwicklung eines Röntgensiegels	39
1.4 Entwicklung eines Röntgen- und Tageslichtsensors zum Nachweis des erfolgten Röntgens einer Fracht und des unerlaubten Öffnens	42
1.4.1 Passive Variante	43
1.4.2 Semi-passive Variante	45
1.4.3 Aktive Variante	46
Herstellungskosten und Lebenszeit des Licht- und Röntgensensors	50
1.5 Entwicklung eines automatisierten Bildvergleichs für Durchstrahlungsaufnahmen	51
1.5 Sicherheitsbewertung	61
1.7 Übertragbarkeiten, Standardisierungsansätze und Leitfaden	68
2. Darstellung der wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	71
3. Darstellung der Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	71
4. Darstellung des voraussichtlichen Nutzens, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans	72
5. Darstellung des während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordenen Fortschritts auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen	73
6. Darstellung der erfolgten oder geplanten Veröffentlichungen der Projektergebnisse	73
ANHANG	75
Entwicklung eines Testkörpers für die Frachtprüfung	75
Bildvergleich – Optimierungsverfahren	76
Bildvergleich - Bewertungsmetrik	77
Bildvergleich – Kantenbestimmung	80
Bildvergleich – Momente und Schwerpunkt	80
Bildvergleich – B-Spline Interpolation	81
Bildvergleich – Erosion und Dilatation	82
Sicherheitsbewertung – Wahrscheinlichkeitsrechnung	83
LITERATURVERZEICHNIS	85

Abbildungsverzeichnis

ABBILDUNG 1 URSPRÜNGLICHE PLANUNG BALKENPLAN UND MEILENSTEINE	15
ABBILDUNG 2 BALKENPLANANPASSUNG INKL. VERZÖGERUNGEN	15
ABBILDUNG 3 SMITH DETECTION HI-SCAN180180-2IS	21
ABBILDUNG 4 RAPISCAN SYSTEMS: RAPISCAN 638XR	21
ABBILDUNG 5 MODELLIERUNG DER RADIOGRAPHISCHE UNTERSUCHUNGEN DES TESTKÖRPER	24
ABBILDUNG 6 ERGEBNIS EINES SIMULATIONSVERSUCHES DES TESTKÖRPERS	25
ABBILDUNG 7 DUAL-ENERGY-BILD	26
ABBILDUNG 8 PRAKTISCHE ERPROBUNG DES TESTKÖRPERS AM FLUGHAFEN BREMEN	27
ABBILDUNG 9 DRAHTERKENNUNGSTES	28
ABBILDUNG 10 TEST ZUR QUANTITATIVEN BEWERTUNG DER DURCHDRINGUNGSFÄHIGKEIT	29
ABBILDUNG 11 KONTRASTEMPFLINDLICHKEITSTEST	30
ABBILDUNG 12 TEST ZUR BEWERTUNG DER ORTSAUFLÖSUNG	31
ABBILDUNG 13 MATERIALDISKRIMINIERUNG	32
ABBILDUNG 14 MATERIALDISKRIMINIERUNG: ORGANISCHES MATERIAL	33
ABBILDUNG 15 TEST DER EINZELKOMPONENTEN AM FLUGHAFEN BREMEN	34
ABBILDUNG 16 DICHTEN UND EFFEKTIVE ORDNUNGSZAHL	35
ABBILDUNG 17 DICHTEN UND ORDNUNGSZAHL	35
ABBILDUNG 18 TEST DER EINZELKOMPONENTEN AM FLUGHAFEN BREMEN	36
ABBILDUNG 19 EINBRINGEN EINES QR-CODES IN DAS DURCHSTRAHLUNGSBILD (VIRTUELL ODER PHYSISCH).	38
ABBILDUNG 20 BERECHNUNG EINES FINGERPRINTS	39
ABBILDUNG 21 PRAKTISCHE ERPROBUNG DES RÖNTGENSIEGELS	40
ABBILDUNG 22 VERPACKUNGSBAND MIT DRAHTFORM	41
ABBILDUNG 23 VERPACKUNGSBAND MIT METALLKÜGELCHEN	42
ABBILDUNG 24 SCHEMATISCHE DARSTELLUNG DER PASSIVEN VARIANTE DES RÖNTGENSENSORS	44
ABBILDUNG 25 MÖGLICHE ANORDNUNGEN VON SZINTILLATORMATERIAL UND FOTOELEMENTEN	45
ABBILDUNG 26 PRINZIPIALKIZZE DER SEMI-PASSIVEN VARIANTE DES RÖNTGEN- UND TAGESLICHTSENSORS	46
ABBILDUNG 27 PRINZIPIALKIZZE DER AKTIVEN VARIANTE DES RÖNTGEN- UND TAGESLICHTSENSORS	47
ABBILDUNG 28 SCHALTPLAN AKTIVE VARIANTE DES RÖNTGEN- UND TAGESLICHTSENSORS	48
ABBILDUNG 29 DAS FUNKTIONSMUSTER DER AKTIVEN VARIANTE DES RÖNTGEN- UND TAGESLICHTSENSORS	49
ABBILDUNG 30 FUNKTIONSMUSTER AUFGESCHRAUBT	49
ABBILDUNG 31 ZWEI DURCHSTRAHLUNGS-AUFNAHMEN DES GLEICHEN PACKSTÜCKES	53
ABBILDUNG 32 SCHEMATISCHE DARSTELLUNG DES ALGORITHMUS	55
ABBILDUNG 33 VERANSCHAULICHUNG VON TRANSLATION UND AFFINER TRANSFORMATION	56
ABBILDUNG 34 BEIDE DURCHSTRAHLUNGS-AUFNAHMEN IM GLEICHEN KOORDINATENSYSTEM	57
ABBILDUNG 35 BEIDE DURCHSTRAHLUNGS-AUFNAHMEN NACH ERFOLGTER AFFINER TRANSFORMATION	58
ABBILDUNG 36 SCHEMATISCHE DARSTELLUNG DER DEFORMATION EINES BILDES	58
ABBILDUNG 37 BEIDE DURCHSTRAHLUNGS-AUFNAHMEN NACH ERFOLGTER B-SPLINE DEFORMATION	59
ABBILDUNG 38 ERGEBNIS DES BILDVERGLEICHS	60
ABBILDUNG 39 DURCHSTRAHLUNGS-AUFNAHMEN EINES PACKSTÜCKES	61
ABBILDUNG 40 RECEIVER OPERATING CHARACTERISTIC (ROC)	62
ABBILDUNG 41 DIE ESECLOG-PROZESSKETTE	63
ABBILDUNG 42 ANALYSE MÖGLICHER FEHLER DER ESECLOG-TECHNOLOGIEN	65
ABBILDUNG 43 DIE MÖGLICHE FEHLERQUELLEN DER ESECLOG-PROZESSKETTE	66
ABBILDUNG 44 DAS PROGRAMM "ESECLOG SCOREMETER"	67

ABBILDUNG 45 STANDARD OPERATING PROCEDURE (SOP)	70
ABBILDUNG 46 DEFORMATIONSKRÄFTE	82

Tabellenverzeichnis

TABELLE 1: PROJEKTPARTNER	8
TABELLE 2 ÜBERSICHT ÜBER DIE AM MARKT ERHÄLTlichen DURCHSTRAHLUNGSSYSTEME	19
TABELLE 3 MATERIALDISKRIMINIERUNG	75
TABELLE 4 STOFFDICHTe UND EFFEKTIVE KERNLADUNGSZAHLEN	75
TABELLE 5 VERWENDETEn FLÜSSIGKEITEN, FESTSTOFFE UND GEFahrSTOFFSIMULANTEN	75
TABELLE 6 VERWENDETE ELEMENTE BEI DER UMSETZUNG DES RÖNTGENSIEGELS.	76

Abkürzungsverzeichnis

ADAS	Airbus DS Airborne Solutions GmbH, Bremen
AP	Arbeitspaket
BAM	Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Berlin
BIBA	Bremer Institut für Produktion und Logistik, Bremen
ECAC	European Civil Aviation Conference
ESecLog	Enhanced Security for Logistics
IFF	Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb und -automatisierung, Magdeburg
FFI	Fracht-Fingerprint-Informationssystem
LBA	Luftfahrtbundesamt, Braunschweig
LSKK	Luftsicherheitskontrollkraft
PAN	Panalpina Welttransport GmbH
RFID	Radio Frequency Identification
VIA	Viaboxx GmbH, Königswinter

I. Kurzdarstellung

Das diesem Abschlussbericht zugrundeliegende Projekt ESecLog (Erweiterte Sicherheit in der Luftfrachtkette – **Enhanced Security for Logistics**) wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 13N12642 für den Zeitraum vom 01.05.2013 bis zum 30.06.2016 gefördert.

Das Projekt wurde gemeinsam durch die nachfolgend in Tabelle 1 genannten Projektpartner bearbeitet:

Tabelle 1 Projektpartner

Entwicklungspartner		
Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb und -automatisierung (IFF)	Sandtorstraße 22 39106 Magdeburg	Projektkoordination RFID-Siegel 3D-Konturscan
Airbus DS Airborne Solutions GmbH (ADAS)	Sebaldsbrücker Heerstr. 235 28309 Bremen	Vorfeld-Tracking
Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM)	Unter den Eichen 87 12205 Berlin	Röntgenmarker/Signatur Röntgen/Tageslichtsensor Röntgenbildauswertung
Bremer Institut für Produktion und Logistik GmbH (BIBA)	Hochschulring 20 28359 Bremen	Prozessanalyse und -konzipierung
Panalpina Welttransport GmbH (PAN)	Reisholzer Werftstr. 52 40589 Düsseldorf	Nutzbarkeit ESecLog-Lösungen
Viaboxx GmbH (VIA)	Hauptstraße 164 53639 Königswinter	Fracht-Fingerprint-Informationssystem
assoziierte Partner		
Lufthansa Cargo AG	Frankfurt Flughafen, 60546 Frankfurt/Main	
Flughafen Bremen GmbH	Flughafenallee 20, 28199 Bremen	
Luftfahrtbundesamt (LBA)	Abteilung Luftsicherheit, 38144 Bremen	
NXP Semiconductors GmbH	Stresemannallee 101, 22529 Hamburg	

Das übergreifende Projektmanagement erfolgte mit Beteiligung aller Entwicklungspartner und unter Koordination des Fraunhofer IFF mit Unterstützung des BIBA.

1. Aufgabenstellung

Das übergreifende Ziel des Projekts ESecLog war die Sicherung von Luftfracht-Prozessketten durch die Entwicklung und den Einsatz von neuartigen Prüfmethode und -technologien. Grundidee des Projektansatzes war es dabei durch die Kombination verschiedener Prüfmerkmale den sog. Fracht-Fingerprint zu generieren, der sich Fracht-individuell entlang der Prozesskette mit einfachen Mitteln überprüfen lässt. Weist der Fracht-Fingerprint am Kontrollpunkt keine Veränderungen gegenüber der vorherigen Kontrollstelle auf, so ist keine weitere Kontrolle notwendig und das Frachtstück gilt weiterhin als ‚sicher‘. Der Fracht-Fingerprint kann somit zur Entlastung der Kontrollprozesse im Bereich der Luftfracht beitragen, da v.a. aufwändige Nachkontrollen (z.B. erneutes Röntgen, Wischprobe zur Spurendetektion, Öffnen des Frachtstücks) vermieden werden können.

Durch die Weiterentwicklung der in der Gesamtvorhabenbeschreibung definierten Aufgabenstellung wurden die übergreifenden Zielstellungen des Projekts in der frühen Projektphase wie folgt präzisiert:

- Entwicklung eines **Fracht-Fingerprints** auf Basis neuer Prüfmerkmale und daraus abgeleitet partnerindividuelle Zielstellungen zur Entwicklung und Umsetzung für Prüfmethode und -technologien für einzelne Prüfmerkmale,
- Entwicklung eines **Informationssystems** zum Abgleich des Frachtfingerprints an verschiedenen Stellen der Luftfrachtkette und daraus abgeleitet partnerindividuelle Zielstellungen zur Konzipierung und Umsetzung von IT-Komponenten, zur IT-Integration der Prüftechnologien, sowie zur Prozess-Integration,
- Integration **neuer Prüfverfahren** in die bestehenden Prozesse der Luftfrachtkette und daraus abgeleitet partnerindividuelle Zielstellungen zur Analyse und Konzipierung von Prozessabläufen.

Die im Projekt entwickelten technischen Lösungen sollten abschließend im Rahmen eines Demonstrators präsentiert werden. Begleitend zur technischen und prozessualen Entwicklung und Erprobung sollten weiterhin Aufgabenstellungen zur Kosten-Nutzen-Analyse, zur Prüfung der Übertragbarkeiten und zur zusammenfassenden Dokumentation der Projektlösungen in Form von Leitfäden bearbeitet werden. Entsprechend wurden im Antrag partnerübergreifend nachfolgende wissenschaftliche und technische Arbeitsziele für das Projekt definiert:

- (1) Definition von Security-Merkmalen zur Versiegelung einer sicheren Fracht (Signatur/Marker für Röntgenbildgebung, RFID-Siegel)
- (2) Definition eines Security-Fracht-Fingerprints und dessen technische Umsetzung
- (3) Definition einer Datenstruktur zum Aufbau eines Fracht-Fingerprint-Informationssystem mit integrierten Abgleich-Funktionen

- (4) Entwicklung einer landseitigen Prüfungsstrategie innerhalb der Logistikkette auf Basis des Security-Fracht-Fingerprints (Sicherheitsüberprüfung Land)
- (5) Entwicklung einer luftseitigen Prüfungsstrategie in der Teil-Prozesskette Warehouse – Vorfeld – Flugzeug (Sicherheitsüberprüfung Luft)
- (6) Konzipierung von Multi-Scannern für den mobilen bzw. stationären Einsatz und Umsetzung im Rahmen von Demonstratoren
- (7) Erstellung eines Leitfadens zur Nutzung des Security-Fracht-Fingerprints in der Luftfracht-Logistik
- (8) Prüfung der Übertragbarkeit der Lösungen auf andere (sicherheitskritische) Logistikbereiche

Zur Bearbeitung der wissenschaftlichen und technischen Arbeitsziele wurde die in Abschnitt I.3. beschriebene Arbeitspaket-Struktur definiert.

Für die BAM wurden in der Teilvorhabenbeschreibung individuelle Aufgabenstellungen definiert, welche sich vor allem auf die technischen Aspekte der Durchstrahlungsprüfung beziehen. Nach einer Analyse der bestehenden Durchstrahlungstechnik, sollten von der BAM neuartige Prüfmethode, bzw. Sicherheitsmerkmale entwickelt werden zur Realisierung eines Frachtsiegels, bzw. einer Sicherheitssignatur für den Bereich Röntgentechnik. Zielstellung war dabei nicht, die bestehende Vor-Ort-Technik zu ersetzen oder zu modifizieren, sondern einen Security-Fingerprint zu entwickeln, welcher die Vor-Ort-Technik nutzt, bzw. welcher unter Verwendung der vorhandenen Technik umgesetzt werden kann. Weiterhin sollte analysiert werden, wo Fehleranfälligkeiten gegeben sind, wo sich vorhandene Technik eventuell verbessern lässt, bzw. wie die Verwendung dieser Technik besser abgesichert werden kann. Anhand einer technischen Validierungsplattform sollte dann untersucht werden, inwieweit die erarbeiteten Lösungen die Sicherheit effektiv verbessern können. Die konzipierten Lösungen sollten dabei den Wirtschaftlichkeitsrahmen nicht außer Acht lassen. Die insgesamt im Projekt entwickelten Lösungen zur Umsetzung der ESecLog-Prozesskette sollten anschließend von der BAM unter dem Aspekt der Sicherheit bewertet werden. Abschließend galt es, die erarbeiteten Lösungen in Leitfäden niederzulegen und eine Übertragbarkeit der Lösungen zu prüfen.

2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Der Bereich Luftfracht stellt wie der gesamte Luftverkehr einen besonders sicherheits-sensiblen Bereich dar. Aufgrund allgemeiner Bedrohungslagen durch terroristische Vereinigungen ist es in den letzten Jahren zu sukzessiven Verschärfungen der Sicherheitsbestimmungen gekommen. Sensibel ist die Luftfracht weiterhin, da ein Großteil der Fracht (ca. 70%) in Passagiermaschinen befördert wird.

Vor Beginn des Projektes stellten sich die Reglementierungen wie folgt dar:

- Die Verordnungen (EG) Nr. 300/208 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 11.03.2008 und (EU) Nr. 185/2010 der Kommission vom 04.03.2010 beinhalten gemeinsame Vorschriften, die festlegen, dass alle Frachtstücke und Postsendungen vor dem Verladen in ein Luftfahrzeug Sicherheitskontrollen zu unterziehen sind. Die sicheren Frachtstücke oder Postsendungen sind ab dem Zeitpunkt der Sicherheitskontrolle bis zum Abheben des Luftfahrzeugs, mit dem sie befördert werden, vor unbefugten Eingriffen zu schützen.
- Ein Luftfahrtunternehmen darf nur dann Frachtstücke oder Postsendungen entgegennehmen, wenn das Unternehmen entsprechende Sicherheitskontrollen selbst durchgeführt hat oder deren Durchführung von einem Reglementierten Beauftragten, einem Bekannten Versender oder einem Geschäftlichen Versender bestätigt und quittiert wurde.
- Die Einbindung von Bekannten Versendern in der Luftfrachtkette nach der oben genannten Verordnung wird vom Luftfahrt-Bundesamt (LBA) seit dem 25.03.2013 zwingend gefordert.

Im Verlauf des Projektes kam es zu weiteren Verschärfungen und Anpassungen der Reglementierungen:

- Seit dem 01.02.2016 ist die neue EU-Verordnung (EU) 2015/1998 in Kraft, welche die alte Verordnung (EU) 185/2010 ersetzt und die zahlreichen zwischenzeitlichen Anpassungen der alten Verordnung im Sinne der Klarheit und Rechtssicherheit konsolidiert.
- Mit dem 01.04.2016 wurde die Möglichkeit ausgesetzt, Luftfracht von Geschäftlichen Versendern in Nur-Fracht-Flugzeugen zu befördern. Somit sind seit diesem Zeitpunkt nur die Beförderung sicherer Fracht von Bekannten Versendern sowie die Beförderung von durch Reglementierte Beauftragte oder das Luftfahrtunternehmen gesicherte Fracht zugelassen.

Vor dem Hintergrund des Versands von Luftfracht durch Bekannte Versender wurde in verschiedenen Experten-Gesprächen über die gesamte Projektlaufzeit wiederholt festgestellt, dass das Sicherheitsprinzip des Bekannten Versenders auf Vertrauen basiert. Im Projekt

ESecLog wurden deshalb Ansätze entwickelt, wie zusätzlich zum quittierten Status einer Sendung als ‚sicher‘ durch den Bekannten Versender auf Basis von einfachen Prüfmerkmalen dieser Status nachweisbar gemacht werden kann.

In Bezug auf die Durchgängigkeit der Prozesskette vom Versender bis zur Verladung in das Flugzeug stellen vor allem zwischenzeitlich aufkommende Verdachtsmomente eine zentrale Problemstellung dar, da sie sehr aufwändige Nachkontrollen der Fracht bedingen (erneutes Röntgen etc.). Vor dieser Ausgangslage stellte die Entwicklung von mit einfachen Mitteln überprüfbarer Sicherheitsmerkmale eine zentrale Zielstellung des Projekts ESecLog dar.

In Bezug auf die Dokumentation der Frachtbewegungen und des Sicherheitsstatus wird die Luftfrachtbranche weiterhin durch stark fragmentierte Informationssysteme und Medienbrüche beim Gefahrenübergang gekennzeichnet. Hierzu bietet das im Projekt entwickelte Fracht-Fingerprint-Informationssystem einen Ansatz Kontrollen und Gefahrenübergänge packstückindividuell über die gesamte Transportkette zu verfolgen.

Kernpunkt des Projektes war also eine Erhöhung der Sicherheit sowohl in technischer Hinsicht als auch auf logistischer Seite. Auf diesem Gebiet hat die BAM aktiv in sicherheitsrelevanten national geförderten Projekten wie AUGÉ („Automatische Gepäckprüfung für die Luftfahrt“), Profit (Quasioptisches Terahertz Radar zur Objektidentifizierung, Teil: Entwicklung der Grundlagen und Realisierung eines Terahertz-Radarsystems) und mPass („Passagierkontrolle mit mm-Wellen“) sowie im europäische PASR Projekt TeraSec („Active Terahertz Imaging for Security“) und SAFEE (Security of Aircraft in the Future European Environment) im 6. europäischen Rahmenprogramm teilgenommen. Die speziellen Beiträge der BAM lagen hier schwerpunktmäßig in der Bildbearbeitung und Softwareentwicklung sowie in der Identifizierung von möglichen Gefahrstoffen und deren Auffindung in Taschen und Gepäckstücken. Ebenso hat die BAM in diesem Kontext zum Projekt FluSs (Flughafen-Sicherungssystem) im Rahmen des nationalen Forschungsprogramms beigetragen. Dabei handelte es sich um die Bewertung von Konzepten zum Sicherheitsmanagement einer gesamten Einrichtung, wobei bestehende Methoden berücksichtigt wurden und keine Neuentwicklungen eingeschlossen waren. Der Bereich Luftfracht wurde hier explizit ausgeschlossen. Das Projekt SefLog („Sichere und effiziente Logistikprozesse“) behandelte die Sicherung von Warenketten. Die BAM übernahm hier die Aufgabe zur Bewertung von Technologien zur Gefahrendetektion in Frachtcontainern.

Es liegt im Aufgabenbereich der BAM, angewandte Methoden zu prüfen und zu bewerten. In dieser Eigenschaft wirkt sie vielfältig an der Erstellung und Pflege internationaler Normen und Richtlinien mit. In der Arbeitsgruppe „Digitale Radiologie und Bildanalyse“ nimmt die Bildbearbeitung einen breiten Raum ein, um zielgerecht die Anzeigen z.B. für Fehler zu erkennen, aber auch versteckte Einzelheiten hervorzuheben.

3. Planung und Ablauf des Vorhabens

Inhaltlich gliederte sich die Projektbearbeitung in sieben Arbeitspakete, die anhand der nachfolgenden Arbeitsschritte und aufeinander aufbauend bearbeitet wurden.

- AP 1: IST-Analyse
- AP 2: SOLL-Konzept
- AP 3: Entwicklung von Optimierungslösungen und Integration
- AP 4: Test und Validierung
- AP 5: Kosten-Nutzen-Analyse
- AP 6: Erstellung eines übergreifenden Konzepts
- AP 7: Erstellung eines Leitfadens Security-Fracht-Fingerprint

Alle Entwicklungspartner waren an allen Arbeitspaketen mit unterschiedlichen Schwerpunkten beteiligt. Entsprechend der im Abschnitt I.1. umrissenen Arbeitsschwerpunkte der BAM wurden in den einzelnen Arbeitspaketen vor allem folgende Themenstellung durch die BAM bearbeitet:

In **AP1** erfolgte eine IST-Analyse der derzeit in der Luftfrachtkette zum Einsatz kommenden Durchstrahlungstechniken. Der Schwerpunkt wurde hier auf eine Untersuchung der für einen möglichen Fracht-Fingerprint relevanten technischen Details gelegt. Der so gewonnene Überblick sollte aufzeigen, welche Möglichkeiten für die Umsetzung eines Frachtsiegels, eines Röntgenmarkers oder einer Sicherheitssignatur im Rahmen bestehender Techniken realisierbar sind, und welche Techniken sich für die verschiedenen Arten eines Siegels eignen.

In **AP2** erfolgte die Erarbeitung eines SOLL-Konzeptes. Aufbauend auf der in AP1 erfolgten Analyse der bestehenden Durchstrahlungstechniken wurden Optimierungsbedarfe bei der Frachtuntersuchung mittels Durchstrahlungsverfahren abgeleitet. Ebenso wurden weitere Möglichkeiten zur Erhöhung der Luftfrachtsicherheit unter Verwendung bestehender Technologien erarbeitet. Gemeinsam mit den Projektpartnern wurde in AP2 ein umfassendes Konzept zu technischen Lösungen für die Markierung und Identifikation von Frachtgut aufgestellt.

In **AP3** wurden konkrete technische Lösungen für das in AP2 aufgestellte Konzept ausgearbeitet. Insbesondere ging es hier um die Umsetzung der in AP2 aufgezeigten Lösungsansätze bei der Durchstrahlung von Luftfracht, sowie bei der Identifizierung in der Bildgebung. In AP3 erfolgte eine ausgiebige Testphase mit Laborversuchen, um Beschaffenheit, Anbringungsort und Empfindlichkeit für die entwickelten Marker bzw. Signaturen zu erarbeiten und die Rahmenbedingungen für einen Vorher-Nachher Vergleich von Durchstrahlungsaufnahmen abzustecken. Das Ergebnis dieses Arbeitspaketes war eine Optimierungslösung im Bereich der Durchstrahlungstechnik als Beitrag zum Security-Fracht-Fingerprint.

Im **AP4** wurde eine qualitative und quantitative Untersuchung der Wirksamkeit und Anwendungsfähigkeit der erarbeiteten Lösungen durchgeführt. Ziel war es, eine Validierungsplattform zu entwerfen, um den Beitrag der im vorangegangenen Arbeitspaket erarbeiteten Lösungen zum technischen Konzept zu untersuchen. Die Frage, welchen Beitrag zur Erhöhung der Luftfrachtsicherheit der Einsatz der entwickelten röntgenbildgebenden Marker und Frachtsiegel leisten kann, stand dabei im Mittelpunkt.

In **AP5** wurde die wirtschaftliche Wirksamkeit der in den vorangegangenen Arbeitspaketen ausgearbeiteten Lösungen durch eine Kosten-Nutzen Analyse überprüft. Der Beitrag der BAM konzentrierte sich hierbei auf die Bewertung der entwickelten Sicherheitstechnologien. Diese Sicherheitsbewertung floss in das zusammen mit den Partnern entwickelte Modell zur Wirtschaftlichkeitsbetrachtung des entwickelten Konzeptes mit ein.

Im **AP6** leistete die BAM Beiträge zur Übertragbarkeit der Projektergebnisse und Erkenntnisse auf Luftfrachtdienstleister außerhalb des Projektkonsortiums, sowie mögliche Ansätze zur Standardisierung. Es wurden Anforderungen adressiert und Handlungsempfehlungen formuliert.

In **AP7** wurden Leitfäden für die Nutzung des im Projekt entwickelten Security-Fracht-Fingerprints für die Luftfracht-Logistik erarbeitet. Wobei die BAM hier speziell für den Technischen Bereich und deren Reglementierungen, und wie diese in die Handlungsempfehlungen mit einfließen können, verantwortlich zeichnete. Es wurde geprüft, welche Techniken für den Security-Fracht Fingerprint zusätzlich in der Luftfracht-Logistik in Frage kommen.

Der zeitliche Ablauf des Projekts im Rahmen der ursprünglich geplanten Projektlaufzeit vom 01.05.2013 bis 30.04.2016 wird in Abbildung 1 dargestellt. Dabei wurden zwei Meilensteine definiert, die sich inhaltlich wie folgt untergliedern:

- **Meilenstein 1** (Projektmonat 20)
Abschluss der Arbeiten am AP 3 mit Vorliegen der Entwicklungen und Lösungen in Form von Pre-Check-Demonstratoren zum Nachweis der prinzipiellen technischen Eignung. Zusätzlich sollte die Grundakzeptanz der Lösungsansätze und Lösungen auf Seiten der Anwender bestehen.
- **Meilenstein 2** (Projektmonat 36)
Projektabschluss mit Abschlussdemonstration und Abschlusspräsentation. Zum Meilenstein Abschluss aller Arbeitspakete.

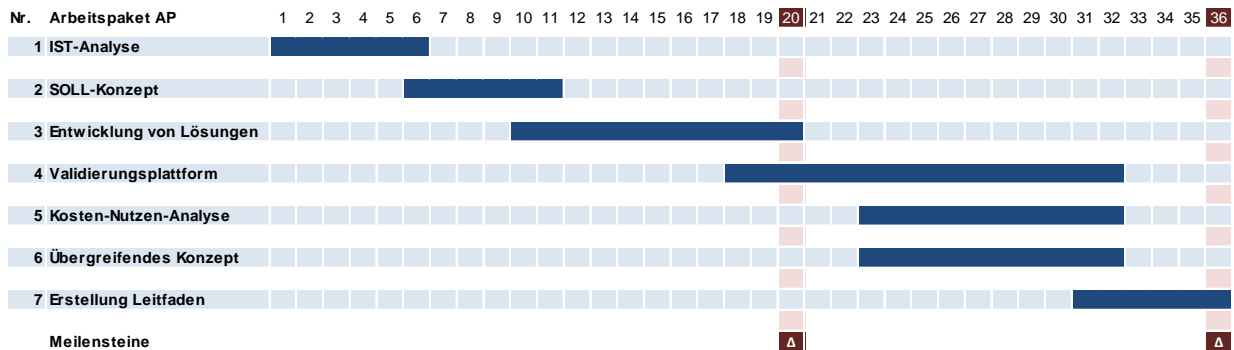


Abbildung 1 Ursprüngliche Planung Balkenplan und Meilensteine

Im Projektverlauf musste durch das ESecLog-Konsortium festgestellt werden, dass sich zur Bearbeitung der geplanten Projektinhalte eine zeitliche Verzögerung des Projektabschlusses von ca. zwei Monaten ergab. Die Ursachen hierfür wurden in den Zwischenberichten und Anträgen zur Verschiebung des ersten Meilensteins und zur kostenneutralen Projektverlängerung dargelegt.

Die beantragte Verschiebung des ersten Meilensteins sowie die beantragte Projektverlängerung wurden jeweils durch das BMBF und den VDI genehmigt, so dass es zu den nachfolgend in Abb. 2 dargestellten zeitlichen Anpassungen im Projektverlauf kam:

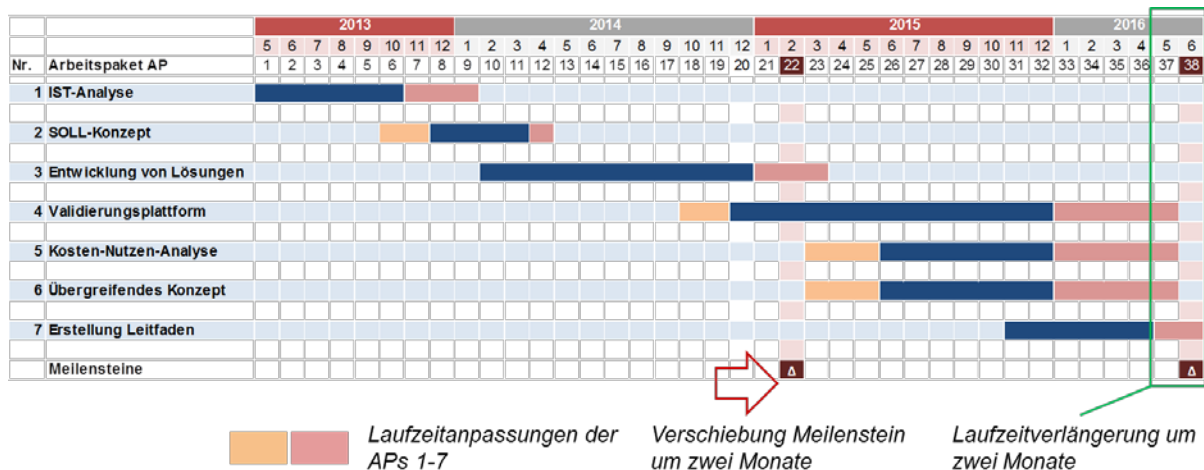


Abbildung 2 Balkenplananpassung inkl. Verzögerungen im Projektablauf und Projektverlängerung

Entsprechend kam es auch zu einer zeitlichen Verschiebung der zuvor definierten Meilensteine:

- Meilenstein 1 → Projektmonat 22

- Meilensteintreffen am 05.03.2015
- Meilenstein 2 → Projektmonat 38
 - Abschlussdemonstration am 29.06.2016
 - Abschlusspräsentation am 30.06.2016

Inhaltlich konnten die Projektziele im in Abschnitt II.1. beschriebenen Rahmen erfolgreich umgesetzt werden.

4. Wissenschaftlicher und technischer Stand an den angeknüpft wurde

Die BAM beschäftigt sich seit Jahrzehnten mit Verfahren zur Durchstrahlungsprüfung mittels Röntgenstrahlung. Auf dem Gebiet der Durchstrahlungstechniken für die zerstörungsfreie Prüfung auf technischen Gebieten trug die BAM wesentlich zur Entwicklung und Einführung der digitalen Radiographie bei. Bei der Bewertung der Durchstrahlungstechniken arbeitet die BAM in den entsprechenden Normungsgremien, wie DIN, CEN, ISO und ASTM mit. Dabei ist die BAM sowohl bei der Entwicklung als auch der Bewertung von Bildgüteprüfkörpern für die zerstörungsfreie Prüfung, als auch in der Sicherheitsbewertung von Mensch und Technik aktiv. Speziell im Security-Bereich war die BAM bereits an mehreren, auch vom BMBF geförderten Forschungsprojekten beteiligt. Beispielhaft seien hier das Projekte ACCIS genannt. Hier wurde der kombinierte Einsatz von Neutronen- und Gammastrahlen zur Inspektion von Luftfrachtcontainern zur Identifikation von Materialien untersucht. Weitere Projekte wurden bereits in Abschnitt I.2 genannt.

Für die Bildbearbeitung kann die BAM auf eine hauseigene Standardsoftware zurückgreifen, die auch für die Bildqualitätsbewertung herangezogen wird. Im Hause entwickelte Verfahren sind speziell für die Bildbearbeitung mit eingeflossen. Ebenfalls existieren hier auch Ansätze zum Bildvergleich, die in diesem Projekt von Nutzen waren. Grenzen der Erkennbarkeit von Einzelheiten sind hier ein wichtiges Thema in der Weiterentwicklung von Bildverarbeitungsverfahren.

Da die BAM auf den genannten Gebiet über eine langjährige Expertise verfügt, fielen im Rahmen dieses Projektes keine besonderen Literaturrecherchen an. Die verwendete Literatur ist an dem entsprechenden Stellen zitiert.

Zusätzlich wurden bei Vor-Ort Terminen am Flughafen Frankfurt (mit dem assoziierten Partner Lufthansa Cargo AG) und am Flughafen Bremen (mit dem assoziierten Partner Flughafen Bremen GmbH) Probleme im praktischen Einsatz der Durchstrahlung von Luftfracht erörtert und mögliche Lösungsmöglichkeiten diskutiert. Direkte Gespräche mit den, die Durchstrahlungsprüfung durchführenden Luftsicherheitskontrollkräften (LSKK) eröffneten weitere Möglichkeiten zum Auffinden von Optimierungsbedarfen und Problemstellungen.

5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Im Rahmen des Projektverlaufs erfolgten eine Zusammenarbeit und der Erfahrungsaustausch mit anderen Stellen. Die im Rahmen dieser Kollaborationen zur Verfügung gestellten Informationen waren gleichermaßen für alle Entwicklungspartner des Projektes nutzbar.

Die Zusammenarbeit im Projektverlauf umfasste:

- Kollaboration mit assoziierten Partnern

Flughafen Bremen GmbH – Der Flughafen Bremen konnte im laufenden Projekt als assoziierter Partner gewonnen werden (Ende 2014). Neben der Rolle als Anwender, der das ESecLog-Konzept und die entwickelten technischen Lösungen kritisch bewertet hat, stellte der Flughafen den Projektpartnern v.a. Teile der eigenen Infrastruktur im Luftfrachtbereich zur Erprobung und Demonstration der entwickelten ESecLog-Lösungen zur Verfügung.

Lufthansa Cargo AG – Die Lufthansa Cargo AG konnte direkt nach Projektstart als assoziierter Partner gewonnen werden. Im Rahmen von zwei Terminen am Flughafen Frankfurt konnte das Projektkonsortium umfangreiche Prozessaufnahmen durchführen und die Lösungsansätze des Projekts mit dem Bereich Aviation Security diskutieren.

Luftfahrtbundesamt – Das LBA wurde im laufenden Projekt als assoziierter Partner gewonnen (Mitte 2014) und fortlaufend über die Projektarbeiten informiert. Im Rahmen der Verwertung der Projektergebnisse stellt das LBA einen zentralen Partner dar, um zu evaluieren, wie die Reglementierungen zur Luftfrachtprüfung für neuartige Lösungsansätze angepasst werden müssen und können.

NXP Semiconductors GmbH – NXP stand mit Einreichung der Projektskizze als assoziierter Partner zur Verfügung und konnte insbesondere zur Weiterentwicklung der technischen Teillösung RFID-Siegel im Projektverlauf beitragen.

- Kollaboration mit weiteren branchenbezogenen Stellen Luftfracht

Flughafen Düsseldorf GmbH – Im Rahmen eines Arbeitstreffens konnten die Prozesse im Luftfrachtbereich des Flughafens analysiert und die Lösungsansätze des Projekts diskutiert werden.

P+B Team Air Cargo Service GmbH – Als reglementierter Beauftragter, der regelmäßig mit dem Projektpartner Panalpina zusammen arbeitet, konnten bei P+B die Prozesse zum Fracht-Handling und zur Sicherung der Fracht analysiert werden.

Henry Lamotte Oils GmbH – Als Bekannter Versender konnte die Firma wichtige Impulse bei der Ausgestaltung des Soll-Konzepts geben.

- Kollaboration mit weiteren Projekten der Bekanntmachung ‚Sicherheit im Luftverkehr‘

CairGoLution – Im Rahmen eines aktiven Austauschs zu den Projekthaltungen konnten gemeinschaftlich zahlreiche Anknüpfungspunkte zwischen den Projekten identifiziert werden. Diese wurden dem VDI in Form eines Kurzprotokolls durch das Fraunhofer IFF übermittelt.

SiLuFra – Durch die gleichzeitige Beteiligung des Projektpartners BAM und des assoziierten Partners Lufthansa Cargo an den Projekten ESecLog und SiLuFra konnte ein fortlaufender inhaltlicher Austausch zwischen den Projekten stattfinden.

II. Eingehende Darstellung

1. Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse im Einzelnen mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

Die übergreifenden Ziele des Projekts ESecLog und die daraus abgeleitete Gliederung der Arbeitspakete wurden im Abschnitt I.1. beschrieben. Entsprechend wurde das Vorhaben in die Arbeitspakete und Meilensteine, wie sie in Abschnitt 1.3 beschrieben sind, gegliedert. Die eingehende Darstellung orientiert sich der besseren Lesbarkeit halber an den Entwicklungsschwerpunkten der BAM im Projekt. Im folgenden wird jeweils auf die entsprechenden Arbeitspakete verwiesen.

1.1 IST-Analyse der derzeit eingesetzten Durchstrahlungstechnik, Ableitung von Optimierungsbedarfen im Hinblick auf die Projektziele und Erstellung eines SOLL-Konzeptes

Die zentrale Aufgabe in den Arbeitspaketen 1 und 2 bestand in der Analyse der derzeit in der Luftfracht eingesetzten Durchstrahlungstechniken, und darauf aufbauend auf der Frage, an welchen Stellen Notwendigkeiten und Bedarfe zur Verbesserung oder Erweiterung der eingesetzten Technik bestehen, um die im Projekt gesteckten Ziele umsetzen zu können.

In AP1 erfolgte eine Recherche über die weltweiten Hersteller von Techniken zur Durchstrahlung von Luftfracht und deren Angeboten an entsprechenden Produkten. Bei Vorort-Besichtigungen von Luftfrachttransportunternehmen ergab sich auch die Chance die eingesetzten Technologien zur Durchstrahlung im praktischen Einsatz zu evaluieren. Am Flughafen Bremen, sowie bei dem vom Projektpartner Panalpina beauftragten Unternehmen sind Geräte der Firma *Smiths Detection* und *Rapiscan* im Einsatz. Am Flughafen Frankfurt hat Panalpina Durchstrahlungsgeräte der Firma *Rapiscan* im Einsatz. Lufthansa Cargo arbeitet wiederum mit Geräten von *Smiths Detection*. Obgleich mehrere Anbieter auf dem internationalen Markt vertreten sind, werden in deutschen Luftfrachtunternehmen am häufigsten Geräte der beiden oben aufgeführten Firmen eingesetzt. Die hier am häufigsten

Tabelle 2 Übersicht über die am Markt erhältlichen Durchstrahlungssysteme

Hersteller	Referenz	Typ	Tunnel- groesse in m	Energie (kV)	Durch- dringung (mm Stahl)	Technik	Anwendung
Smith Detection	http://www.smithsdetection.com/de/produkte-loesung/en/roentgenpruefung	HI-SCAN 180180-2is	1.8x1.8	300	60	dual view, dual energy	parcels, pallets, LD-3 air freight containers
Rapiscan	http://www.rapiscansystems.com/en/products	Rapiscan 638XR	1.8x1.8	200	50	dual view, dual energy	parcels, pallets, LD-3 air freight containers
Nuctech	http://www.nuctech.com/templates/T_ThreeProduct_EN/index.aspx?nodeid=169	CX150180SI	1.55x1.81	~200	50	single view, dual energy	parcels, pallets
Adani	http://security.adanisystems.com/en/catalog/freight_and_cargo_inspection_systems	BV 160165	1.62x1.65	200	~60	single view, dual energy	parcels, pallets
L3 Security & Detection Systems	http://www.sds-l3.com/products/cargoscreeen.htm	CX-Pallet	>2x2	>500	~200	dual view, dual energy	parcels, pallets, air freight containers
Eidetics Corporation	http://www.eideticscorp.com/THScan/palletized_cargo_inspection.htm	TH Scan: PB 2024	>2x2	>500	~200	dual view, dual energy	parcels, pallets, air freight containers
Safran Morpho	http://www.morpho.com/detection/voirtous-es-produits/x-ray/?lang=en	HRX 180TM	1.8x1.8	~300	variabel	dual view, dual energy	parcels, pallets, air freight containers
AS&E	http://www.as-e.com/productsolutions/markets/air-car-go	GEMINI® 100100	1.0x1.0	~200	34	dual view, dual energy	large parcels, breakbulk cargo

einsetzten Anlage ist die HI-SCAN 180180-2is von *Smiths Detection* mit einer Tunnelgröße von 1.80m x1.80m (siehe Abbildung 3). Die vergleichbare Anlage von *Rapiscan*, *Rapiscan 638XR* (siehe Abbildung 4), unterscheidet sich nur in der eingesetzten Röntgenröhrenspannung (lt. Herstellerangabe) von der *Smiths Detection* Anlage. Tabelle 2 zeigt eine Zusammenstellung von vergleichbaren auf dem Markt vorhandenen Röntgenprüfsystemen für die Luftfrachtkontrolle. Verglichen werden hier speziell Röntgensysteme, die eine Tunnelgröße von 1.00m x 1.00m bis 2.00m x 2.00m haben und mit denen noch große Luftfrachtpaletten und Luftfrachtcontainer (LD-3) untersucht werden können. Weiterhin werden die eingesetzten Energien der Röntgenquellen, die Durchdringung, die Technik und die Einsatzmöglichkeiten in der Tabelle berücksichtigt. Zwar bieten alle aufgelisteten Herstellerfirmen bieten in ihrer Produktpalette auch individuelle Systeme in Bezug auf die Größe der zu untersuchenden Fracht an. So sind Röntgengeräte vorhanden, welche nur für kleine Pakete oder Packstücke ausgelegt sind (variabel in der Tunnelgröße und Durchstrahlungsenergie). Jedoch hat sich, unter anderem durch die Vorort-Besichtigungen und die dort geknüpften Kontakte, herausgestellt, dass die angebotenen Geräte mit größerer Tunnelgröße bevorzugt eingesetzt werden, da mit diesen alle Frachtgrößen bis hin zum Luftfrachtcontainer durchstrahlt werden können, und somit die Anschaffungskosten geringer sind als bei zwei oder drei Geräten, die nur Fracht einer bestimmte Größe durchstrahlen können. Fast alle aufgelisteten Durchstrahlungsanlagen nutzen sowohl die Dual View als auch die Dual Energy Technologie. Mit Dual View ist die Durchstrahlung aus zwei verschiedenen Richtungen gemeint, zum einen horizontal von der Seite, zum anderen vertikal von oben. Dadurch ergibt sich eine bessere Interpretierbarkeit der Durchstrahlungsaufnahmen für die Luftsicherheitskontrollkraft, aber auch Probleme mit der Durchdringungsfähigkeit werden so abgemildert, da es mit einer orthogonalen Ansicht möglich ist, hinter schwer zu durchdringende Bestandteile der Fracht, wie beispielsweise metallene Maschinenbauteile, zu schauen. Dual-Energy bedeutet die Durchstrahlung der Fracht mit zwei verschiedenen Röntgenenergien. Da die Schwächung der Röntgenstrahlung nicht nur von der Materialdicke und Materialdichte abhängig ist, sondern auch von der effektiven Kernladungszahl Z_{eff} und der Energie der Röntgenstrahlung, ist es dadurch möglich bestimmte Materialien zu erkennen. So lassen sich beispielsweise organische und nicht-organische Materialien unterscheiden. Organisches Material wird im Dual Energy Bild meist orange, anorganisches Material grün, blau bzw. lila dargestellt.

Insgesamt lässt sich feststellen, dass für die Frachtprüfung eine große Anzahl von Möglichkeiten und vorhandenen Geräten auf dem weltweiten Markt zur Verfügung steht. Viele der in der Tabelle aufgelisteten Durchstrahlungsgeräte für die Luftfracht werden in den USA zur Kontrolle von Luftfracht eingesetzt. Für die Zulassung in den USA ist die zuständige Behörde die TSA (Transportation Security Administration). Für den Einsatz in Deutschland gibt es Richtlinien und Anforderungen für die Zulassung durch das Luftfahrtbundesamt (LBA). Ein entscheidendes Kriterium für die Aufstellung und Nutzung von Röntgensystemen für die Frachtprüfung sind die in Deutschland zu berücksichtigenden Strahlenschutzbestimmungen für Geräte, welche eine Durchstrahlungsenergie von > 500 keV nutzen unterliegen in



Abbildung 3 Smith Detection HI-SCAN180180-2is



Abbildung 4 Rapiscan Systems: Rapiscan 638XR

Deutschland strengeren Schutzmaßnahmen als die im Niederenergetischen Bereich von 200 bis 300 keV. Bei allen aufgezeigten Durchstrahlungsanlagen sind die Abschirmungen aber mit eingebaut. Da der BAM weder die Zulassungskriterien des LBA in Deutschland noch der TSA

in den USA bekannt sind, kann dies nicht in die Auswertung der Tabelle und der einzelnen Technologien mit einfließen, obwohl dies nützliche Informationen nicht nur für die Herstellerseite wären. Ebenfalls sind Informationen zu den Anschaffungskosten der verschiedenen Geräte sowie eine Bewertung der Fehlalarmraten vertrauliche Informationen der Herstellerseite, so dass die BAM hier keine Auskünfte darüber geben kann.

Nach dem erfolgreich abgeschlossenen Arbeitspaket 1, der IST Analyse der existierenden und vor Ort eingesetzten Durchstrahlungstechnik, wurden in Arbeitspaket 2, die ermittelten Bedarfe und Problematiken abgeleitet, konkretisiert und ein SOLL Konzept für die ESecLog-Logistikkette und den Security-Frachtfingerprint aufgestellt. Als Problematik der bestehenden Technik zeigte sich einerseits die mangelnde Durchdringungsfähigkeit, welche sich jedoch durch den Einsatz von Röntgenstrahlung mit höherer Energie steigern lässt. Dies wird vom Markt auch bereits umgesetzt. Bemerkenswert sind hier die beiden Luftfrachtdurchstrahlungsanlagen der Firmen L3 und Eidetics. Sowohl die Anlage von L3: CX-Pallet als auch die von Eidetics: TH Scan PB2024 haben eine Tunnelgröße von > 2m x 2m, die bei beiden variabel eingestellt werden kann und beide nutzen eine Durchstrahlungsenergie von > 500 keV. Durch die Anwendung von Hochenergierradiographie resultiert hier eine größere Durchdringungsfähigkeit von bis zu 200mm Stahl. Daraus resultieren weniger Dunkelalarme, da auch dichtgepackte Paletten und Container mit schwerem Packgut durchdrungen werden können.

Ein weiterer Bedarf ergab sich aus dem technischen Vergleich der Durchstrahlungsanlagen untereinander. Zur Ermittlung geeigneter Parameter für eine in den folgenden Arbeitspaketen zu entwickelnde Röntgensignatur, bzw. einen Security-Frachtfingerprint war es notwendig, die Fähigkeiten der einzelnen Durchstrahlungsanlagen hinsichtlich der – beispielsweise von der Position innerhalb der Anlage abhängigen – technischen Parameter wie Auflösung, Durchdringungsfähigkeit und Materialerkennung zu evaluieren. Es zeigte sich, dass der vorhandene Testkörper, welcher zur vorgeschriebenen Prüfung der Durchstrahlungsanlagen verwendet wird, zum einen für die Anwendung in kleineren Gepäckprüfanlagen optimiert ist, und zum anderen hauptsächlich der Sicherstellung einer ordnungsgemäßen Funktionsweise der zu untersuchenden Durchstrahlungsanlage dient. Dies stellte sich als ein entscheidender Mangel bei den durchgeführten Vor-Ort-Besichtigungen verschiedener Luftfracht-Transportunternehmen heraus. Hier sieht die BAM einen deutlichen Handlungsbedarf für einen speziell auf Frachtprüfanlagen hin entwickelten Testkörper, welcher es erlaubt, nicht nur die ordnungsgemäße Funktion der Prüfanlage zu gewährleisten, sondern auch die Unterschiede der verschiedenen Durchstrahlungsanlagen besser zu diskriminieren.

Ebenso erfolgt derzeit kein unabhängiger Nachweis der Röntgens einer Fracht mit der Möglichkeit einer späteren Verifikation und einer, zu einem späteren Zeitpunkt erfolgenden, erneuten Auswertung der Durchstrahlungsaufnahme. Das erfolgte Röntgen einer Fracht wird bisher lediglich durch die LSKK auf dem Begleitschein bestätigt. Ein fälschungssicherer Nachweis des Röntgens, sowie eine von der LSKK unabhängige erneute Begutachtung der Durchstrahlungsaufnahme sind nicht vorgesehen. Die Durchstrahlungsaufnahmen werden zwar innerhalb des Gerätes für eine gewisse Zeit gespeichert, sind jedoch nicht von extern zugänglich.

Durch das Röntgen einer Fracht können derzeit zwar potentiell gefährliche Bestandteile innerhalb der Fracht aufgespürt werden, jedoch existiert derzeit keine Möglichkeit, die Manipulation einer Fracht von außen, also das unerlaubte nachträgliche Einbringen von gefährlichen Gegenständen in die Fracht, im Durchstrahlungsbild zu erkennen, bzw. nachzuweisen. Die Auswertung der Durchstrahlungsaufnahme ist stark von der persönlichen Erfahrung der LSKK abhängig. Zwar bieten die Geräte einige Optionen zur Bildmanipulation, bzw. zur unterstützenden Bildauswertung (beispielsweise Kontrastanpassung), jedoch ist die Erkennung einer Gefahrensituation der LSKK überlassen. Eine weitergehende automatisierte Unterstützung der LSKK bei der Bildauswertung wäre hier wünschenswert. Insbesondere bei einem erneuten Röntgen einer zwischenzeitlich manipulierten Fracht, zeigte sich bei den Vorort-Versuchen die Schwierigkeit für einen menschlichen Bildauswerter, durchgeführte Manipulationen zu erkennen.

Als entscheidende Punkte für die weitere Projektentwicklung und die Umsetzung eines Security-Frachtfingerprints wurden damit im erfolgreich abgeschlossenen Arbeitspaket 2 identifiziert:

1. Ein tatsächlicher, von der ausführenden LSKK unabhängiger Nachweis des erfolgten Röntgens.
2. Entwicklung einer Röntgensignatur, bzw. eines Röntgenmarkers zum Nachweis der Manipulation einer Fracht.
3. Die Entwicklung eines Testkörpers, welcher speziell für Frachtprüfanlagen ausgelegt ist, und der sowohl eine Diskriminierung der technischen Fähigkeiten für unterschiedliche Durchstrahlungsanlagen als auch eine bessere Materialerkennung erlaubt.
4. Eine Software, welche weitgehend automatisiert bei einer unsicher gewordenen Fracht, welche erneut sicher gemacht werden muss, den Abgleich zweier Durchstrahlungsaufnahmen durchführt und so die auswertende Luftsicherheits-Kontrollkraft (LSKK) unterstützt.
5. Einbindung der aufgeführten Lösungen in die ESecLog-Prozesskette, also soweit möglich eine Anbindung an das im Projekt entwickelte Fracht-Fingerprint-Informationssystem (FFI).

Diese im SOLL-Konzept aufgestellten Anforderungen wurden in den folgenden Arbeitspaketen 3 und 4 präzisiert, und die entsprechenden technischen Lösungen entwickelt und getestet. Die einzelnen Lösungen werden im Folgenden vorgestellt.

1.2 Entwicklung eines Testkörpers für die Frachtprüfung

Als entscheidender Mangel bei den bereits erwähnten Vor-Ort-Besichtigungen und der Evaluierung der dort eingesetzten Durchstrahlungsanlagen, stellte sich das Fehlen eines geeigneten und speziell für große Frachtscanner optimierten Testkörpers heraus. Die derzeit für die Zulassung und Überprüfung benutzten Testkörper, wie das ECAC-Standard-Testpiece (STP), das Combine-Test-Piece (CTP) und das ASTM F792 Standard Test Piece (1)(2) sind für die Gepäckprüfung und Klein-Paketprüfung entwickelt worden, werden aber für alle Durchstrahlungsanlagen genutzt. Ebenso sind die existierenden Testkörper für Durchstrahlungsanlagen mit einer Energie <300kV ausgelegt. Sowohl für die Bewertung der unterschiedlichen Röntgenscanner im Hinblick auf den zu entwickelnden Security-Fracht-Fingerprint als auch ausblickend auf AP 6, der Identifikation von Standardisierungsansätzen, hat die BAM hier einen signifikanten Bedarf für die Konstruktion eines neuen Testkörpers für die Leistungsfähigkeits- und Zuverlässigkeitsprüfung von Röntgenanlagen in der Luftfrachtprüfung identifiziert. Im Projekt SiLuFra, an welchem die BAM ebenfalls beteiligt ist, wurde dieser Bedarf, speziell im Hinblick auf die Hochenergie-Durchstrahlung, gleichfalls eruiert, so dass die Entwicklung des Testkörpers hier unter zwei Zielsetzungen vorangetrieben wurde.

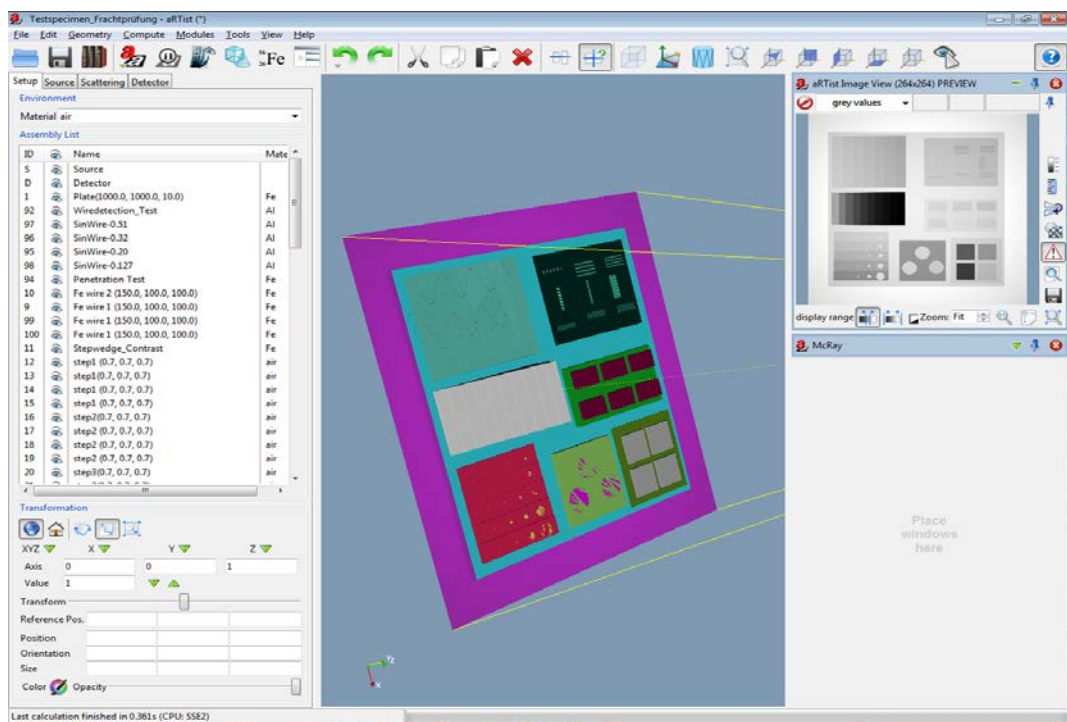


Abbildung 5 Modellierung der radiographische Untersuchungen des Testkörpers mit der Simulationssoftware aRTist.

Der neue Testkörper soll sowohl eine bessere Unterscheidung der tatsächlichen Fähigkeiten von Durchstrahlungsanlagen ermöglichen (beispielsweise der Auflösung) als auch eine bessere Festlegung der möglichen Materialdiskriminierung eines Gerätes (beispielsweise zwischen Metall und hochdichtem Metall), ebenso wie erweiterte Fähigkeiten zur Bestimmung der Erkennbarkeit von Gefahrstoffen (Explosives). Darüber hinaus soll der neue Testkörper nicht nur für konventionelle Roentgen-Scan-Geräte, sondern auch für Systeme im Energiebereich 200kV bis 3MeV anwendbar sein. Hier wurden in Zusammenarbeit mit dem LBA und dem ASTM-Security-Ausschuss die Grundlagen für den neuen Testkörper abgestimmt

In einem ersten Schritt zur Entwicklung des neuen Testkörpers wurde ein vorläufiger Entwurf mit der an der BAM entwickelten Simulations- und Modellierungssoftware „aRTist (analytical Radiographic Testing Simulation tool)“ getestet, um eine Optimierung von Material-Parametern (z.B. Dicke, Durchmesser, Materialtyp) zu erzielen. Ebenso wurde mit Hilfe der BAM-aRTist Software die Dual-Energie Bildgebung simuliert. Die Modellierung der radiographische Untersuchungen von Testkörpern ist in der Abbildung 5 dargestellt. Der modellierte Testkörper besteht aus verschiedenen leichten Materialien (niedrige Z-Werte, PTFE, PA, PVC) und Schwermetallen (hohe Z-Zahlen, Eisen, Kupfer, Wolfram, Blei) in der Form von Zylindern und Platten (siehe Abbildung 6). Die simulierten Durchstrahlungsbilder aufgenommen mit zwei unterschiedlichen Energien (3MeV und 6MeV) und das daraus resultierende Dual-Energie Bild sind in Abbildung 6 und Abbildung 7 gezeigt. Der Farbkontrastunterschied zwischen den organischen Materialien ist hier niedrig, weil ihre Dichten annähernd ähnlich sind.

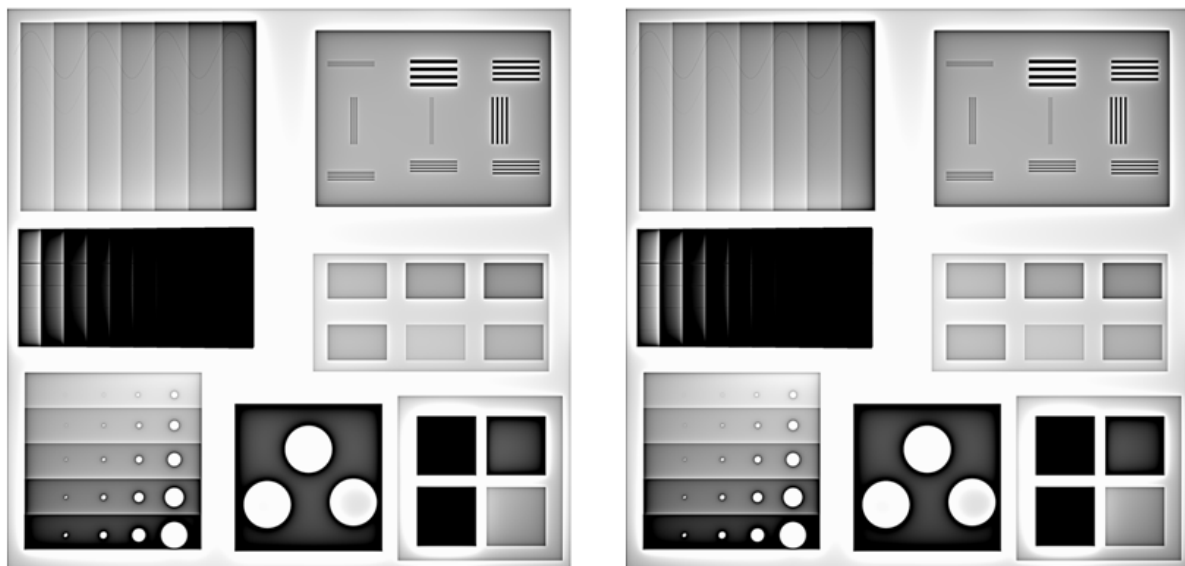


Abbildung 6 Ergebnis eines Simulationsversuches des Testkörpers. Die Bilder zeigen simulierte Durchstrahlungsaufnahmen mit zwei verschiedenen Röntgenenergien (3 MeV und 6 MeV).

Die Qualität der Dual-Energy-Bilder wurde durch die Wahl eines Vorfilters mit optimaler Dicke verbessert, der den Weichanteil der Bremsstrahlung reduziert. Als weitere Aufgabe stellte sich

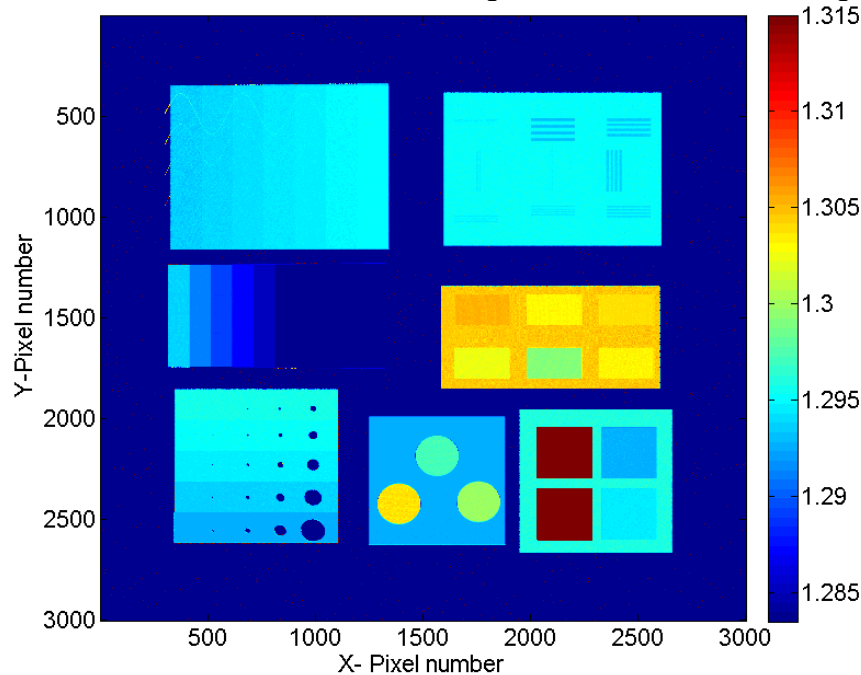


Abbildung 7 Dual-Energy-Bild, welches sich aus den beiden Durchstrahlungsaufnahmen in Abbildung 6 ergibt. Farbgebung für Materialien: blau für Metalle, gelb für leichte organische Materialien und rot für hochdichte Materialien.

hier für die BAM die Implementierung einer analytischen Lösung zur Verbesserung der Dual-Energy Bildgebung bei hohen Energien. Aufgrund der großen durchstrahlten Längen bei der Untersuchung von Luftfrachtcontainern muss hier der Einfluss der Streustrahlung ebenso berücksichtigt werden, wie die Abhängigkeit des effektiven Schwächungskoeffizienten von der Materialdicke. Das analytische Verfahren wurde in MATLAB implementiert und es wurde das Verhältnis zwischen dem effektiven Schwächungskoeffizienten (μ_{eff}) und der effektiven Kernladungszahl (Z_{eff}) bei höheren Energien analysiert. Der Einfluss der Streustrahlung wurde mit der an der BAM entwickelten Simulationssoftware McRay untersucht, für experimentelle Vergleichsmessungen kam der Matrixdetektor PEXRD1622 (Szintillatormaterial $\text{Gd}_2\text{O}_2\text{S}$, Pixelgröße $200\mu\text{m}$, aktive Fläche $40.96 \times 40.96\text{cm}^2$) zum Einsatz. Der Einfluss der Streustrahlung beträgt ca. 5 Prozent. Detaillierte Ergebnisse dieser Untersuchungen sind in (3) präsentiert worden und fanden Anwendung in der Entwicklung des neuen Testkörpers.

Der projektfinale Aufbau des Testkörpers (siehe Abbildung 8) ist aus den Methoden, welche in der zerstörungsfreien Prüfung für die Bewertung von Durchstrahlungstechniken herangezogen werden abgeleitet. Seine einzelnen Komponenten werden im Folgenden beschrieben. Für den detaillierten Aufbau wurden im Verlauf des AP1 eruierten Anforderungen und Bedarfe aus Anwendersicht ebenso berücksichtigt, wie Notwendigkeiten für die Erkennbarkeit von Strukturen, die Positionierung in Bezug auf die Zugänglichkeit und Hintergründe und die Materialdiskriminierung, welche sich für die Entwicklung des Security-Frachtfingerprints

ergeben haben. Zur besseren Bestimmung der Unterscheidbarkeit organischer Materialien und der Erkennbarkeit von Gefahrstoffen enthält das neue BAM-Testpiece nicht nur das übliche Salz und Zucker zum Test der Materialdiskriminierung, sondern auch Gefahrstoff-Simulanten sowie Cyclohexan (C_6H_{12}), Ammoniumnitrat (NH_4NO_3) und Glycerin ($C_3H_8O_3$). Der Testkörper ist so entworfen, dass eine visuelle Auswertung anhand des angezeigten Durchstrahlungsbildes vor Ort möglich ist. Für eine detailliertere Auswertung muss das Durchstrahlungsbild mit einer für solche Zwecke entworfenen professionellen Software ausgewertet werden.



Abbildung 8 Praktische Erprobung des Testkörpers am Flughafen Bremen. Die Beschreibung der einzelnen Elemente ist im folgenden Text gegeben.

1.2.1 Drahterkennungstest

Dieser Einzeltest des Testkörpers besteht aus einem Al-Stufenkeil und darunter gelegten sinusförmigen Kupferdrähten mit verschiedenen Durchmessern. Die Dicke der einzelnen Stufen des Al-Stufenkeils ist in Abbildung 9 dargestellt. Mit diesem Test wird die Kontrastempfindlichkeit eines Röntgengeräts durch die Bewertung der Erkennbarkeit des kleinsten Kupferdrahtes berücksichtigt. Der kleinste Durchmesser des Kupferdrahtes (AWG

36: 0.127mm) ist ähnlich wie im ASTM F792 Testkörper. Zusätzlich ist hier die ausgewählte maximale Dicke des Stufenkeils 12 mm.

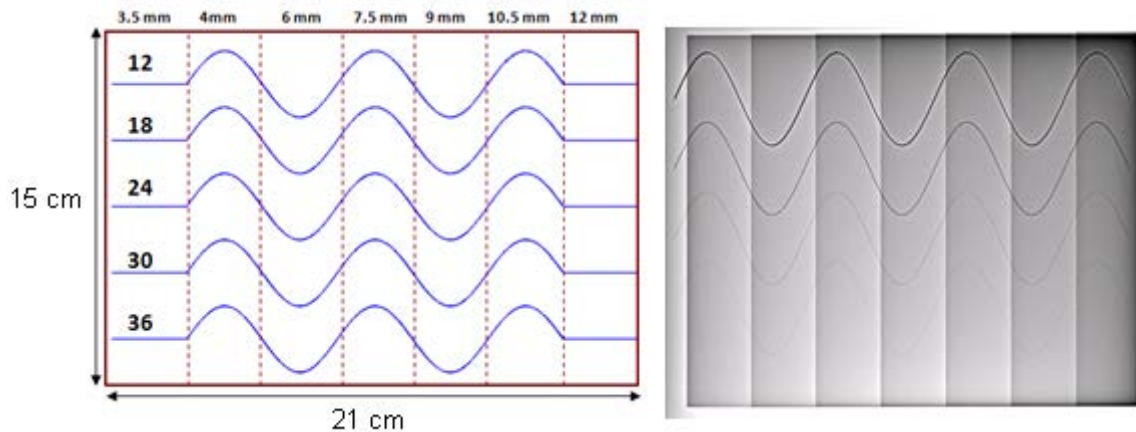


Abbildung 9 Drahterkennungstest. Links: schematische Darstellung mit Angabe der Dicke des jeweiligen Stufenkeils und der AWG (American Wire Gauge) Nummer der verwendeten Drähte (AWG12: Ø2.1mm; 18: Ø1.02mm; 24: Ø0.51 mm; 30: Ø0.25mm; 36: Ø0.127 mm). Rechts: Durchstrahlungsbild aufgenommen bei einer Energie von 3MeV.

1.2.2 Durchdringungstest (Stahl)

Zur Bestimmung der Durchdringungsfähigkeit eines Röntgengeräts wurde ein Stufenkeil aus Stahl (Fe) mit Stufendicken von 4 mm, 8 mm, 12 mm, 16 mm, 20 mm, 24 mm, 28 mm, 32 mm, 36 mm und 40 mm angefertigt (siehe Abbildung 10). Zusätzlich sind Bleinummern, welche die jeweilige Dicke angeben auf die Stufen geklebt. In diesem Test wird das Intensitätsprofil des Stufenkeils senkrecht zu den Stufen analysiert. Die Intensitätsunterschiede sollten visuell erkennbar sein. Für einen erfolgreichen Test müssen im Durchstrahlungsbild alle Stufen erkennbar sein. Bei mangelhafter Durchdringungsfähigkeit des Röntgengerätes sind die dickeren Stufen nicht mehr unterscheidbar.

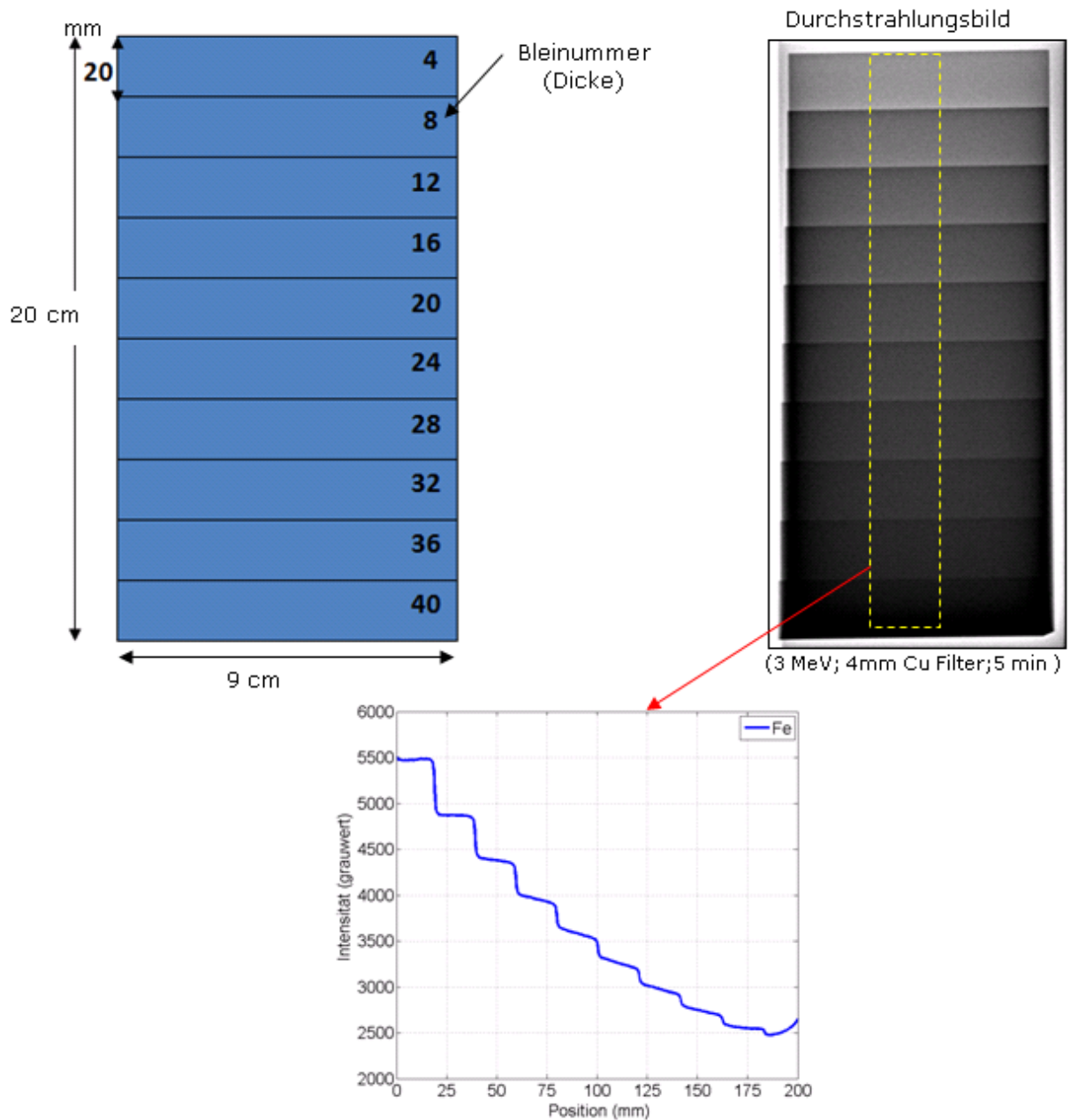


Abbildung 10 Test zur quantitativen Bewertung der Durchdringungsfähigkeit eines Röntgengeräts. Links: schematische Darstellung des Stufenkeils. Rechts: resultierendes Durchstrahlungsbild (3MeV). Unten: Intensitätsverlauf im Durchstrahlungsbild senkrecht zu den unterschiedlich dicken Stufen. Alle Stufen werden mit unterschiedlicher Intensität erkannt.

1.2.3 Kontrastempfindlichkeitstest

Die Abbildung 11 zeigt den Einzeltest zur Bewertung der erreichbaren Stahl-Kontrastempfindlichkeit eines Röntgengeräts. Dieser Test besteht aus einem Stahl-Stufenkeil mit Stufendicken von 1 mm, 2 mm, 3 mm, 4 mm und 5 mm. In jeder Stufe befinden sich Bohrungen mit der jeweiligen 0.5, 1.0, 2.0 und 4.0-fachen Stufendicke als Durchmesser zur Bewertung des Kontrastes. Der kleinste Lochdurchmesser beträgt damit 0.5mm, der größte 20mm. Die kleineren Bohrungen erlauben eine bessere Bewertung der

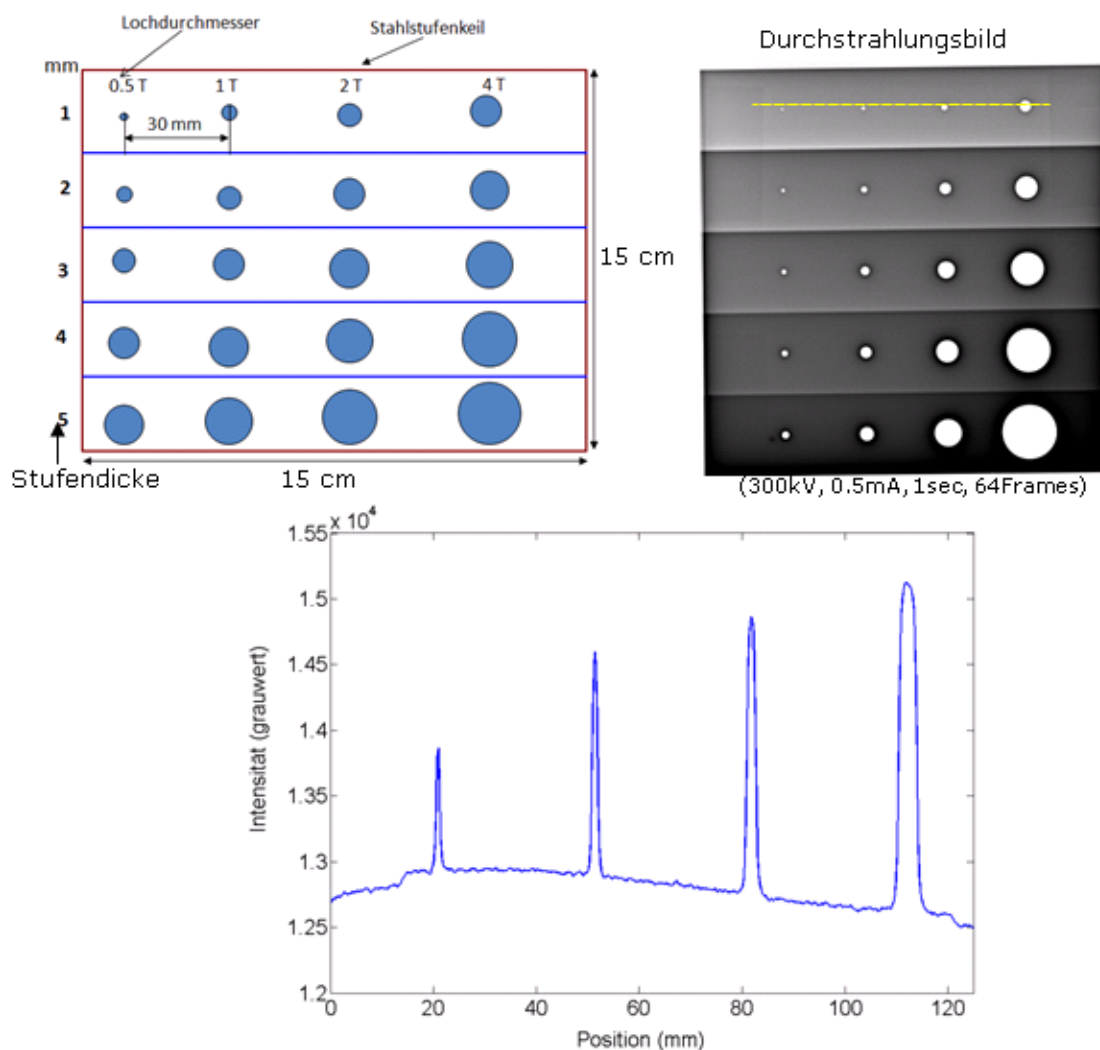


Abbildung 11 Kontrastempfindlichkeitstest. Links oben: schematische Darstellung. Rechts oben: zugehöriges Durchstrahlungsbild (300kV). Unten: Intensitätsprofil des im Durchstrahlungsbild gelb markierten Bereichs. Die einzelnen Bohrungen sind deutlich an der erhöhten Intensität erkennbar.

Kontrastempfindlichkeit im Vergleich zum ASTM-F792 Standard (kleinster Lochdurchmesser 2mm). Die Auflösung oder Darstellbarkeit eines bestimmten Kontrastes gilt als gegeben, wenn mehr als die halbe Fläche der Bohrungen erkennbar ist.

1.2.4 Ortsauflösungstest

Mit einem Ortsauflösungstest wird evaluiert, bis zu welcher Größe Details durch ein Durch-

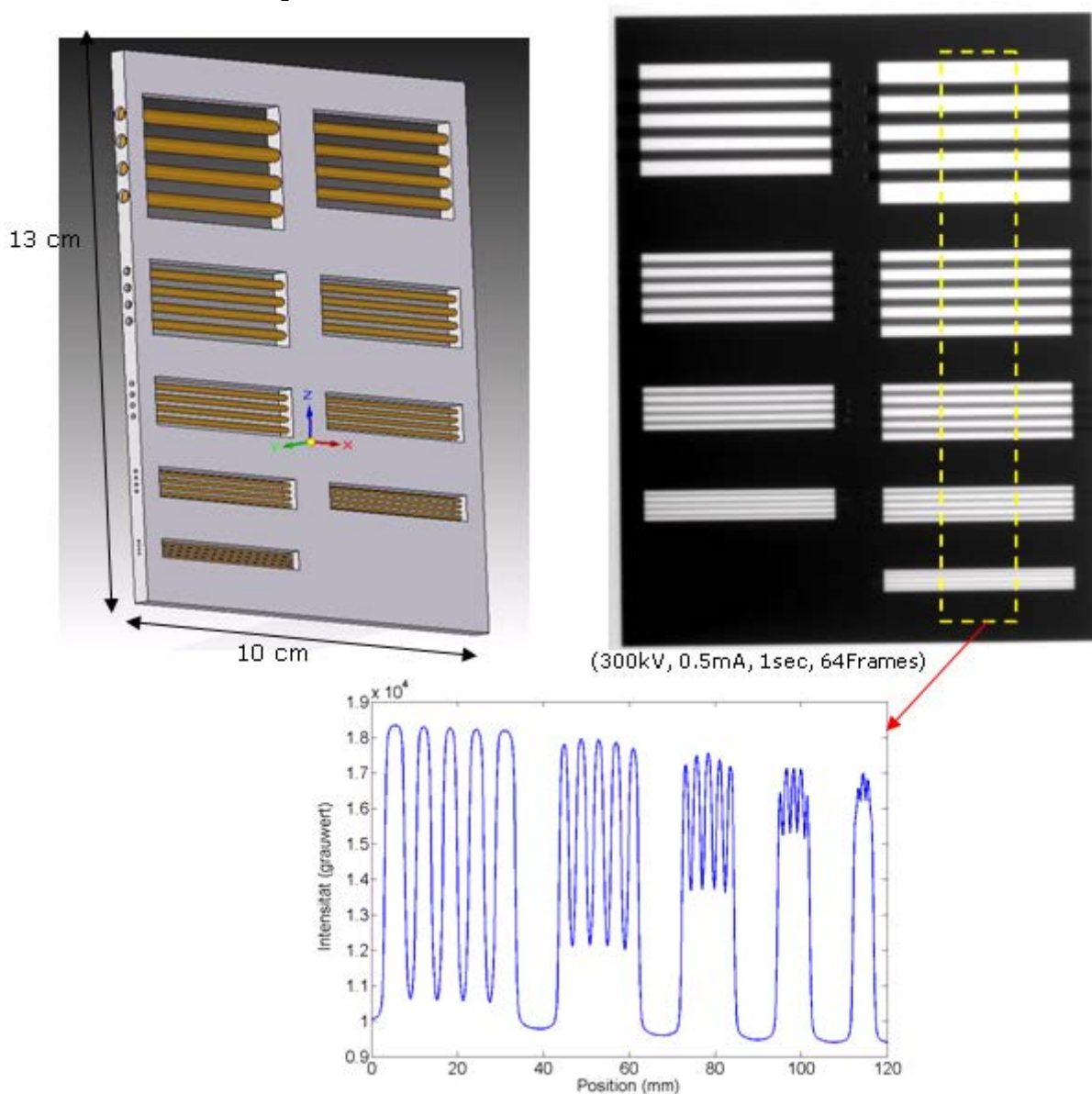


Abbildung 12 Test zur Bewertung der Ortsauflösung eines Scannersystems. Links: schematische Darstellung. Rechts: resultierendes Durchstrahlungsbild (300kV). Unten: Intensitätsverlauf des im Durchstrahlungsbild gelb markierten Bereichs (nähere Erklärung im Text).

strahlungssystem bestehend aus Röntgenquelle und Detektor noch dargestellt, bzw. aufgelöst werden können. Die Fähigkeit eines Systems Details aufzulösen hängt natürlich stark vom verwendeten Detektor, insbesondere der Pixelgröße ab. Aber auch Eigenschaften der Röntgenquelle, wie die Größe des Brennflecks (der Bereich auf der Anode der Röntgenröhre, in welchem Röntgenstrahlung entsteht) sind hier wichtig. Weitere wichtige Parameter sind die Lage des durchstrahlten Objektes zwischen Strahlungsquelle und Detektor (Vergrößerungseffekt), die Ausrichtung der Drähte zum Detektor (Alias-Effekte durch Pixelsampling), sowie Dicke und Material des durchstrahlten Objektes (Aufhärtungseffekte). Für eine umfassende Bewertung eines Durchstrahlungssystems ist es daher notwendig, den Testkörper an unterschiedlichen Positionen zwischen Strahlenquelle und Detektor, sowie mit unterschiedlichen Orientierungen relativ zum Detektor zu durchstrahlen. Für diesen Test werden äquidistante, jeweils in Vierergruppen angeordnete Kupferdrähte mit unterschiedlichen Durchmessern verwendet. Die Drähte befinden sich (um einen besseren Kontrast zu erreichen) in einem Rahmen aus Edelstahl, besitzen jeweils eine Länge von 40mm und haben pro Vierergruppe einen Durchmesser von 0.5, 0.7, 0.8, 1.0, 1.3, 1.6, 2.0, 2.5 und 3.0mm. Entsprechend dem ASTM E2002-15 Standards wird als Grenze der Ortsauflösung die Drahtdicke herangezogen, bei der die einzelnen Drähte mit dem bloßen Auge nicht mehr unterschieden werden können.

1.2.5 Materialdiskriminierungstest

Leichtmetall-Hochdichtes Metall

Eine wesentliche Einschränkung bei den bestehenden Testkörpern besteht darin, dass eine Diskriminierung zwischen (leichten) Metallen und hochdichten Metallen nicht vorgesehen ist.

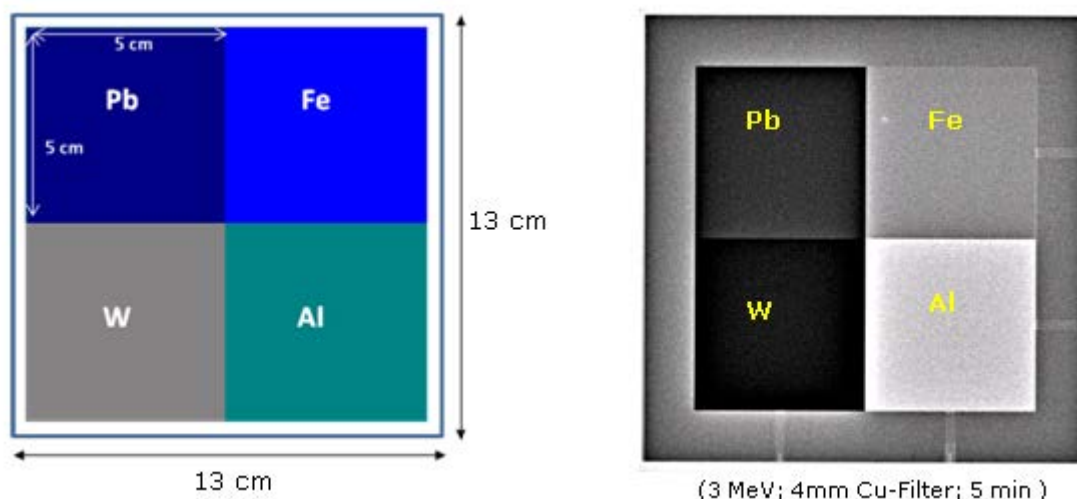


Abbildung 13 Materialdiskriminierung: Metall - hochdichtes Metall. Links: Anordnung der Plättchen aus unterschiedlichen Metallen im Kupferrahmen. Rechts: zugehöriges Durchstrahlungsbild bei einer Energie von 3 MeV. Für die Dual-Energy-Darstellung siehe Abbildung 15 rechts unten.

Der von der BAM entwickelte neue Testkörper enthält Elemente aus den metallischen Werkstoffen Aluminium (Al) und Stahl (Fe), sowie als hochdichte Metalle Blei (Pb) und Wolfram (W). Die einzelnen Elemente sind in einem Rahmen aus Messing (CuZn_x) gefasst (siehe Abbildung 13). Die Materialdicke der einzelnen Metallelemente beträgt jeweils 5 mm. Die jeweiligen Stoffdichten und Ordnungszahlen der verwendeten Metalle sind in Tabelle 3 im Anhang angegeben. Der Unterschied in der Dichte zwischen Aluminium und Wolfram beträgt mehr als 80 Prozent. Der Unterschied zwischen der Ordnungszahl ist fast 6. Die Diskriminierung der verschiedenen Metalle erfolgt mithilfe eines farbkodierten Dual-Energy Durchstrahlungsbildes (siehe Abbildung 15). Aus den unterschiedlichen Schwächungen bei zwei verschiedenen Durchstrahlungsenergien kann auf die Kernladungszahl (Z_{eff}) geschlossen werden. Mit der Auswertung dieses Tests kann die Materialdiskriminierungseffizienz eines Röntgengeräts, vorrangig in Hochenergie-Bereich ($\geq 300\text{kV}$) bewertet werden. In einer weiteren Entwicklung sollten die Materialdicken im Testphantom unterschiedlich gewählt werden, um ähnliche Schwächungen zu erhalten.

Organisches- Material, Diskriminierungstest nach Ordnungszahl

Dieser Test (siehe Abbildung 14) kann zur Diskriminierung von organischen Materialien mit unterschiedlichen Ordnungszahlen angewendet werden. Die einzelnen Elemente bestehen aus den organischen Materialien Polytetrafluoräthylen (PTFE), Polyamide (PA) und

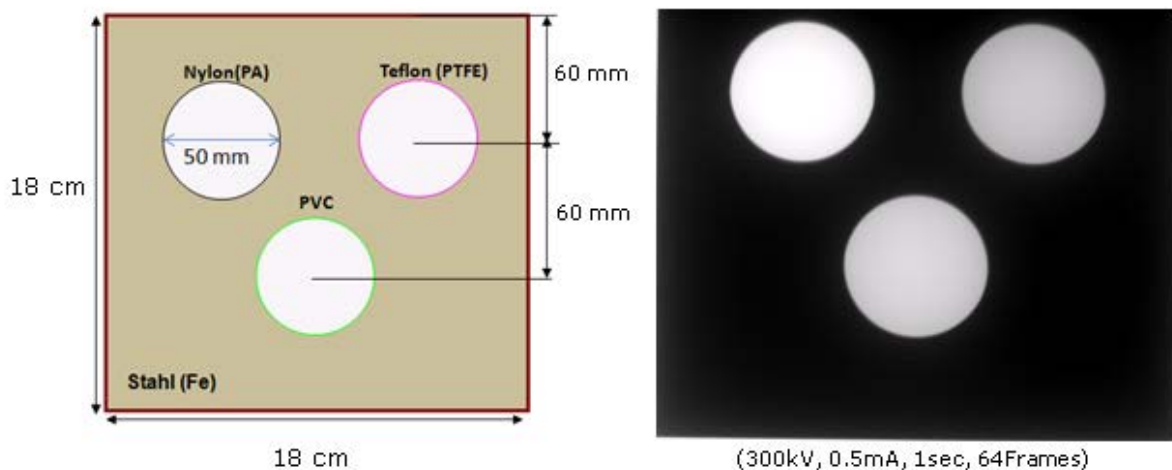


Abbildung 14 Materialdiskriminierung: Organisches Material. Links: schematische Darstellung. Rechts: Durchstrahlungsbild bei 300 kV. Für das zugehörige Dual-Energy Bild siehe Abbildung 15 links.

Polyvinylchlorid (PVC). Diese sind jeweils als zylinderförmige Elemente mit einem Durchmesser von 50 mm und einer Dicke von 20 mm, eingebettet in einen Rahmen aus Stahl (Fe) ausgestaltet. Die Stoffdichten und Ordnungszahlen der verwendeten Materialien sind in

Tabelle 4 im Anhang gegeben. Die Auswertung dieses Diskriminierungstests wird anhand der Farbkodierung im Dualenergie-Bild durchgeführt. Die verwendete Durchstrahlungsanlage sollte alle drei Materialien mit unterschiedlicher Farbkodierung darstellen (siehe Abbildung 15).

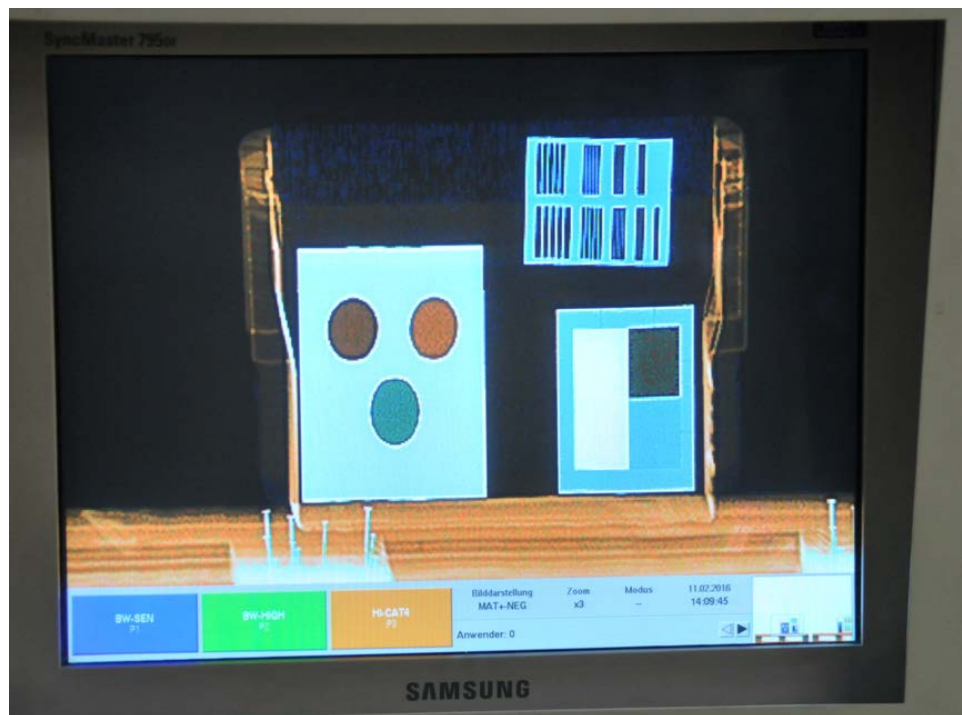


Abbildung 15 Test der Einzelkomponenten am Flughafen Bremen mit einem Smith Detection HI-SCAN180180-2is Scanner . Links: Test zur Diskriminierung von organischem Material . Rechts unten: Test zur Diskriminierung von Metall/hochdichtem Metall.

Flüssigkeiten-Feststoffe Diskriminierungstest

Eine weitere Einschränkung der bestehenden Testkörper besteht im Fehlen eines Flüssigkeit-Feststoff Diskriminierungstest, da diese nur das anorganische Material Salz und das organische Material Zucker, beides als Feststoff, enthalten. Daher ist mit den bestehenden Testkörpern nur eine Unterscheidung zwischen anorganischen und organischen Feststoffen möglich. Der von der BAM entwickelte Testkörper enthält nicht nur Salz (NaCl) und Zucker (C₁₂H₂₂O₁₁), sondern auch die Flüssigkeiten Cyclohexan (C₆H₁₂), und Glycerin (C₃H₈O₃) und Wasser (H₂O), sowie den desensibilisierten Sprengstoff Ammoniumnitrat (NH₄NO₃) (siehe Tabelle 5 im Anhang). Die Begründung für die Auswahl der verwendenden Materialien ergibt sich aus Abbildung 16 und Abbildung 17. Mit ihrer Dichte und Ordnungszahl liegen sie in dem Bereich, in welchem sich auch die möglichst aufzufindenden Explosivstoffe und Drogen befinden. Alle Flüssig- und Feststoffe werden in 100 ml luft- und feuchtigkeitsdichte Glasflaschen gefüllt und in einer Halterung aus Hartschaumstoff befestigt. Durch den

Farbkontrast im Dual-Energy Bild und die Körnigkeit der Feststoffe, sollten sich sowohl die Flüssigkeiten von den Feststoffen als auch die verschiedenen Stoffe untereinander unterscheiden lassen. Abbildung 18 zeigt einen praktischen Erprobungstest am Flughafen Bremen.

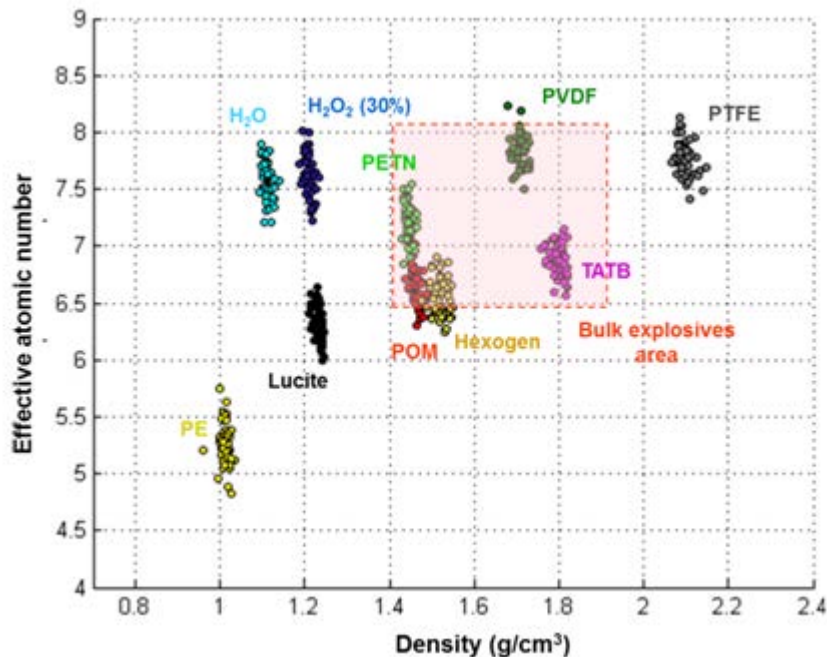


Abbildung 16 Dichte und effektive Ordnungszahl für verschiedenen organischen Materialien(4).

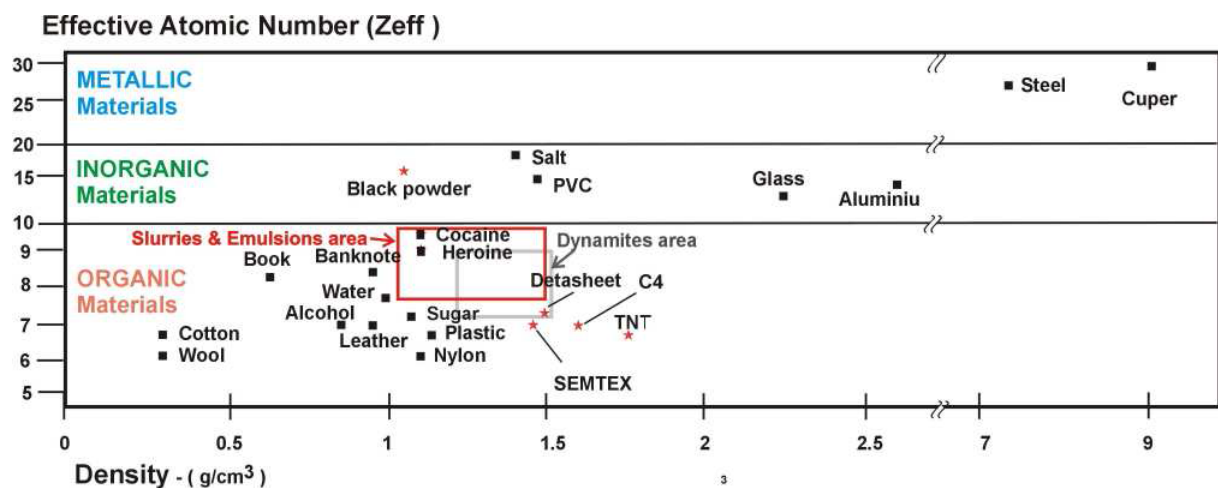


Abbildung 17 Dichte und Ordnungszahl für verschiedene organische, anorganische und metallische Materialien (5).



Abbildung 18 Test der Einzelkomponenten am Flughafen Bremen mit einem Smith Detection Hi-SCAN180180-2is Scanner. Materialdiskriminierungstest für Flüssigkeiten und Feststoffe.

Der an der BAM entwickelte neue Testkörper bietet damit deutlich erweiterte Möglichkeiten zur Evaluierung der eingesetzten Frachtdurchstrahlungsanlagen. Seine Ausarbeitung fließt mit ein in die aktuellen Normungs- und Standardisierungstätigkeiten der BAM, wie den Entwurf zum neuen ASTM F792-HP Standard („Standard Practice for Evaluating the Image Performance of Security X-Ray Systems – Part HP: Methods based on human evaluation of image quality“).

1.3 Entwicklung eines Röntgensiegels zum Nachweis der Manipulation einer Fracht

Als weiteren in den AP 1 und 2 identifizierten, und bereits im Projektantrag beschriebenen Bedarf, stellte sich für die BAM die Entwicklung einer Röntgensignatur bzw. eines Röntgensiegels heraus, welches die Entdeckung der Manipulation einer Fracht, während des Durchstrahlungsvorganges ermöglicht, bzw. erleichtert. In der derzeitigen IST Situation erfolgt das Röntgen einer Fracht durch eine LSKK, welche das vom Röntgensystem angezeigte Durchstrahlungsbild manuell auswertet. Weder erfolgt ein tatsächlicher Nachweis des Röntgens – dieses wird lediglich in den Frachtbegleitpapieren quittiert, noch kann eine Manipulation der Fracht im Durchstrahlungsbild erkannt werden. Lediglich das Erkennen von potentiell gefährlichen Stoffen oder Gegenständen ist möglich, bleibt aber dem mehr oder weniger geschulten Auge der LSKK überlassen.

Die BAM hat hier während der Projektlaufzeit mehrere mögliche Lösungen entwickelt, für welche in den Arbeitspaketen 1 bis 3 die Grundlagen und Vorbedingungen durch Praxiseinsätze vor Ort und im Labor abgesteckt wurden. Für die Entwicklung des angestrebten Security-Fracht-Fingerprints steuerte die BAM Teillösungen für den Bereich der Durchstrahlungstechnik bei. Eine dieser Lösungen bestand in der Entwicklung eines

Röntgensiegels. Dieser sollte in Form von im Röntgenbild sichtbaren Strukturen umgesetzt werden. Die Sichtbarkeit von unterschiedlichen Strukturen im Durchstrahlungsbild, die Abhängigkeit der Sichtbarkeit von der Zusammensetzung der Fracht, der Lage der Strukturen relativ zur Fracht, Strahlenquelle und Detektor waren hier ebenso zentrale Punkte, wie die Frage, welche Strukturen wie zur Sicherheit, zur eindeutigen Identifizierung und zur Erkennung einer möglichen Manipulation der Fracht beitragen können.

1.3.1 Entwicklung einer virtuellen Signatur

Eine erste Lösung bestand in der Umsetzung einer sogenannten virtuellen Signatur in Form eines QR-Codes (siehe Abbildung 19). In diesem QR-Code können sowohl packstückspezifische Informationen, wie die im Projekt entwickelte ESecLog-ID, aber auch charakteristische Informationen des Durchstrahlungsbildes selbst hinterlegt werden. Zu einem späteren Zeitpunkt können dann zur Überprüfung der Integrität diese Informationen abgefragt, bzw. aus dem Bild erneut berechnet und abgeglichen werden. Denkbare Anwendungen sind hier beispielsweise die Hinterlegung eines Links im QR-Code, welcher zu einem, auf einem separaten Server gespeicherten Durchstrahlungsbild führt. Ein Ausdruck der Aufnahme des Röntgenscanners, könnte so mit dem gespeicherten Originalbild abgeglichen werden. Eine weitere Möglichkeit besteht in der Berechnung eines Fingerprints aus der Durchstrahlungsaufnahme. Eine erneute Berechnung des Fingerprints zu einem späteren Zeitpunkt könnte so mögliche Manipulationen am Durchstrahlungsbild selbst (beispielsweise einen Austausch des Bildes oder dessen nachträgliche Änderung) erkennbar machen.

Zur Berechnung eines Fingerprints aus den Bildeigenschaften hat die BAM mehrere Methoden erprobt, welche u.a. auf der Grauwertverteilung der Bilder (Histogramm) oder den detektierbaren Kanten in der Durchstrahlungsaufnahme basieren. Eine gut funktionierende Methode verwendet die aufsummierten Grauwerte in jeweils einer Dimension. Diese können durch erneute Berechnung – auf dem Originalbild oder auf einer zweiten Aufnahme desselben Packstücks – mit den Originaldaten korreliert werden. Eine Änderung der Grauwerte oder eine Verschiebung des Bildinhaltes stören hierbei nicht. Ein Nachteil dieses Verfahrens besteht jedoch in der relativen Unempfindlichkeit gegenüber kleinen Veränderungen im Bild.

Die Umsetzung dieser virtuellen Signatur kann sowohl physisch als auch virtuell erfolgen. Bei einer physischen Umsetzung wird der QR-Code aus röntgendichten Materialien, beispielsweise Metallfolien, hergestellt. Da die Signatur einer bestimmten ESecLog-ID zugeordnet werden muss, würde dies die packstückindividuelle Herstellung eines QR-Codes nach sich ziehen. Abgesehen von eventuellen Umweltaspekten (je nach verwendetem Material) würde dies die Kosten pro Packstück erhöhen, da eine dedizierte Technik vonnöten wäre. Eine deutlich kostengünstigere Lösung besteht in der Verwendung eines computergenerierten QR-Codes, welches lediglich in das Durchstrahlungsbild eingeblendet wird. Hier ist keine separate Technik nötig. Ein weiterer Vorteil dieser Lösung besteht in der freien Platzierbarkeit des QR-Codes im Bild. Es kann somit immer eine möglichst hintergrundfreie Region des Bildes gewählt werden. Bei der physischen Einbringung des QR-Codes zeigte sich, dass aufgrund der eindimensionalen Struktur eine nicht-optimale



Abbildung 19 Einbringen eines QR-Codes in das Durchstrahlungsbild (virtuell oder physisch).

Lesbarkeit des QR-Codes aufgrund möglicher Überlagerungen mit einem Hintergrund (insbesondere bei dicht gepackten Frachtstücken) nicht immer ausgeschlossen werden kann. Für eine reibungsloses Funktionieren dieser Methode sollten daher immer zwei QR-Codes an unterschiedlichen Stellen der Durchstrahlungsaufnahme angebracht werden.

Die anfängliche Idee des Projektes zur Entwicklung eines Fracht-Fingerprints auf der Basis neuer Prüfmerkmale und der Entwicklung eines Informationssystems zum Abgleich des Fingerprints an verschiedenen Stellen der Luftfrachtkette konkretisierte sich während der Laufzeit des Projektes zu einer Lösung, bei der alle Prüfmerkmale direkt an das Informationssystem (FFI) angebunden werden. Als Technik zur Anbindung etablierte sich dabei mehr und mehr die RFID-Technik. Dies hatte auf die weitere Entwicklung der im Projekt erarbeiteten Lösungen der BAM Auswirkungen. Einerseits bestand die Möglichkeit die Durchstrahlungsaufnahmen direkt in das Fracht-Fingerprint-Informationssystem hochzuladen. Dies eröffnete die Möglichkeit die Durchstrahlungsaufnahme dort direkt und effizient gegen Manipulation zu sichern. Die Absicherung kann dabei durch eine Verschlüsselung des Bildes, bzw. bestimmter Eigenschaften des Bildes oder durch Berechnung einer kryptographischen Hashfunktion erfolgen. Entsprechend der Technischen Richtlinie BSI TR-02102-1 (2016) des Bundesamtes für Sicherheit in der Informationstechnik (BSI) kann hierzu beispielsweise die Blockchiffre AES-128 (oder größere Blockgröße) zum Verschlüsseln und die Hashfunktion SHA/SHA3-256 zum Berechnen einer kryptographischen Prüfsumme verwendet werden. Diese Verfahren gelten derzeit als nicht manipulierbar. Zum anderen sollten die entwickelten

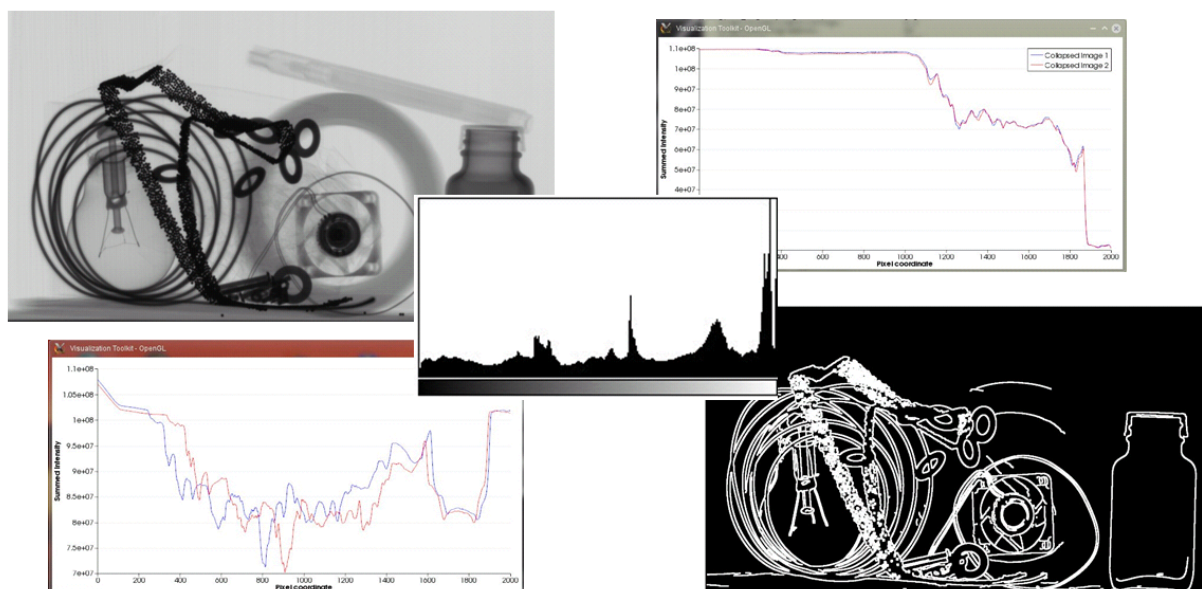


Abbildung 20 Berechnung eines Fingerprints aus den Bildeigenschaften. Oben links die Originalaufnahme. Die beiden Diagramme rechts oben und links unten zeigen aufsummierten Grauwerte entlang der x- bzw. der y-Achse. Mittig die Verteilung der Grauwerte, rechts unten die Darstellung einer Kantendetektion auf der Originalaufnahme. Details siehe Text.

Lösungen die ESecLog-Prozesskette konsistent und preisgünstig halten. Daher wurde die Entwicklung des virtuellen Markers, welcher eine separate Techniklösung (physische QR-Code Herstellung, QR-Code Leser) erfordern würde, zugunsten des in Abschnitt 1.4 beschriebenen und mittels RFID an das Informationssystem angebandenen Röntgensensors nicht weiter finalisiert. Der Nachweis des erfolgten Röntgens kann durch den Röntgensensor erbracht werden, die Erkennbarkeit von Manipulationen direkt durch das nachfolgend beschriebene Röntgensiegel oder indirekt durch den Vergleich zweier Durchstrahlungsaufnahmen (siehe Abschnitt 1.5). Die Idee eines virtuellen Röntgensiegels wird jedoch derzeit in einer Patentschrift, welche zur Einreichung ansteht, konkretisiert.

1.3.2 Entwicklung eines Röntgensiegels

Eine weitere Entwicklung der BAM fokussierte auf die direkte Erkennung von Manipulationen des Frachtstückes während des Durchstrahlungsvorganges. Hierzu wurde ein Prüfmerkmal entwickelt, welches durch visuelle Inspektion des Durchstrahlungsbildes überprüft werden kann. Hier wurden umfangreiche Versuchsreihen unter Berücksichtigung der in den ersten beiden Arbeitspaketen erhaltenen Ergebnissen zu Erkennbarkeit und Positionierung für potentielle Röntgensiegel, bzw. Röntgensignaturen durchgeführt. Die speziellen, röntgensichtbaren Bestandteile des Röntgensiegels sollten im Durchstrahlungsbild gut erkennbar sein, ohne die Durchstrahlung des eigentlichen Inhaltes zu stören. Weiterhin sollten sie für beliebige Positionen des Packstückes innerhalb der Durchstrahlungsanlage als auch bei beliebigem Hintergrund – also insbesondere bei detailreichen und dunklen Strukturen der

Fracht im Durchstrahlungsbild - gut zu erkennen sein. Die Dual-View Fähigkeiten der meisten Röntgenanlagen zur Durchstrahlung von Fracht wurden, wenngleich hilfreich, nicht vorausgesetzt. Als Voraussetzungen wurden damit identifiziert:

- a. Die Struktur des Röntgensiegels sollte möglichst ausgedehnt sein, um immer auch hintergrundfreie Bereiche abzudecken.
- b. Die Struktur des Röntgensiegels sollte möglichst fein sein, um die Erkennbarkeit der eigentlich durchstrahlten Fracht nicht zu beeinträchtigen.
- c. Die Struktur des Röntgensiegels sollte einen möglichst großen Teil der Fracht umfassen, um unabhängig von der Positionierung der Fracht innerhalb der Durchstrahlungsanlage zu sein.
- d. Die Absorptionsfähigkeit des Röntgensiegels sollte möglichst hoch sein, um eine gute Sichtbarkeit im Durchstrahlungsbild zu gewährleisten, auch bei absorbierenden Bestandteilen der Fracht im Hintergrund des Bildes.

Ausgehend von diesen Voraussetzungen hat die BAM ein spezielles Röntgensiegel entwickelt, welches strukturierte metallene Bestandteile aufweist und sich als Verpackungsband eignet (siehe Abbildung 21, Abbildung 22 und Abbildung 23). Durch die Verwendung als selbstklebendes Verpackungsband ist dieses Siegel über das gesamte Packstück aufgebracht. Unabhängig von der Lage des Packstückes im Röntgenscanner ist somit auch bei Ansicht von nur einer Seite (Single View) immer eine Erkennbarkeit im Durchstrahlungsbild gegeben. Auch eine stark strukturierte oder stark absorbierende Fracht im Durchstrahlungsbild stellt hier kein Problem dar, da immer genügend Regionen im Bild vorhanden sind, in welchen das Siegel erkannt werden kann.

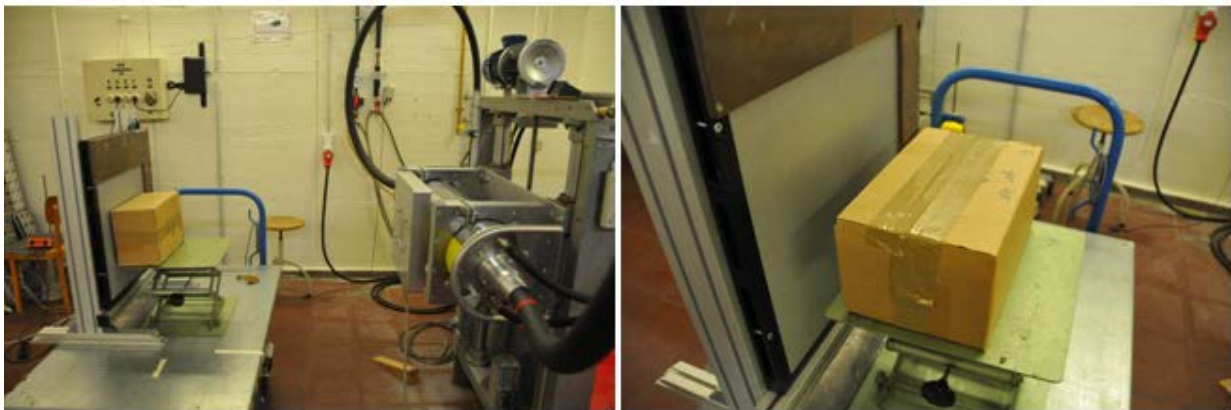


Abbildung 21 *Praktische Erprobung des Röntgensiegels. Links: Versuchsaufbau, links im Bild das Testobjekt vor dem Detektor, rechts die Röntgenröhre (Betriebsparameter: 200kV, 0.3mA). Rechts: Testobjekt. Das spezielle Röntgensiegel-Verpackungsband ist äußerlich nicht von normalem Klebeband zu unterscheiden.*

Für das Material des Siegels wurden verschiedene Materialien und Legierungen untersucht. Sie sollten eine hohe Absorption der Röntgenstrahlung aufweisen, gleichzeitig aber

kostengünstig und umweltfreundlich sein (siehe Tabelle 6 im Anhang). Blei bietet sich zwar mit seinem großen Absorptionsvermögen und seiner guten Verarbeitbarkeit als zu

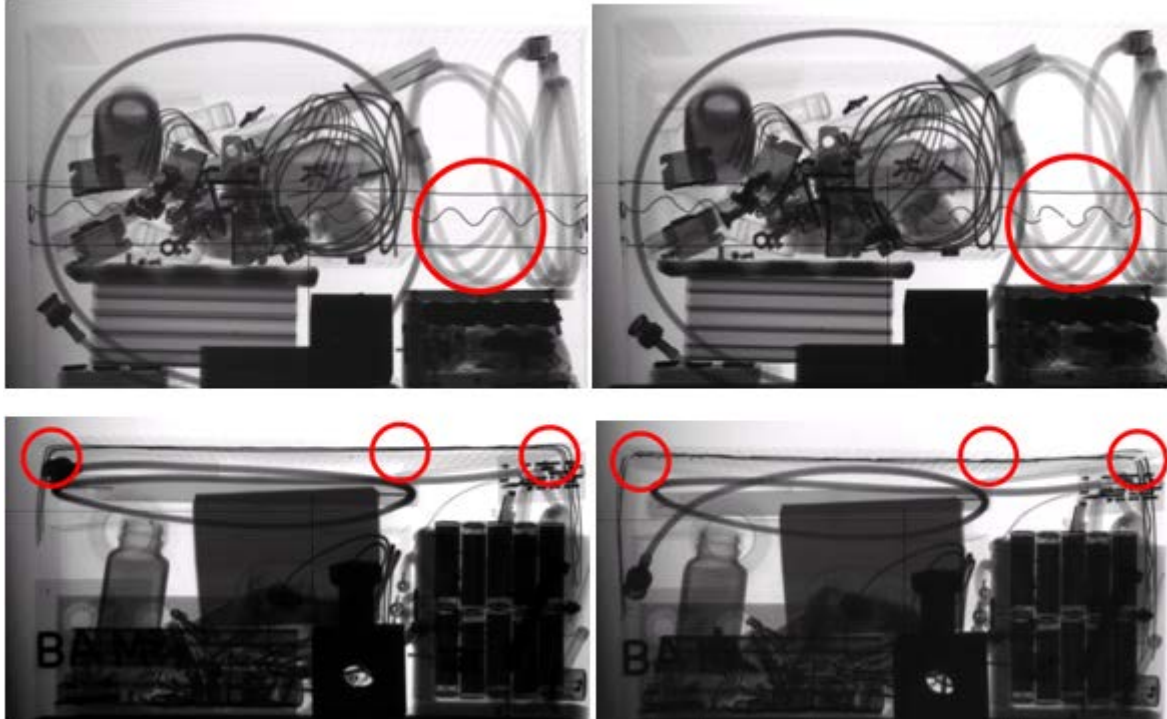


Abbildung 22 Verpackungsband mit Drahtform als als Röntgensiegel. Obere Reihe: Ansicht von oben. Untere Reihe: Ansicht von der Seite. Jeweils links: Röntgensiegler intakt, rechts: nach erfolgtem Manipulationsversuch.

verwendendes Material an, schied aber aufgrund der Umweltproblematik aus. In den Untersuchungen der BAM wurde Blei jedoch zu Vergleichszwecken verwendet. Gute Ergebnisse hinsichtlich Sichtbarkeit im Röntgenbild, Preis und Verarbeitbarkeit wurden mit einer Zinn-Kupfer-Legierung (SnCu) erreicht. Mehrere dünne, zusammenhängende Metallfäden werden dabei mit einer bestimmten Form versehen und in ein Verpackungsband eingebracht (siehe Abbildung 22). Alternativ wurde auch eine Ansammlung von Metallkügelchen getestet, welche sich als ebenso tauglich erwies (siehe Abbildung 23). Bei einer späteren praxistauglichen Umsetzung wäre beispielsweise eine Hersteller/Versender-abhängige Form der Metallfäden oder der Anordnung der Kügelchen denkbar. Um das mit diesem Siegel versehene Frachtstück zu manipulieren, bzw. Gegenstände einzubringen, muss dieses Röntgensiegel nun zerstört, bzw. durchtrennt werden. Auch wenn man durch geschicktes Vorgehen die Zerstörung des Röntgensiegels bei der äußeren Inaugenscheinnahme nicht erkennen kann, so ist es in zahlreichen Tests im BAM-Labor nicht gelungen, die Manipulation des Siegels in der Durchstrahlungsaufnahme unkenntlich zu machen (siehe Abbildung 22 und Abbildung 23). Das hier von der BAM entwickelte Röntgensiegel erwies sich insgesamt als billige, einfach umzusetzende und auszuwertende Methode, Manipulationen an der Fracht zuverlässig im Durchstrahlungsbild zu erkennen. Bei einer möglichen industriellen (und damit gleichförmigen) Fertigung dieses Siegels mit

vorgegebenen Strukturen, ist es darüber hinaus denkbar, das Muster des Röntgensiegels mithilfe einer Software automatisch auszuwerten. Dazu wäre eine algorithmische Mustererkennung und –Verfolgung notwendig, welche die Struktur des Röntgensiegels im Bild

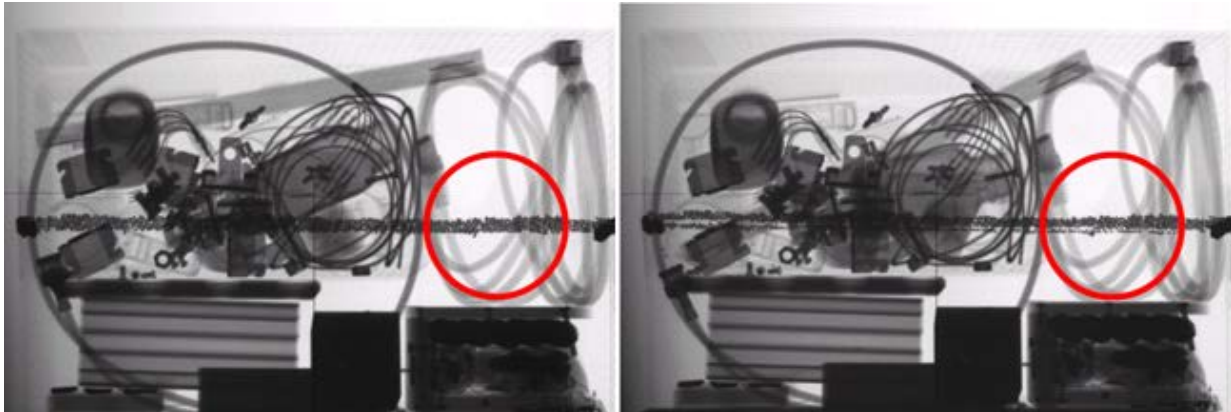


Abbildung 23 Verpackungsband mit Metallkugeln als Röntgensiegel. Ansicht von oben. Links intakt, rechts manipuliert.

erkennt und durch das Bild verfolgt. Ein Bruch des Siegels würde so automatisch detektiert werden können. Das hier entwickelte physische Röntgensiegel steht derzeit, ebenso wie das virtuelle Röntgensiegel, zur Einreichung beim Deutschen Patentamt an.

1.4 Entwicklung eines Röntgen- und Tageslichtsensors zum Nachweis des erfolgten Röntgens einer Fracht und des unerlaubten Öffnens

Die bisherigen Lösungen dienten dem Nachweis der Unversehrtheit einer Fracht, bzw. dem Erkennen von Manipulationen. Die Hauptlösung der BAM für die zu Projektbeginn konkretisierten Ziele der Entwicklung eines Fracht-Fingerprints durch Integration neuer Prüfverfahren in die bestehenden Prozesse der Luftfrachtkette und deren Anbindung an ein elektronisches Informationssystem ging jedoch einen Schritt weiter und bestand in der Realisierung eines kombinierten Licht- und Röntgensensors mit RFID-Funktionalität zum direkten Nachweis des Röntgens und des Öffnens eines Packstückes. Ausgangspunkt hier war der aufgedeckte Bedarf des sicheren Nachweises des Röntgens einer Fracht. Bisher wird das Röntgen lediglich von der ausführenden LSKK auf dem begleitenden Frachtschein bestätigt, ohne dass dies nachprüfbar wäre. Der von der BAM entwickelte Röntgensensor liefert jedoch einen tatsächlichen physikalischen, und damit sehr manipulationssicheren Nachweis der Röntgenstrahlung. Es wurden drei unterschiedliche Varianten eines Röntgensensors entwickelt. Alle funktionieren nach dem grundlegend gleichen Prinzip. Auftreffende Röntgenstrahlung erzeugt einen elektrischen Strom. Durch eine nachgeschaltete Elektronik wird dieses elektrische Signal verstärkt und ausgewertet. Das Ergebnis der Auswertung wird anschließend an einen RFID-Chip übertragen. Das Einbringen des Sensors in ein Strahlungsfeld kann somit registriert und zu einem beliebigen späteren Zeitpunkt erkannt und nachgewiesen werden. Durch die Integration eines RFID-Transponders konnte auch ein weiterer im Projekt identifizierter Bedarf erfüllt werden. Die Anbindung des

Röntgensensors an eine elektronische Datenbank, welche durch den Projektpartner Viaboxx in Form des FFI realisiert wurde. Der RFID-Transponder kann mit allen notwendigen Informationen, wie beispielsweise der ESecLog-ID, vor Einbringen in das Frachtstück initialisiert werden, und zu einem beliebigen späteren Zeitpunkt in der Logistikkette ausgelesen werden. Durch die Erweiterung des Röntgensensors mit einer zusätzlichen Fozelle, kann darüber hinaus gleichzeitig das Eindringen von Tageslicht, und damit das unerlaubte Öffnen der Fracht nachgewiesen werden.

Die im Projekt identifizierten Bedarfe gaben weitere Rahmenbedingungen für die Realisierung des Sensors vor. So sollte der Sensor möglichst preiswert herzustellen und wiederverwendbar sein. Ebenso sollte der Sensor, um die Kosten zu minimieren, identisch für alle Packstücke sein, also eine von der konkreten Fracht unabhängige Bau- und Funktionsweise besitzen. Darüber hinaus stellte sich die aus den Regularien des Luftverkehrs resultierende Anforderung, den Sensor, sofern er nicht vor Verladung in das Flugzeug aus der Fracht entfernt wird, ohne chemische Energiequelle zu betreiben. Es wurden drei konkrete, im Folgenden näher erläuterte Konzepte zur Realisierung des Sensors ausgearbeitet. Allen Konzepten gemeinsam ist die oben skizzierte, grundlegende Funktionsweise.

1.4.1 Passive Variante

Das erste Konzept besteht in einer innovativen, rein passiven Variante, welche die benötigte Energie ausschließlich der während des Scanvorganges auftretenden Röntgenstrahlung, bzw. dem einfallenden Tageslicht bei Öffnen des Packstücks entnimmt (Energy Harvesting), und damit die benötigte Energie zur Laufzeit generiert. Eine schematische Funktionsskizze findet sich in Abbildung 24. Die einfallende Röntgenstrahlung wird durch ein Szintillatormaterial in sichtbares Licht umgewandelt. Dieses Licht trifft auf ein Fotoelement und wird in elektrischen Strom umgewandelt. Ein zusätzliches Fotoelement registriert Strahlung im optischen Wellenlängenbereich, und damit das Eindringen von Tageslicht. Eine nachgeschaltete Elektronik wertet das Signal aus und beschreibt den RFID-Transponder mit den nötigen Informationen. Die größte Herausforderung in der passiven Variante des Sensors lag in der Erzeugung einer ausreichenden Stromstärke aus der geringen Dosisleistung der Röntgenstrahlung eines Frachtscanners. Hierzu wurden verschiedene Kombinationen aus Szintillatormaterial und Fotoelementen erarbeitet. Als Szintillatormaterialien kamen CsI(NA) (Cäsiumjodid dotiert mit Natrium), Gd_2O_2S (GadoliniumOxiSulfid/GadOx) und BaFCl mit La_2O_2S (BariumFluorChlorid mit Lanthan-OxiSulfid) zum Einsatz. Bei der Verwendung von BaFCl erwies sich die Energieausbeute als zu gering. Die gängigen Fotoelemente sind auf einen Wellenlängenbereich von 450nm bis 1000nm optimiert, BaFCl mit La_2O_2S emittiert bei einer Wellenlänge von 400nm bis 470nm, so nur ein Teil der vom Szintillator umgesetzten Röntgenenergie für die Fozelle zur Verfügung steht. Für die weitere Entwicklung wurde daher Gd_2O_2S , welches bei 550nm emittiert verwendet. Desweiteren weist Gd_2O_2S auch eine höhere Lichtausbeute auf, als BaFCl, d.h. ein größerer Teil der eingestrahlten Röntgenenergie wird in Licht umgewandelt. Es zeigte sich jedoch, dass die spektral schmalbandige Emission des Szintillators zu einem zu geringen Energieeintrag in das Fotoelement führt. Es konnten im Laborversuch lediglich zwischen 0.3 und 0.6V Spannung

erreicht werden. Durch eine Reihenschaltung mehrerer Elemente konnte die Spannung auf 1.2 bis 1.6V erhöht werden. Hier gibt es mehrere Konzepte, die verfolgt wurden (siehe Abbildung 25). Zum einen können

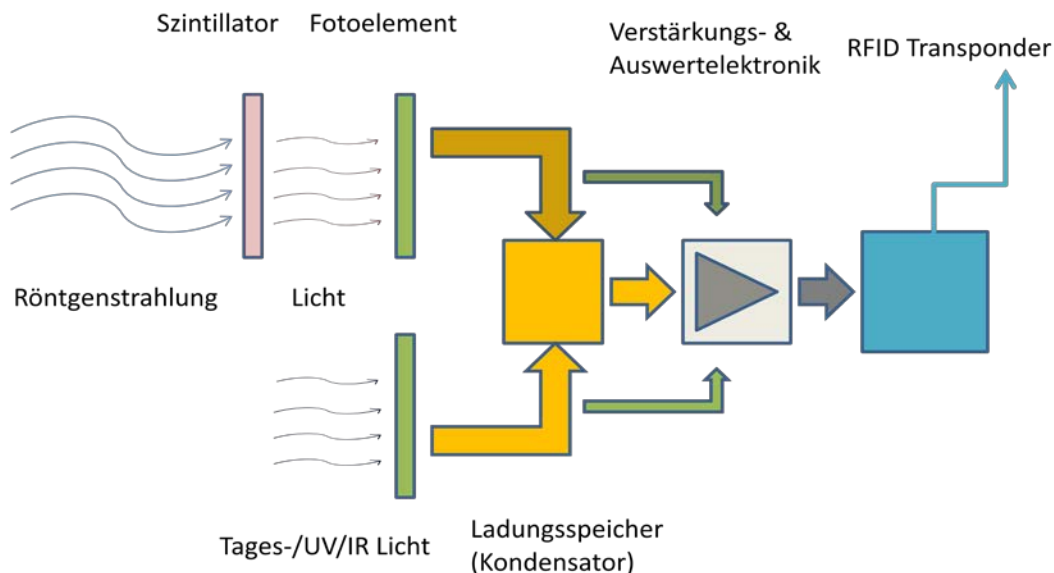


Abbildung 24 Schematische Darstellung der passiven Variante des Röntgen- und Tageslichtsensors. Die Erklärung der einzelnen Komponenten findet sich im Text.

mehrere quadratische Detektoren um einen würfelförmigen Szintillatorkristall angeordnet und entsprechend verschaltet werden. Konstruktionsbedingt ist man hierbei auf sechs Detektoren beschränkt. Eine weitere Möglichkeit ist die Nutzung von Szintillatorfolien, welche im Wechsel mit den Fotoelementen verschachtelt werden. Die Anzahl der Fotomodule kann hier weitaus höher ausfallen, ist allerdings ab einer bestimmten Schichtdicke nicht mehr praktikabel, da dann zu den hinteren Szintillator-Fotoelement-Kombinationen kaum noch Röntgenstrahlung durchdringt. Eine weitere Möglichkeit die Energieausbeute zu erhöhen, besteht in der Vergrößerung der aktiven Szintillatorfläche. Dies würde jedoch einerseits zu einem unpraktikabel großen Sensor führen, andererseits würde dies die Kosten für den Sensor stark erhöhen. Eine andere Möglichkeit die Spannung zu erhöhen, ohne die aktive Szintillatorfläche zu vergrößern, besteht in der Verwendung von Aufwärtswandlern. Untersuchungen hierzu werden derzeit an der BAM durchgeführt. Mit den derzeit am Markt erhältlichen Fotoelementen und Szintillatoren war die rein passive Variante während der Projektlaufzeit nicht ohne weiteres wirtschaftlich und praktikabel realisierbar.

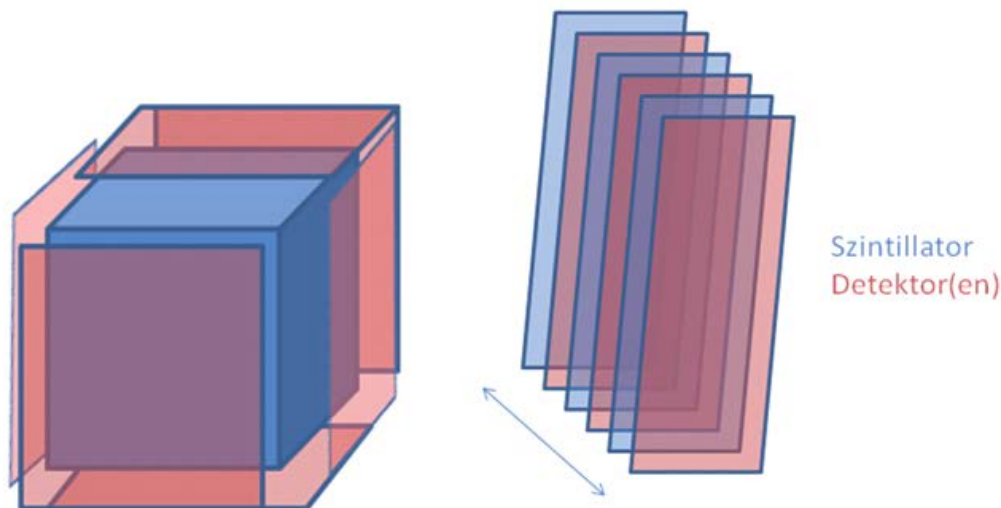


Abbildung 25 Mögliche Anordnungen von Szintillatormaterial und Fotoelementen.

1.4.2 Semi-passive Variante

Im nächsten Schritt wurde daher eine semi-passive Variante entwickelt. Hier werden Kondensatoren als Energiespeicher eingesetzt. In diesen wird die benötigte Energie, durch einen vor der Verwendung des Sensors aufgeladenen Kondensator gespeichert und während des Scanvorgangs im Frachtscanner bereitgestellt (siehe Abbildung 26). Der Sensor ist mehrfach verwendbar, muss aber vor jeder Nutzung neu geladen werden. Der Ladevorgang wird durch eine elektronische Zusatzschaltung realisiert. Eine Möglichkeit des Ladens besteht beispielsweise während des Auslesevorgangs des RFID Transponders. Das RFID-Lesegerät liest den RFID-Transponder mittels eines elektromagnetischen Felds aus. Dieses elektromagnetische Feld kann auch zum Aufladen des Kondensators herangezogen werden. Während der Erprobungsphase zeigte sich, dass die als Energiespeicher verwendeten Kondensatoren jedoch aufs sorgfältigste gegen abfließende elektrische Ströme isoliert werden müssen. Es dürfen keine oder nur sehr wenige andere Energiesenken („Verbraucher“) im System vorhanden sein, da sonst stetig elektrische Ladung aus dem Kondensator abfließt, bis der Kondensator entladen ist. Es zeigte sich, dass auch der Innenwiderstand der Kondensatoren zu hohen Leckströmen führt. Dies führt zu einer Entladung der Kondensatoren in relativ kurzer Zeit, eine Funktion des Sensors über einen längeren Zeitraum kann damit nicht garantiert werden. Ein Ausweg könnten hier Kondensatoren mit deutlich höheren Spannungen bieten. Dies wird derzeit weiter untersucht. Für die Realisierung innerhalb der Projektlaufzeit wurde jedoch die semi-passive Variante nicht weiter verfolgt, sondern stattdessen ein aktiver Licht- und Röntgensensor, welcher die benötigte Energie durch eine integrierte Batterie erhält, entwickelt. Dadurch ergeben sich verschiedene

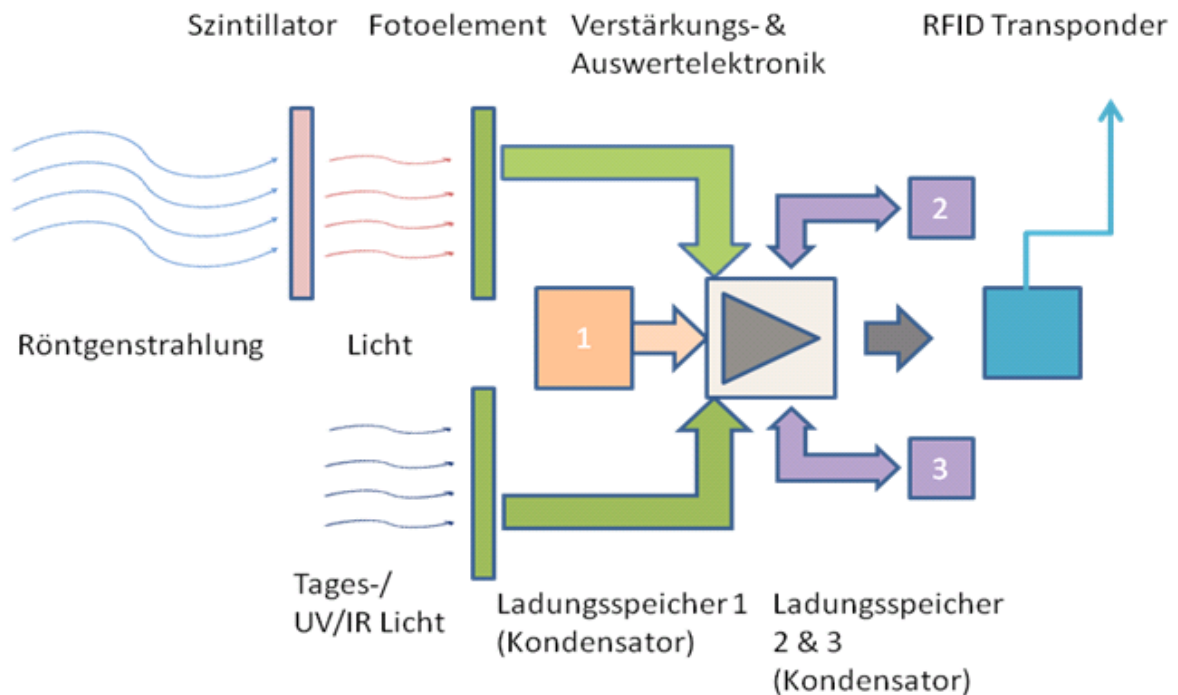


Abbildung 26 Prinzipskizze der semi-passiven Variante des Röntgen- und Tageslichtsensors.

zusätzliche Möglichkeiten wie z.B. die Verarbeitung der Signale durch einen Mikrocontroller und die quantitative Messung der Röntgenstrahlung. Weiterhin kann mittels einer zusätzlichen Echtzeituhr ein Zeit und Datumstempel generiert werden der im Mikrocontroller gespeichert wird und ebenfalls mittels RFID übertragen werden kann.

1.4.3 Aktive Variante

Bei der aktiven Variante, welche zum Einsatz kommen kann, wenn der Sensor vor der Verladung der Fracht in das Flugzeug aus dem Packstück entnommen wird, benutzt eine Lithiumbatterie als Energiequelle (siehe Abbildung 27). Erste Versuche wurden auch hier mit einer Kombination aus Szintillatormaterial und Fotoelementen durchgeführt. In der weiteren Entwicklung wurde diese Kombination jedoch gegen eine pin-Diode (**p**ositive **i**ntrinsic **n**egative Diode) ausgetauscht. Diese kann die einfallende Röntgenstrahlung direkt in elektrischen Strom umwandeln. Bei der passiven und semi-passiven Variante des Sensors kann keine pin-Diode eingesetzt werden, da die generierten Ströme hier zu gering sind, und eine Verstärkung erfordern. Nach anfänglichen Eigenentwicklungen kam ein auf dem Markt erhältlicher Strahlungssensor, der RD2014 der Schweizer Firma *Teviso* für das Funktionsmuster zum Einsatz. Dieser konnte mit seinen lediglich drei Anschlüssen (VCC, GND, Signal) hervorragend in die Eigenentwicklung der BAM integriert werden. Durch die hohe Sensibilität des Sensors musste die Empfindlichkeit mittels eines Tiefpassfilters etwas gedämpft werden,

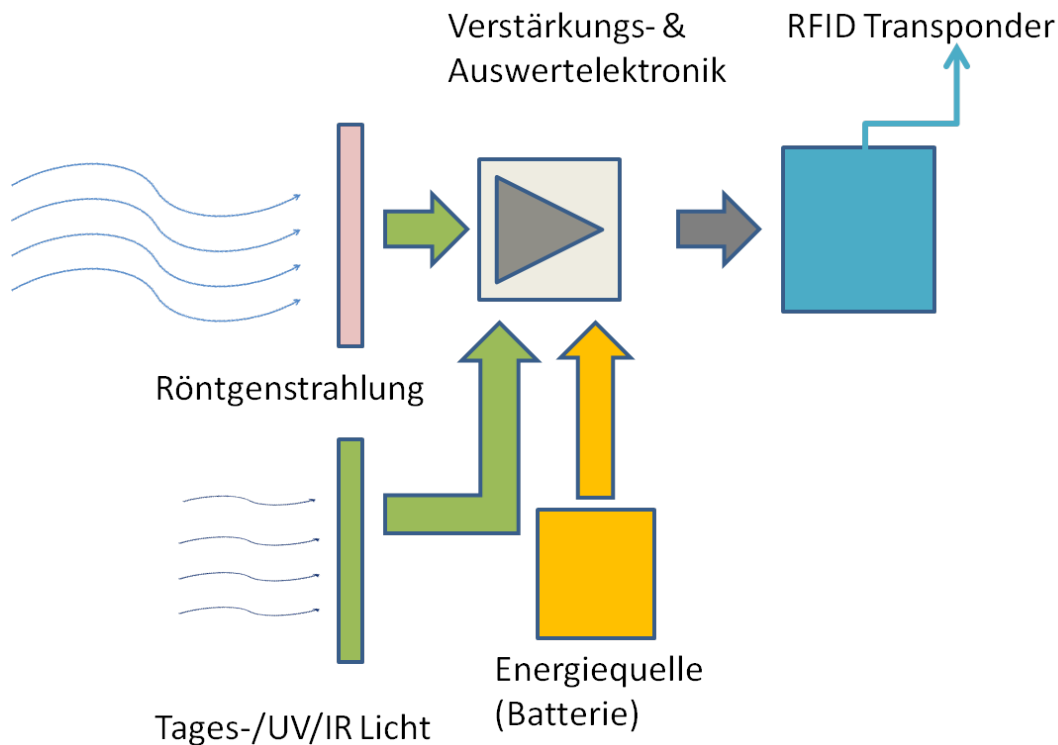


Abbildung 27 *Prinzipskizze der aktiven Variante des Röntgen- und Tageslichtsensors.*

um ein Ansprechen bei zu geringer Strahlendosis zu unterbinden. Der Tageslichtsensor wird mittels zweier Fotodioden und einer OPV-basierten Verstärkerschaltung realisiert. Die Empfindlichkeit kann hier mittels der Höhe der Betriebsspannung eingestellt werden. Zur Bereitstellung der RFID-Funktionalität kommt, wie auch bei der passiven und semi-passiven Variante der kombinierte RFID/Sensor-Interface-Schaltkreis SL900A des Herstellers AMS zum Einsatz. Die RFID Funktionalität dieses Schaltkreises ist auch ohne Energiequelle gegeben, da der Schaltkreis seine zum Senden der Daten benötigte Energie aus dem Hochfrequenzfeld des RFID-Lesegerätes bezieht. Abbildung 28 zeigt den schematischen Schaltplan des kombinierten Roentgen- und Tageslichtsensors. Die Abbildung 29 und Abbildung 30 zeigen das fertige Funktionsmuster. Die Platine hat die Maße 42x55mm. Etwa 50% der Platinenfläche nimmt die RFID Transponder Antenne ein. Das Layout wurde so erstellt, dass die RFID-Antenne möglichst freigestellt ist, um eine sichere Übertragung zu gewährleisten. Während der Strahlungssensor auf der Unterseite der Platine montiert werden kann, müssen die beiden Fotodioden auf der Oberseite der Platine montiert werden, da diese später mit freiem Sichtfeld (durch Aussparungen im Gehäuse) im Frachtgut positioniert werden müssen. Die Bauelemente sind, bis auf die SPI Steckverbindung als SMD ausgeführt. Das Funktionsmuster verfügt zusätzlich über eine LED-Schaltung an den Sensorausgängen zur Visualisierung und Validierung der Funktionsweise. Sie können in der finalen Version entfallen.

Bei der praktischen Erprobung zeigte sich, dass der Strahlungssensor auf das Auslesen des RFID Transponders reagieren kann und unter Umständen eine Durchstrahlung anzeigt. Hier

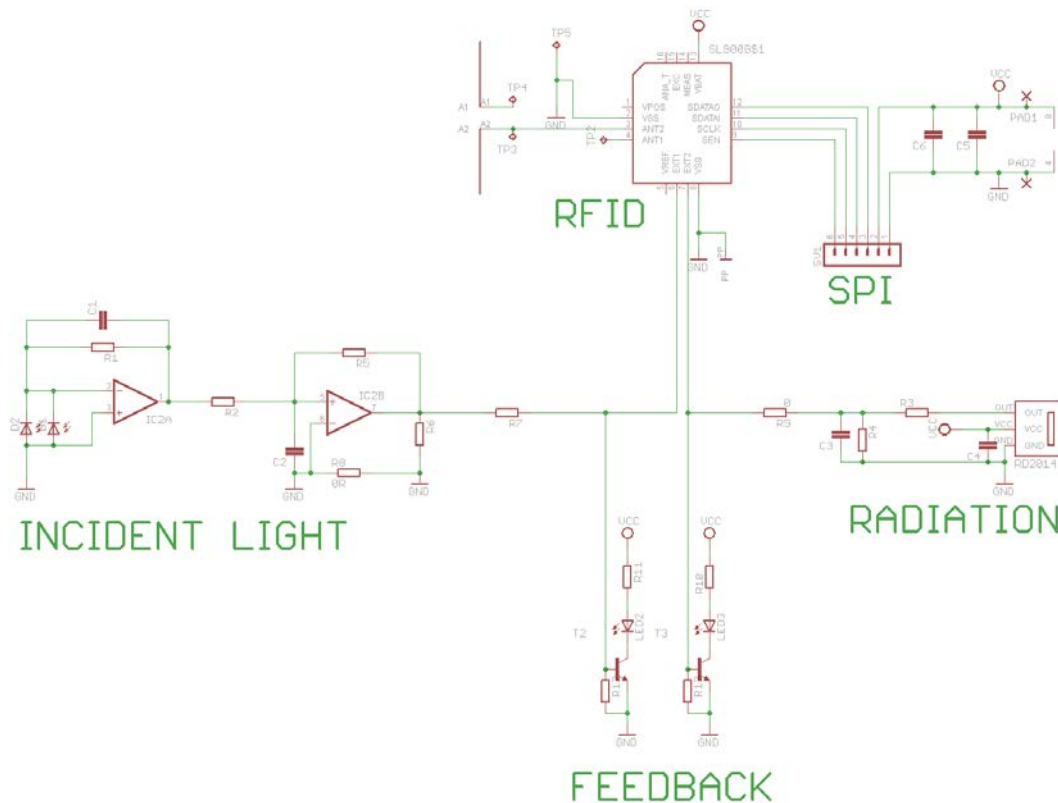


Abbildung 28 Schaltplan aktive Variante des Röntgen- und Tageslichtsensors.

sollte für eine finale Version noch geprüft werden, ob das Schaltungsdesign nochmals angepasst werden muss, oder ob der Sensor selbst anfällig auf das HF Feld des RFID Lesegerätes ist. Sollte letzteres der Fall sein müsste eine zusätzliche HF Abschirmung des Sensors realisiert werden.

Die Anwendung des Röntgen- und Tageslichtsensors ist denkbar einfach. Nach Einbringen des Sensors in das Packstück wird dieser mittels des RFID-Lesegerätes initialisiert. Die entsprechenden Speicher im RFID-Transponder zeigen dann an, dass weder Tageslicht noch Röntgenstrahlung registriert wurden. Der Sensor kann nun zu jedem Zeitpunkt in der Logistikkette ausgelesen werden. Nach einem erfolgten Röntgen der Fracht, übermittelt der Sensor diese Information („Strahlung detektiert“) an ein anfragendes Lesegerät. Eine Manipulation ist hier schwierig, da dazu eine Röntgenquelle nötig ist. Dazu könnte man beispielsweise den Sensor aus dem Packstück entfernen und separat oder mit einem anderen Packstück durch den Frachtscanner befördern. In diesem Fall würde jedoch der Tageslichtsensor reagieren und den Status „Tageslicht detektiert – Packstück geöffnet“ übermitteln. Der Tageslichtsensor selbst reagiert nicht nur auf den sichtbaren Spektralbereich, sondern auch auf den infraroten Spektralbereich. Ein Öffnen des Packstückes bei Infrarotbeleuchtung würde den Tageslichtsensor also aktivieren. Ein Öffnen des Packstückes in Dunkelheit würde den Tageslichtsensor umgehen, jedoch wäre es in diesem Fall schwierig,



Abbildung 29 Das Funktionsmuster der aktiven Variante des Röntgen- und Tageslichtsensors.



Abbildung 30 Funktionsmuster aufgeschraubt

das Packstück zu öffnen, ohne das vom Projektpartner IFF entwickelte RFID-Siegel zu beschädigen. Die Idee und Umsetzung des Röntgen- und Tageslichtsensors wurde beim Deutschen Patentamt unter der Nummer 102015121174.2 („Vorrichtung und Verfahren zum

Überprüfen eines Transportguts auf eine erfolgte Untersuchung mit einer ionisierenden Strahlung“, S. Hohendorf, N. Wrobel, U. Ewert) eingereicht.

Herstellungskosten und Lebenszeit des Licht- und Röntgensensors

Für die in AP 5 durchzuführende Kosten-Nutzen-Analyse war es notwendig, einerseits die Kosten für die Herstellung des Licht- und Röntgensensors, aber auch die Betriebs- und Unterhaltskosten, sowie Lebensdauer und Wartungsintervalle für das Sensorsystem abzuschätzen.

Die passive und semi-passive Variante des Sensors arbeiten mit Szintillatoren. Das Szintillatormaterial verändert sich mit der Zeit durch Feuchtigkeitsdiffusion und verliert an Effektivität. Eine genaue Berechnung dieses Effekts ist schwierig. Da in der derzeitigen Ausbaustufe des Sensors keine quantitative Analyse der Strahlungsdosis vorgesehen ist, sondern lediglich eine qualitative Erfassung, kann davon ausgegangen werden, dass ein beginnendes Nachlassen der Effektivität des Szintillatormaterials zu keiner Einschränkung der Funktionalität des Sensors führt. Dieser Effekt wurde daher vernachlässigt. Die Kosten für das Szintillatormaterial belaufen sich auf 36 € für eine Folie mit den Maßen 90x120mm. In Kristallform als Würfel mit jeweils einer Kantenlänge von 50mm und CsI(NA) (Cäsiumlodid dotiert mit Natrium) als Szintillatormaterial liegen die Kosten bei 2700 €. Die Fotoelemente liegen hierfür bei etwa 50 €.

In der final realisierten aktiven Variante des Röntgensensors kommt der Strahlungssensor RD2014 zum Einsatz. Dieser verwendet eine pin-Diode, ohne zusätzliches Szintillatormaterial. In einer pin-Diode kommt es zu Alterungseffekten durch die ionisierende Strahlung. Diese führen zu erhöhten Leckströmen und damit zu einem stärkeren Rauschen. Ein Signal, welches durch eine geringe Strahlungsdosis erzeugt wird, ist durch das stärkere Rauschen schwieriger zu detektieren. Die Schwelldosis, ab welcher Röntgenstrahlung detektiert wird, steigt dadurch an. Für den Strahlungssensor ist ein Energiebereich von 50keV bis 2000keV angegeben. Die radiografische Untersuchung von Frachtgut erfolgt in der Regel bei 300 bis 450 keV. Es ist also nicht mit einem erhöhten Verschleiß des Sensors zu rechnen. Da auch in der aktiven Variante des Röntgensensors derzeit keine quantitative Erfassung der Strahlungsdosis erfolgt, kann dieser Effekt auch hier vorerst vernachlässigt werden.

Ein weiterer Effekt, welcher durch ionisierende Strahlung verursacht wird, betrifft sowohl die hinter die Szintillatoren der passiven und semi-passiven Variante gesetzten Fotoelemente als auch die Fotoelemente des Tageslichtsensors. Diese sind mit einer Schutzschicht versehen, welche je nach verwendetem Typ aus Glas oder Kunststoff besteht. Hier führt ionisierende Strahlung zu einer Trübung, bzw. Verfärbung und damit einer herabgesetzten Effektivität des Fotoelements. Dieser Effekt hängt von der Energie und Dosisleistung der Strahlungsquelle ab, stellt sich aber in der Regel erst nach mehreren Wochen Dauerbestrahlung ein. Auch dieser Effekt kann damit vernachlässigt werden. Die Fotozelle (Tageslichtsensor) selbst, wird bei einer geringen Betriebsspannung genutzt, ein Verschleiß ist daher nicht zu erwarten.

Für den verwendeten RFID-Transponder SL900A wird keine explizite Lebensdauer angegeben, jedoch wird durch eine interne Logik des Transponders der Lebenszyklus des Schaltkreises bei jedem Lesevorgang neu berechnet. Bei Erreichen der Lebensdauer wird ein Alarm generiert. Dieser kann vom Lesegerät abgefragt werden. Ein plötzlicher Ausfall der RFID-Komponente wurde daher nicht berücksichtigt.

Für die aktive Variante des Röntgensensors kommt eine Batterie als primär die Verwendungsdauer beschränkendes Bauteil zum Einsatz. Derzeit wird eine 3.6V Lithiumbatterie mit 1200mAh eingesetzt. Ausgehend von den Herstellerangaben zum Stromverbrauch der einzelnen Bauteile kann nach Abzug eines Sicherheitsfaktors, um u.a. Fertigungstoleranzen bei der Herstellung der einzelnen Komponenten zu berücksichtigen, von einer kontinuierlichen Laufzeit von 20 Tagen ausgegangen werden. Da der Röntgensensor nicht ununterbrochen im Betrieb ist, wird die tatsächliche Laufzeit wesentlich höher ausfallen. Nach Austausch der Batterie ist der Röntgensensor erneut für die gleiche Laufzeit einsetzbar. Durch Verwendung einer Batterie mit gleicher Spannung und höherer Ladung würde sich die Laufzeit entsprechend erhöhen lassen.

Die reinen Herstellungskosten des aktuell realisierten Labormusters belaufen sich auf etwa 160 Euro. Die teuerste Komponente des Labormusters stellt dabei der Strahlungssensor mit 120 Euro dar. Bei einer produktreifen Weiterentwicklung und dem großflächigen Einsatz des Sensors würden sich die Herstellungskosten jedoch erheblich reduzieren, so dass von einem Preis von ca. 100 Euro auszugehen ist. Eine weitere Reduktion der Herstellungskosten würde sich aus der Eigenentwicklung eines Strahlungssensors ergeben. Die aufgeführte Kostenabschätzung wurde dem Projektpartner Bremer Institut für Produktion und Logistik GmbH (BIBA) zur Verfügung gestellt, welcher die Kosten-Nutzen-Analyse des gesamten ESecLog-Konzeptes durchführte.

1.5 Entwicklung eines automatisierten Bildvergleichs für Durchstrahlungsaufnahmen

Die im Abschnitt 1.3 beschriebenen Lösungen, wie beispielsweise der aus den Bildeigenschaften berechnete Fingerprint sollen die Integrität der Durchstrahlungsaufnahme sicherstellen und eine Manipulation erkennbar machen. Im Laufe des Projektes hat sich das durch den Projektpartner Viaboxx entwickelte zentrale Datenrepository (FFI) für alle entlang der Logistik- und Sicherheitskette anfallende Daten jedoch als besser geeignet für die Überprüfung der Integrität der Daten gezeigt. So können mit einem Röntgenscanner angefertigte Durchstrahlungsaufnahmen in das FFI hochgeladen werden und hier mit allen zugehörigen ESecLog-IDs verknüpft werden. Man kann so jederzeit für ein beliebiges Frachtstück das zugehörige Durchstrahlungsbild anschauen. Einmal in die Datenbank eingepflegt, kann das Röntgenbild mit einer kryptographischen Hashfunktion gegen Manipulation gesichert werden. Ein irgendwie manipuliertes Bild würde so immer in einem vom ursprünglichen Wert verschiedenen Hashwert resultieren, d.h. Manipulationen würden zuverlässig erkannt (ein Weg diesen Sicherheitsmechanismus zu umgehen, besteht natürlich darin, sowohl die Durchstrahlungsaufnahme als auch den kryptographischen Hashwert konsistent zu manipulieren.) Als Erkenntnis kristallisierte sich heraus, dass die eigentliche Manipulation relativ sicher erkannt werden kann, sofern man Szenarien ausschließt, in welchen die in die Logistikkette involvierten Personen, bspw. die LSKK, das System kompromittieren. Die BAM ist an dieser Stelle daher einen Schritt weitergegangen. Bei einer erkennbaren Manipulation muss das Frachtstück zwingend erneut sicher gemacht werden. Das kann eine aufwendige manuelle Inspektion umfassen oder aber ein erneutes Röntgen. Wenn jedoch bei einer Manipulation ein zweites Mal geröntgt werden muss, erscheint es sinnvoll gleich die Manipulation selbst zu erkennen, also durch einen Vergleich der ersten mit

der erneuten Durchstrahlungsaufnahme zu erkennen, wo und was manipuliert wurde. Der anfängliche Schritt, einen Fingerprint auf Grundlage der Durchstrahlungsaufnahme zu erstellen, wurde daher auf einen konkreten Abgleich zweier Durchstrahlungsaufnahmen erweitert.

Diesen Abgleich möglichst automatisiert durchzuführen ist alles andere als trivial. Die wohl größte Schwierigkeit ist intrinsischer Natur. Bei einer Durchstrahlungsaufnahme handelt es sich um eine zweidimensionale Projektion eines dreidimensionalen Volumens. Für einen korrekten Vergleich der Bilder wäre die genaue Kenntnis der dreidimensionalen Geometrie des Frachtstückes und der Durchstrahlungsgeometrie (also die relative Lage von Strahlenquelle, Detektor und Frachtstück zueinander) oder deren Rekonstruktion aus der Durchstrahlungsaufnahme notwendig. Die beiden ersteren liegen nicht vor, letzteres ist mathematisch nicht möglich. Dies bedeutet, dass zwei Durchstrahlungsaufnahmen, also zwei Projektionen eines Volumens ohne Kenntnis der genauen Geometrie nicht eindeutig ineinander überführt werden können. Beide Aufnahmen werden sich jedoch, korrekte Orientierung vorausgesetzt (siehe unten), relativ ähnlich sein. Eine Möglichkeit beide Aufnahmen ineinander zu überführen und so vergleichen zu können, besteht daher darin, eines der Bilder - ohne Kenntnis der korrekten Geometrie - solange zu verformen, bis beide Bilder möglichst gut übereinstimmen. Auch hier ergeben sich Schwierigkeiten, einerseits durch die geometrischer Natur der Problemstellung. Die durchstrahlte Fracht wird in beiden Aufnahmen eine unterschiedliche Lage im Röntgenscanner besitzen, gleiche Gegenstände also eine unterschiedliche Form und Größe besitzen. Ebenso können sich Bestandteile der Fracht durch mechanische Einwirkungen während des Transportes an unterschiedlichen Stellen in beiden Aufnahmen befinden. Andere Schwierigkeiten resultieren aus rein technischen Gegebenheiten. Beide Bilder können in technisch unterschiedlichen Röntgenscannern angefertigt sein. Auflösung, Größe und aus der Durchdringungsfähigkeit des Scanners resultierende Grauwerte desselben Objektes werden daher in beiden Bildern unterschiedlich sein. All dies gilt es möglichst automatisiert zu erkennen und zu kompensieren, um so letztendlich die Regions Of Interest (ROI), also die Positionen innerhalb der Fracht zu lokalisieren, welche Veränderungen aufweisen, also möglicherweise manipuliert wurden. Aus dem vorher gesagten, wird bereits deutlich, dass ein automatisch arbeitender Algorithmus niemals eine zweifelsfreie Identifikation von Manipulationen sicherstellen kann. Ziel war es daher eine optimale Hilfestellung für die letztendlich handelnde und entscheidende LSKK bereitzustellen. Im Folgenden wird das während des Projektes entwickelte Programm für diesen Zweck erklärt und vorgestellt. Die konkrete Implementation erfolgte in der Programmiersprache C++ unter Zuhilfenahme der Programmierbibliothek ITK, da diese viele benötigte Algorithmen bereitstellt. Das Programm benötigt lediglich zwei Durchstrahlungsaufnahmen und eine Konfigurationsdatei, in welcher grundlegende Einstellungen vorgenommen werden. Ausgangspunkt des Programms stellen zwei beliebige Durchstrahlungsaufnahmen derselben Fracht dar. Wie in Abbildung 31 zu erkennen ist, resultiert ein einfaches Differenzbild der beiden Aufnahmen in einem detailreichen und kaum aussagekräftigen Bild. Alle gezeigten Unterschiede resultieren jedoch lediglich durch eine geänderte Aufnahmegeometrie. Unterschiede in der Fracht selbst, sind nicht vorhanden. Dies sollte der entwickelte Algorithmus erkennen.



Abbildung 31 Zwei Durchstrahlungsaufnahmen des gleichen Packstückes (links und mittig). Bei der zweiten Aufnahme wurde das Packstück sowohl in der Höhenlage verändert als auch um 10 Grad in der horizontalen und 2 Grad in der vertikalen Richtung verdreht. Das resultierende Differenzbild ist rechts wiedergegeben.

In einem ersten Schritt werden die Bilder hinsichtlich Größe, Auflösung und Grauwerten angepasst. Dies ist Grundvoraussetzung, um die Bilder überhaupt miteinander vergleichen zu können. Zuerst werden die Bilder invertiert, d.h. Bereiche des Bildes, in welchen keine Absorption der Röntgenstrahlung durch einen Gegenstand erfolgt, sollten die niedrigsten Grauwerte aufweisen. Je nach Aufnahme müssen beide Bilder eventuell logarithmiert werden. Dies ist nötig, um Veränderungen in Bereichen mit relativ gleichförmigen Grauwerten zu erkennen. Anschließend werden beide Bilder auf den vollen Dynamikumfang aufgespreizt und eine Histogrammanpassung durchgeführt. Beides ist nötig, um sicherzustellen, dass objektgleiche Regionen in den Bildern auch bei unterschiedlichen technischen Aufnahmevoraussetzungen, möglichst ähnliche Grauwerte aufweisen, denn die Grauwerte sind eines der zentralen Bewertungskriterien für Algorithmen, welche Bilder aufeinander abbilden ("Registrierung" genannt). Man kann sich dies veranschaulichen anhand eines über- und eines unterbelichteten Bildes in der optischen Fotografie. Nur wenn man beide Bilder in ein jeweils richtig belichtetes Bild überführt, lassen sich die Bilder optimal miteinander vergleichen. Unterschiedliche Grauwerte eines Objektes ergeben sich einerseits durch unterschiedliche Aufnahmeparameter (Strahlenquelle, Detektoren und Abstände können nicht in beiden Aufnahmen als identisch vorausgesetzt werden), aber auch durch unterschiedliche Durchstrahlungslängen innerhalb des gleichen Objektes, welche sich aus einer unterschiedlichen Durchstrahlungsgeometrie in beiden Aufnahmen ergeben, bspw. wenn das Frachtstück verdreht gegenüber der ersten Aufnahme in den Scanner geschoben wird. Im nächsten Schritt wird ein Resampling durchgeführt, d.h. beide Bilder werden auf die gleiche Pixelauflösung umgerechnet, da die für die Registrierung verwendeten Algorithmen die Bilder pixelweise vergleichen. Sind beide Bilder soweit aneinander angepasst, können erste geometrische Unterschiede in den Aufnahmen berücksichtigt werden. Geht man der Einfachheit halber von einem rechteckigen Frachtstück aus, so existieren theoretisch, je nach Lage des Frachtstückes im Scanner, sechs verschiedene Durchstrahlungsrichtungen. In der Praxis kann man jedoch davon ausgehen, dass bei Frachtscannern, im Unterschied zu Gepäckscannern, die Fracht nur zwei verschiedene Orientierungen aufweisen wird. Entweder

wird die Fracht vorwärts oder rückwärts durch den Scanner geschoben. In der Regel wird die Fracht weder auf dem Kopf stehen, noch auf der Seite liegen. Es muss nun festgelegt werden, ob das Frachtstück in beiden Aufnahmen die gleiche Orientierung aufweist, oder eine entgegengesetzte. Bei entgegengesetzter Orientierung muss eines der Bilder an der vertikalen Achse gespiegelt werden. Ein menschlicher Betrachter kann dies meist auf den ersten Blick feststellen. Das Programm weist daher die Option auf, die Orientierung manuell vorzugeben. Eine automatisierte Festlegung der Orientierung ist hingegen deutlich aufwendiger. Werden beide Bilder lediglich, je einmal mit einem an der vertikalen Achse gespiegelten Bild und einmal einem Bild im Originalzustand, statistisch miteinander korreliert, so liefert dies keine verlässliche Aussage. Zu diesem Zeitpunkt im Programmablauf kann sich das interessierende Frachtstück noch an deutlich abweichenden Positionen in beiden Bildern befinden, und somit könnte die Korrelation zwischen unterschiedlich orientierten Bildern stärker ausfallen, als die Korrelation zwischen zwar richtig orientierten, aber unterschiedlich positionierten Bildern. Eine bessere Übereinstimmung der Positionen kann aber erst sinnvoll berechnet werden, wenn die richtige Orientierung der Bilder bekannt ist. Die hier implementierte Methode, die Orientierung der Bilder zu bestimmen, besteht darin, die Kanten oder alternativ die Gradienten im Bild zu bestimmen (siehe Anhang). Anschließend wird das Bild in mehrere kleine Teilbilder zerlegt und jedem dieser Teilbilder die Anzahl der zu einer Kante gehörenden Pixel gezählt. Ebenso werden die mittleren Grauwerte in den Teilbildern der Originalaufnahmen bestimmt. Dies wird bei beiden Bildern F und G und einem gespiegelten Bild G' durchgeführt. Nachfolgend wird die Korrelation zwischen den Teilbildern von F und G, sowie zwischen F und G' berechnet. Eine stärkere Korrelation spricht für eine höhere Wahrscheinlichkeit der Lösung. Dieses Verfahren reagiert jedoch relativ empfindlich auf große leere Bereiche im Bild und auf stark unterschiedliche Objektgrößen in beiden Bildern. Ebenso hat die gewählte Größe der Teilbilder einen Einfluss auf die resultierende Korrelation. Die letztendliche Entscheidung sollte also durch den Bediener getroffen werden. (Es sei an dieser Stelle angemerkt, dass dieses Verfahren natürlich nur bei Aufnahmen im Röntgenbereich funktioniert, da hier die betrachteten Gegenstände „durchsichtig“ sind. Im optischen Wellenlängenbereich würde diese einfache Methode nicht funktionieren, da hier durch die Dreidimensionalität völlig unterschiedliche Verdeckungen der Gegenstände resultieren würden). Eine weitere Vorbereitungsmaßnahme, um auf geometrische Aufnahmebedingungen zurückgehende Bildunterschiede zu minimieren, besteht in der Bestimmung der Ausrichtung des Frachtstückes gegenüber dem Detektor. Bei Dual-View Scannern kann hier auf die von oben gefertigte Durchstrahlungsaufnahme zurückgegriffen werden. Durch eine Kantenbestimmung in den beiden unterschiedlichen von oben gefertigten Aufnahmen kann hier der Winkelunterschied bestimmt werden. Eines der Bilder wird nun um den sich aus dem Winkel ergebenden Faktor gestreckt, bzw. gestaucht.

An dieser Stelle sind die Vorbereitungen beider Bilder für den eigentlichen Bildvergleich, d.h. Registrierung der Bilder, abgeschlossen. Um Objekte nun in einem Bild auf dieselben Objekte im anderen Bild abzubilden, muss eines der beiden Bilder einer geometrischen Transformation unterzogen werden. Ein Pixel im Bild F mit den Koordinaten $\langle x,y \rangle$ wird auf eine Position im Bild G mit den Koordinaten $\langle x',y' \rangle$ abgebildet. Dies geschieht für jeden Pixel des Bildes F. Da die Koordinatentransformationen im allgemeinen nicht pixelgenau abbilden, also die neue Position eines Pixels nicht exakt auf der Position eines Pixels im anderen Bild liegt, muss zur

Berechnung des neuen Pixelwertes natürlich zwischen den ihn schneidenden Pixeln interpoliert werden. Anschließend werden die Unterschiede zwischen beiden Bildern mittels einer Metrik bewertet (siehe Anhang) und die Transformationsparameter durch ein Optimierungsverfahren (siehe Anhang) angepasst. Dieser Vorgang wird solange wiederholt, bis die Bewertung einem vorgegebenen Wert entspricht oder die Verbesserung der Bewertung in jedem Schritt ein vorgegebenes Maß unterschreitet. Das Vorgehen ist schematisch vorgestellt in Abbildung 32. Die Transformation selbst sollte hinreichend einfach sein, um durch ein Optimierungsverfahren verbessert zu werden, aber auch hinreichend komplex, um die aus den unterschiedlichen Aufnahmebedingungen resultierenden Unterschiede zwischen den Bildern ausgleichen zu können. Da es hier keinen befriedigenden Kompromiss gibt, wurde ein dreistufiges Verfahren implementiert, welches zuerst durch einfache Transformationen mit

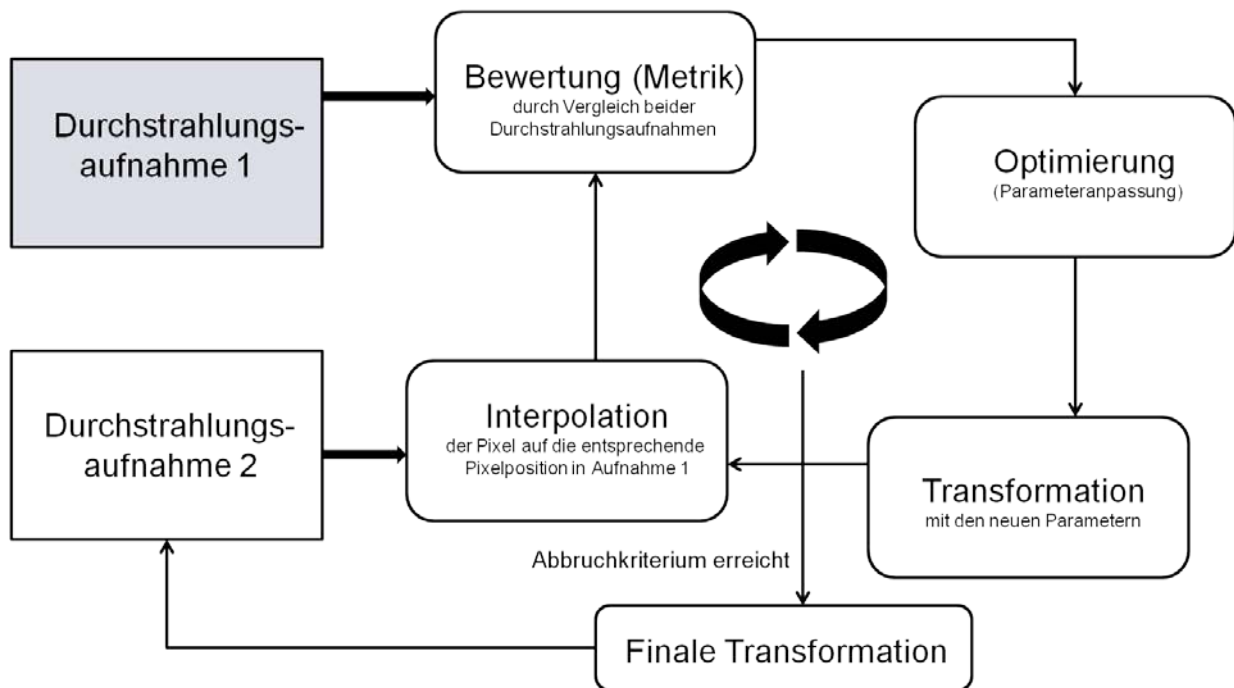


Abbildung 32 Schematische Darstellung des Algorithmus zum Vergleich zweier Durchstrahlungsaufnahmen. Dieser Vorgang wird für jede der drei aufeinanderfolgenden Transformationen wiederholt.

wenig Freiheitsgraden große Unterschiede zwischen den Bildern auszugleichen sucht, und dann durch komplexer werdende Transformationen die detaillierteren Unterschiede auszugleichen sucht.

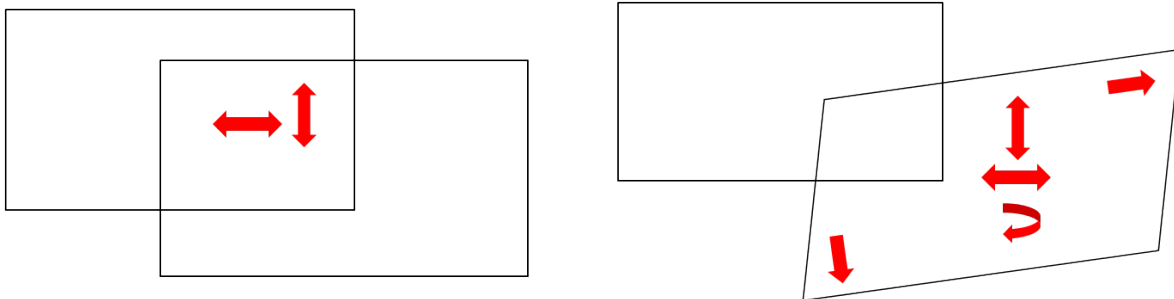


Abbildung 33 Veranschaulichung von Translation (links) und affiner Transformation (rechts). Bei der Translation wird eines der Bilder lediglich in x- bzw. y-Richtung verschoben, um eine möglichst optimale Überlagerung beider Bilder zu finden. Eine affine Transformation umfasst zusätzlich zur Translation noch Transvektion (Scherung), Rotation und Skalierung (Dehnung, bzw.. Stauchung) des Bildes.

Im zweiten Schritt wird eine einfache Translation als Transformation angewandt (siehe Abbildung 33 links). Es erfolgt also ein Verschieben des gesamten Bildes, dies bedeutet ein Pixel mit der Position $\langle x, y \rangle$ in einem Bild, wird durch Verschieben um den Offset Δx und Δy , also durch Verschieben in horizontaler und vertikaler Richtung auf die neue Position $\langle x + \Delta x, y + \Delta y \rangle$ abgebildet. Die Verschiebung ist für alle Pixel identisch. Die Größe des Offsets wird anfänglich vorgegeben, im weiteren Verlauf dann aber durch den Algorithmus selbstständig angepasst. Um die Berechnung zu beschleunigen wird dieses Verfahren mehrstufig ausgeführt. Zum einen wird die Auflösung beider Bilder in mehreren Schritten künstlich reduziert, es fließen also weniger Pixel in die Berechnung ein. Sind die in der Auflösung reduzierten Bilder optimal registriert, wird der Vorgang mit den nächsthöher aufgelösten Bildern wiederholt. Zum anderen wird nicht das ganze Bild für die Berechnung herangezogen, sondern nur zufällig ausgewählte Teilbilder. Da die Transformation unabhängig von der absoluten Lage eines Pixels ist, müssen somit nicht alle Pixel transformiert und bewertet werden. Für die Optimierung kommt ein Gradientenverfahren zum Einsatz, als Metrik wird die Transinformation beider Bilder herangezogen (siehe Anhang). In diesem Schritt werden die groben Unterschiede zwischen beiden Aufnahmen herausgerechnet. Das Frachtstück befindet sich anschließend in beiden Aufnahmen an ungefähr der gleichen Position (siehe Abbildung 34). Bei wenig komplexen Aufnahmen kann dieser Schritt auch entfallen. Stattdessen wird der Schwerpunkt der Grauwerte beider Bilder berechnet und in Übereinstimmung gebracht (siehe Anhang).



Abbildung 34 Beide Durchstrahlungsaufnahmen im gleichen Koordinatensystem nach der Translation. Rechts ist das sich ergebende Differenzbild gezeigt.

Im nächsten Schritt wird eine affine Transformation, also eine deutlich komplexere Transformation durchgeführt (siehe Abbildung 33 rechts). Zusätzlich zur Translation umfasst die affine Transformation Rotation, Dehnung, bzw. Stauchung des Bildes und Scherung (Transvektion). Rotationswinkel, Scherungswinkel, Verschiebung in x und y Richtung und Skalierungsfaktor sind hierbei freie Parameter, welche angepasst werden müssen. Als Optimierungsverfahren kommt an dieser Stelle ein konjugiertes Gradientenverfahren zum Einsatz, der Bewertung der Transformationsparameter liegt wiederum die Transinformation zugrunde. Wie schon bereits im vorhergehenden Schritt wird die affine Transformation mehrstufig ausgeführt, beginnend mit einer künstlich reduzierten Auflösung. Bei einer affinen Transformation können sich absolute Position (Translation), Lage (Rotation), Größe (Dehnung/Stauchung) und Winkel (Scherung) eines Objektes ändern, jedoch bleiben Linearität und Parallelität erhalten.

Mithilfe der affinen Transformation kann man also nur einen Teil der Unterschiede in den Durchstrahlungsaufnahmen kompensieren, siehe Abbildung 35. Größtes Problem hierbei ist, dass alle Pixel, also alle Teile der Aufnahme der gleichen Transformation unterzogen werden. Auf diese Art können nur globale Änderungen beschrieben werden. Um lokale Änderungen zu beschreiben, also Änderungen in nur einem Teil des Bildes, wird für den folgenden Schritt eine andere Art der Transformation benötigt. Diese Transformationen gehören zur Klasse der sogenannten nicht-starren oder deformierenden Transformationen. Sie ermöglichen es, in verschiedenen Regionen des Bildes unterschiedlich starke Veränderungen abzubilden, unabhängig von den Veränderungen in anderen Teilen des Bildes.

Im folgenden Schritt wird zu diesem Zweck über das zu deformierende Bild ein Deformationsfeld gelegt (siehe Abbildung 36). Dieses Deformationsfeld kann als Gitter gedacht werden, welches über dem Bild liegt. An den einzelnen Knotenpunkten des Gitters bewirken nun Deformationskräfte eine Verschiebung des Knotenpunktes in x- und y-Richtung. Anhand des sich daraus ergebenden neuen Deformationsfeldes wird die Verschiebung der einzelnen Bildpixel berechnet. Die notwendige Interpolation zwischen den Knotenpunkten



Abbildung 35 Beide Durchstrahlungsaufnahmen nach erfolgter affiner Transformation. Rechts das resultierende Differenzbild.

geschieht mittels B-Splines, da sie den Rechenaufwand minimieren. Eine ausführliche Darstellung ist im Anhang geben. Die Deformationskräfte an den Knotenpunkten bilden dabei die zu optimierenden Parameter, welche die notwendige Transformation zwischen den beiden Bildern ergeben. Dies geschieht mittels des BFGS-Verfahrens (siehe Anhang). Die Bewertung der Übereinstimmung beider Bilder erfolgt auch hier mittels der Transinformation (siehe Anhang).

Die Auflösung des Deformationsgitters, also die Anzahl der Knotenpunkte ist bei diesem Vorgehen ein entscheidender Parameter. Während eine zu grobe Auflösung, also nur wenige Knotenpunkte, wiederum nur globale Änderungen des Bildes abbilden können, führt eine zu hohe Auflösung, also viele Knotenpunkte, zu einer großen Anzahl von zu variierenden Parametern und damit zu einem deutlich erhöhten Rechenaufwand. Deshalb kommt auch hier wieder ein mehrstufiges Verfahren zum Einsatz, welches mit einem Deformationsfeld mit

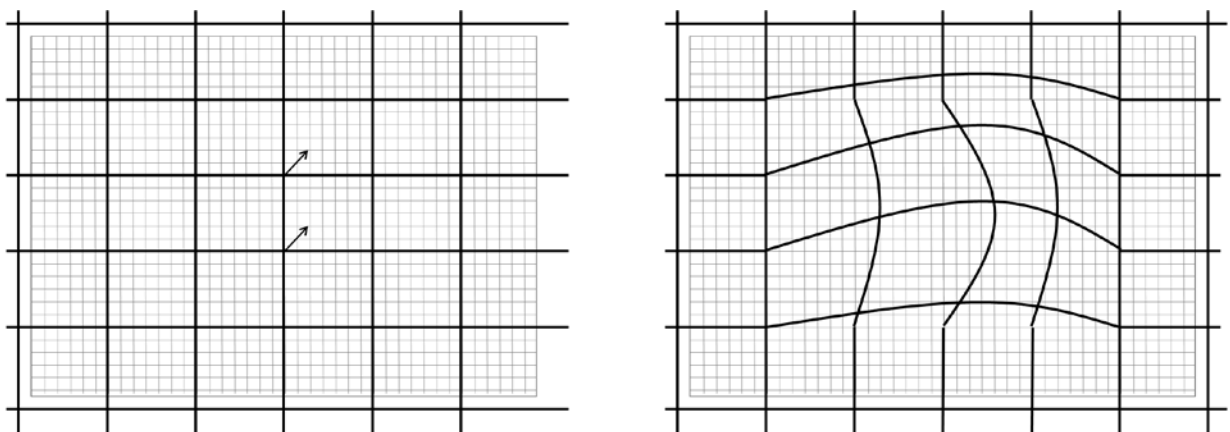


Abbildung 36 Schematische Darstellung der Deformation eines Bildes. Über das Pixelgitter des Bildes (grau) wird ein Deformationsfeld gelegt (schwarz). An den Knotenpunkten (Kontrollpunkten) des Deformationsfeldes wirken Deformationskräfte, welche das Gitter verformen. Daraus resultiert die Verschiebung der einzelnen Bildpixel.

wenigen Knotenpunkten beginnt, um globale Änderungen im Bild zu berücksichtigen, und anschließend in mehreren Schritten die Anzahl der Knotenpunkte erhöht, um auch lokale Änderungen transformieren zu können. Alle drei vorgestellten Transformationsschritte werden parallel mit den Gradientenbildern durchgeführt, da dies bei bestimmten Bildeigenschaften das Ergebnis erheblich verbessert. Die aus den Gradientenbildern erhaltenen Transformationsparameter werden dann auf die ursprünglichen Durchstrahlungsaufnahmen angewandt.



Abbildung 37 Beide Durchstrahlungsaufnahmen nach erfolgter B-Spline Deformation. Rechts das resultierende Differenzbild.

Nach diesem Schritt (siehe Abbildung 37) wird nun eine weitgehende Übereinstimmung zwischen beiden Durchstrahlungsaufnahmen erreicht. Dennoch beinhaltet ein Differenzbild, je nach Komplexität der beiden Durchstrahlungsaufnahmen, immer noch viele Unterschiede, welche aus einer nicht exakten Überlagerung resultieren. Diese meist kleinskaligen Differenzen werden im letzten Schritt durch eine Filterung minimiert. Dazu werden zwei morphologische Filter, Erosion und Dilatation genannt, auf das resultierende Differenzbild angewendet (siehe Anhang). Sie entfernen einerseits kleine, und damit nicht relevante Strukturen aus dem Bild, andererseits fügen sie unterbrochene Strukturen zu einem ganzen zusammen. Das so gefilterte Differenzbild wird dem Originalbild überlagert und markiert die sogenannten „regions of interest“ in der Durchstrahlungsaufnahme, also jene Regionen in denen eine Änderung festgestellt wurde.

Auch bei einem Vergleich zweier Durchstrahlungsaufnahmen eines identischen Packstückes wird eine vollkommene Übereinstimmung natürlich so gut wie nie erreicht, ein vollständig automatisch ablaufender Bildvergleich ist daher realitätsfern. Dies liegt in der Natur der Durchstrahlungsaufnahme als zweidimensionale Projektion eines dreidimensionalen Volumens begründet. Die Kennzeichnung der für den Algorithmus nicht auflösbaren Unterschiede beim Vergleich zwischen beiden Durchstrahlungsaufnahmen, und deren Markierung im Röntgenbild stellt gerade bei komplexen Szenarien jedoch eine deutliche Hilfestellung für die LSKK dar (siehe Abbildung 38 und Abbildung 39), da nur noch bestimmte Regionen im Bild

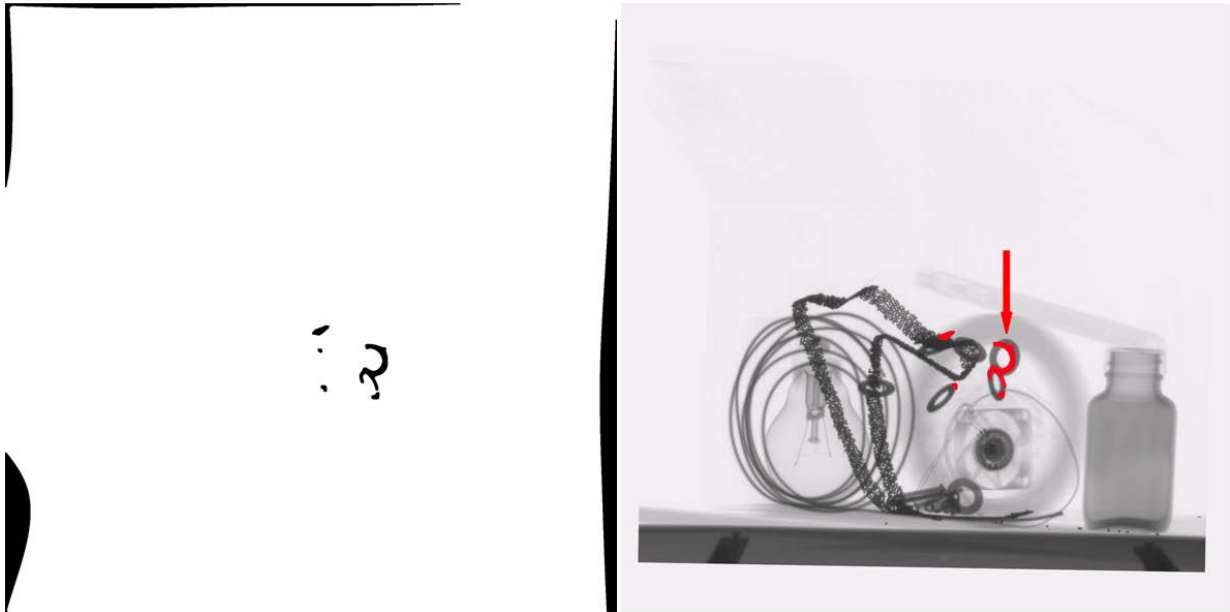


Abbildung 38 Ergebnis des Bildvergleichs. Links resultierendes Differenzbild nach Filterung (siehe Text). Rechts Originalaufnahme mit den rot markierten „regions of interest“, welche durch die LSKK zu prüfen sind. Da es sich bei beiden Aufnahmen um ein identisches Packstück handelte, resultieren die verbleibenden Unterschiede hier aus der unterschiedlichen Aufnahmegeometrie – wie sich leicht erkennen lässt.

genauer betrachtet werden müssen. Hier lässt sich dann meist auf den ersten Blick feststellen, ob es sich um eine geometrisch begründete Diskrepanz zwischen beiden Aufnahmen handelt (Abbildung 38), oder ob eine tatsächliche Änderung vorliegt (Abbildung 39). Diese tatsächliche Änderung muss nicht zwangsläufig auf eine Manipulation zurückzuführen sein. Auch eine physische Änderung des Aufbaus des durchstrahlten Frachtstückes führt zu Unterschieden. Eine mögliche Ursache könnte die Verschiebung der Bestandteile eines Frachtstückes, und damit eine Änderung der Geometrie, darstellen. Diese Ursachen lassen sich durch einen menschlichen Betrachter jedoch leicht von tatsächlichen Manipulationen unterscheiden.

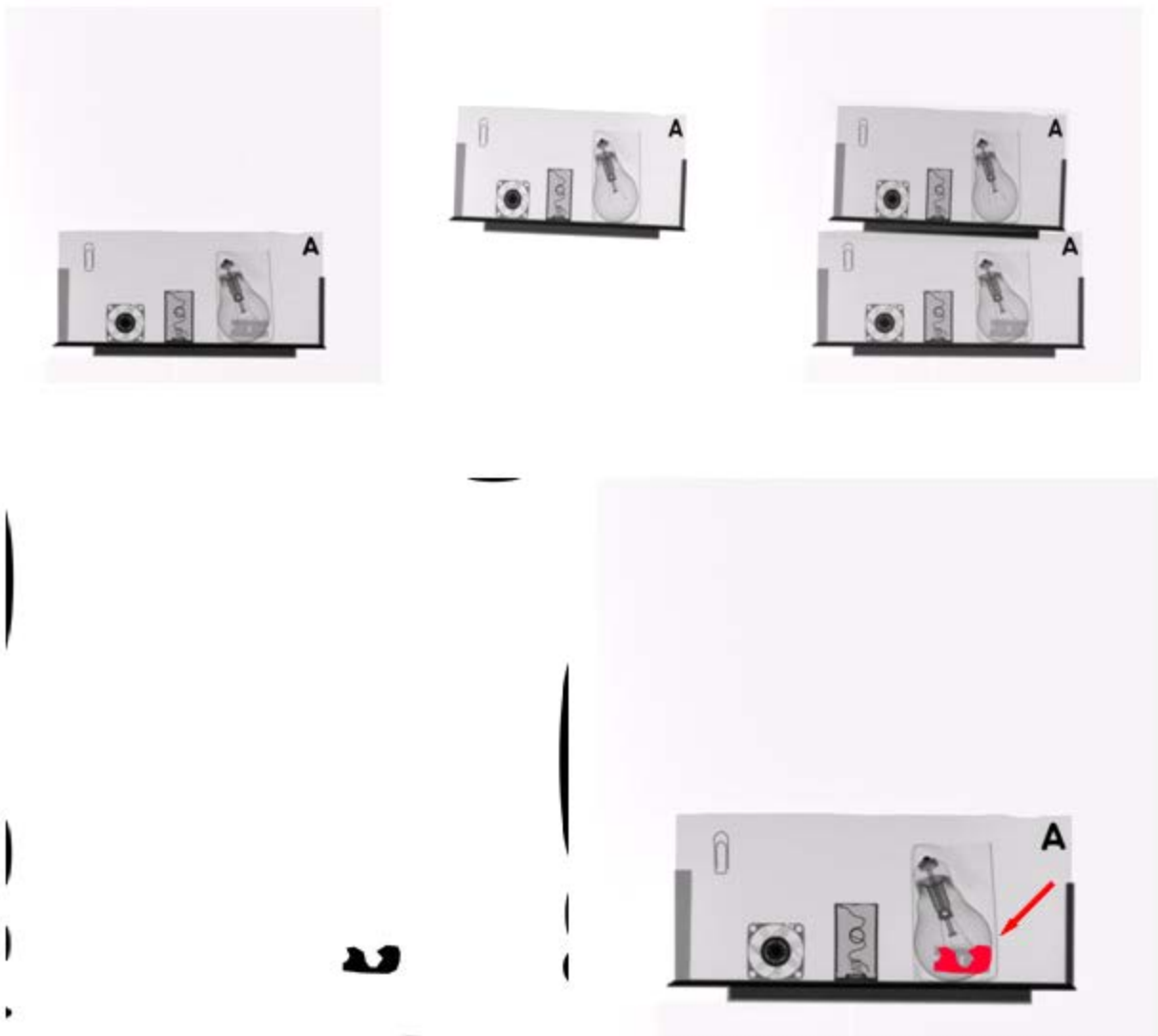


Abbildung 39 Obere Reihe: zwei Durchstrahlungsaufnahmen eines Packstückes (mit zwischenzeitlich geändertem Inhalt) an unterschiedlicher Position und mit unterschiedlichem Durchstrahlungswinkel, sowie das sich ergebende Differenzbild. Untere Reihe: resultierendes Differenzbild nach erfolgtem Bildvergleich und markierte „region of interest“ im Originalbild.

1.5 Sicherheitsbewertung

Mit den im vorhergehenden Kapitel vorgestellten Lösungen wurden die Arbeitspakete 3 und 4 erfolgreich und wie geplant abgeschlossen. Die gesteckten Ziele für ein Röntgensiegel/marker zur Erhöhung der Sicherheit und für eine Bildauswertung zur möglichen Erkennung von Manipulationen wurden erreicht. Der Arbeitsschwerpunkt der BAM in AP 5, bestand in der Bewertung der neuentwickelten ESecLog-Technologien. Die Fragestellung war hier vor allem, ob der – gegenüber der derzeitigen Logistikkette – erhöhte Aufwand auch zu einer größeren

Sicherheit beiträgt, und ob dieser wirtschaftlich tragbar ist. Zentraler Punkt dieser Analyse war, ob ein potentiell gefährliches, also ein möglicherweise manipuliertes Frachtstück zuverlässig identifiziert werden kann. Der klassische Ansatz einer technologischen Sicherheitsbewertung basiert auf einer *Probability Of Detection* Bestimmung (POD), also einer Bestimmung mit welcher Wahrscheinlichkeit ein Gefahrenmerkmal erkannt werden kann. Darauf aufbauend kann eine sogenannte *Receiver Operating Characteristic* (ROC) abgeleitet werden. Beide Methoden wurden ursprünglich im Rahmen der Signaltheorie entwickelt und werden heute umfangreich beispielsweise in der zerstörungsfreien Prüfung angewandt. Ergebnis beider Methoden ist eine Aussage über die Detektionswahrscheinlichkeit eines bestimmten Merkmals. Dies ist beispielhaft in Abbildung 40 dargestellt. Ausgehend von der zentralen

ROC: Receiver (Relative) Operating Characteristic

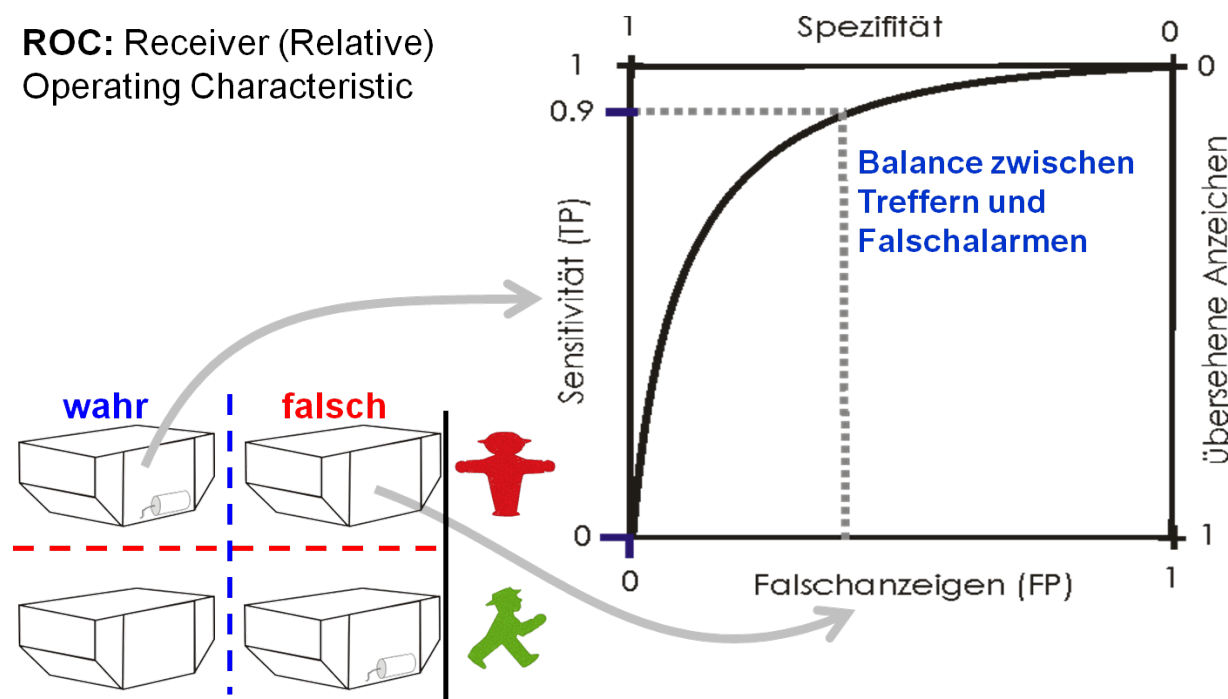


Abbildung 40 Receiver Operating Characteristic (ROC). Bei der Beurteilung des Packstückes existieren vier Möglichkeiten (links). Jeweils zwei sind richtig oder falsch. Das Verhältnis zwischen richtigen und falschen Entscheidungen wird durch die ROC-Kurve (rechts) beschrieben.

Fragestellung – der Erkennung eines manipulierten Frachtgutes – existieren für die Erkennung vier Möglichkeiten. Ein Frachtstück kann manipuliert worden sein. Dies wird entweder korrekt erkannt (wahr) oder nicht korrekt erkannt (falsch). Ebenso kann ein unmanipuliertes, und damit sicheres Frachtstück korrekterweise als unmanipuliert (wahr) oder aber als manipuliert (falsch) erkannt werden. Da keine Technik fehlerfrei arbeitet, bedeutet eine möglichst sichere Erkennung von manipulierten Frachtsendungen auch immer eine höhere Anzahl an fälschlicherweise als manipuliert erkannten Sendungen, einen sogenannten Fehlalarm. Dies ist exemplarisch im rechten oberen Diagramm in Abbildung 40 veranschaulicht. Ein Fehlalarm

bedeutet, dass eine unmanipulierte Luftfracht der gleichen Behandlung wie eine manipulierte Fracht unterzogen wird. Dies verursacht Kosten, welche aber nicht zur Erhöhung der Sicherheit beitragen. Eine Verringerung der Anzahl der Fehlalarme kann durch ein Ändern der Entscheidungsschwelle der jeweiligen Technik erreicht werden. Dies verringert zwar die Kosten, da weniger Frachtstücke den Prozess einer manipulierten Fracht durchlaufen müssen, gleichzeitig sinkt aber auch die Sicherheit der Prozesskette, da als Folge der verringerten Fehlalarmrate auch weniger tatsächlich manipulierte Frachtstücke als manipuliert erkannt werden. Eine monetäre Quantifizierung der Folgen eines nicht detektierten manipulierten Frachtstückes, also im ungünstigsten Fall der Absturz eines Flugzeuges durch eine USBV, war Gegenstand vieler Diskussionen zwischen den Projektpartnern, konnte aber nicht abschließend beantwortet werden.

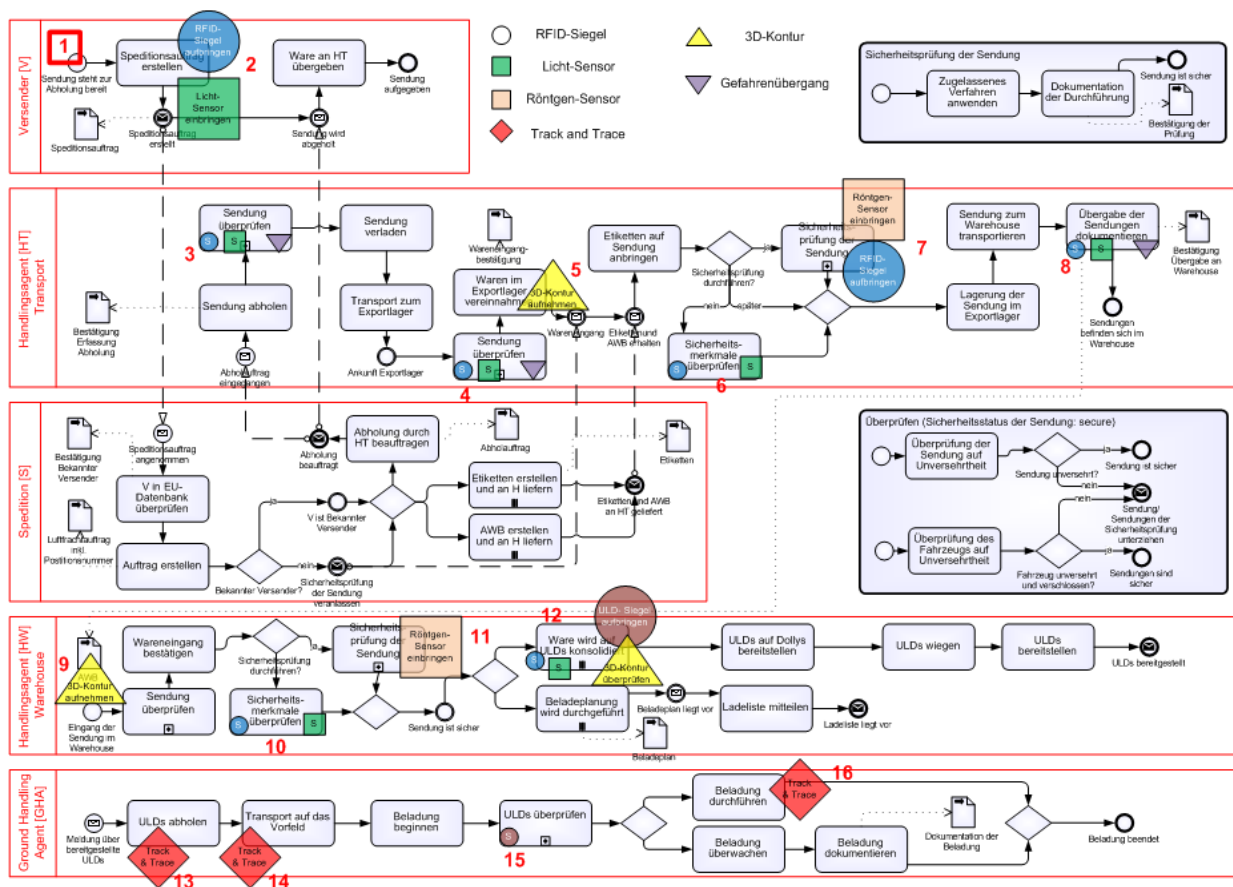


Abbildung 41 Die ESecLog-Prozesskette (Flussdiagramm erstellt vom BIBA) und der Einsatz der verschiedenen ESecLog-Technologien entlang der Prozesskette.

Der ursprüngliche Plan der BAM sah vor, die einzelnen im Projekt entwickelten ESecLog-Technologien hinsichtlich ihrer Zuverlässigkeit und damit des potentiellen Sicherheitsgewinns mithilfe der oben erwähnten Methoden (POD/ROC) zu bewerten. Dazu sind jedoch zahlreiche physikalische Messungen eines konkreten technischen Vorgangs notwendig. Durch die agile

Entwicklung der einzelnen Technologien der jeweiligen Projektpartner waren jedoch keine zu einem bestimmten Zeitpunkt dauerhaft belastbaren Ergebnisse zu erwarten. Jede Bewertung wäre hinter der tatsächlichen Entwicklung der ESecLog-Technologien zurückgeblieben. Der oben beschriebene Ansatz wurde daher abgewandelt und erweitert. Die Bewertung der gesamten ESecLog-Prozesskette erfolgt bei diesem Ansatz ebenfalls mithilfe statistischer Methoden. Zu diesem Zweck wurde an der BAM eine Software entwickelt, welche aus den Fehlerraten und Detektionswahrscheinlichkeiten der einzelnen Technologien der ESecLog-Prozesskette einen Sicherheitsstatus für das jeweilige Frachtstück berechnet.

Grundlage bildet dabei der ESecLog-Fracht-Fingerprint, also die Summe aller bisher aufgetretenen Events im Ablauf der ESecLog-Prozesskette. Dabei kann vorgegeben werden, welchem Event in der Prozesskette welche Bedeutung beigemessen werden soll, und bei welchem berechneten Sicherstatus das Frachtstück als manipuliert eingestuft und somit einer kostentreibenden Sonderbehandlung zugeführt wird. Unabhängig vom jeweiligen Entwicklungsstand der einzelnen Technologien kann somit eine Aussage getroffen werden, wie sich die im Projekt entwickelte ESecLog-Prozesskette auf die Sicherheit und die Kosten-Nutzen-Relation auswirkt.

Konkret bedeutete dieses Vorgehen, dass jede einzelne Technologie, welche in der ESecLog-Prozesskette zum Einsatz kommt, hinsichtlich ihrer möglichen Fehlerquellen analysiert wurde. Die Prozesskette selbst ist in Abbildung 41 dargestellt. Das Flussdiagramm wurde vom Projektpartner BIBA erstellt. An bestimmten Punkten im logistischen Ablauf kommen die einzelnen ESecLog-Technologien zum Einsatz und bewirken eine Zustandsänderung des ESecLog-Fingerprints. Das Vorgehen ist in Abbildung 42 exemplarisch für das vom Projektpartner IFF entwickelte RFID-Siegel dargestellt. Hier sind folgende Fehlalarme denkbar, welche bei einem *unmanipuliertem* Frachtstück auftreten können:

1. „Siegel nicht erkannt“: Das RFID-Siegel wird vom Lesegerät nicht detektiert. Dies kann an den Einstellungen des Lesegerätes selbst liegen, beispielsweise könnte die Leseleistung zu gering sein. Das Siegel selbst ist in diesen Fall jedoch intakt. Ein weiterer Grund für die Nichtdetektion des Siegels ist eine ungünstige Position des Siegels, so dass es nicht vom Lesegerät erfasst werden kann. Das Siegel selbst ist in diesem Fall ebenfalls intakt. Ein weiterer Grund für das Event „Siegel nicht erkannt“ besteht in einem defekten und damit nicht lesbarem Siegel. Ebenso denkbar ist ein fehlendes Siegel, beispielsweise durch mangelnde Befestigung und damit Verlust während des Transportes.
2. „Siegelbruch nicht erkannt“: Das RFID-Siegel wird vom Lesegerät erkannt und ausgelesen. Das Siegel übermittelt den Status „Siegel intakt“, obwohl das Siegel gebrochen ist. Denkbare Ursachen sind hier ein defektes Siegel, aber auch ein fehlerhaftes Auslesen durch den RFID-Reader.
3. „Siegelbruch detektiert“: Das RFID-Siegel wird vom Lesegerät erkannt und ausgelesen. Das Siegel übermittelt den Status „Siegel gebrochen“. Einerseits könnte hier wieder eine Falscherfassung vorliegen durch ein defektes Siegel oder einen

fehlerhaften Lesevorgang. Andererseits könnte es sich auch um einen tatsächlichen Siegelbruch handeln, der jedoch nicht auf eine Manipulation, sondern auf eine Beschädigung des Siegels während des Transportes zurückgeht.

An diesem Beispiel wird auch bereits die Schwierigkeit deutlich, eine fundierte POD/ROC abzuleiten, bei einer noch nicht produktionsreifen Technologie. Konkrete Detektionswahrscheinlichkeiten würden in diesem Fall beispielsweise umfangreiche praktische Simulationen von Auswirkungen der Transportvorgänge auf das Siegel erfordern. Ebenso müssten umfangreiche Testläufe für die RFID-Bulkerfassung einer Packstückpalette (mit jeweils variierendem Aufbau) durchgeführt werden. Bei einer technischen Änderung, bzw. Weiterentwicklung des Siegels, wie sie bei allen Einzeltechnologien während der Projektlaufzeit vorkam, wären diese Daten nicht mehr weiter verwendbar, und die Simulationen müssten erneut durchgeführt werden.

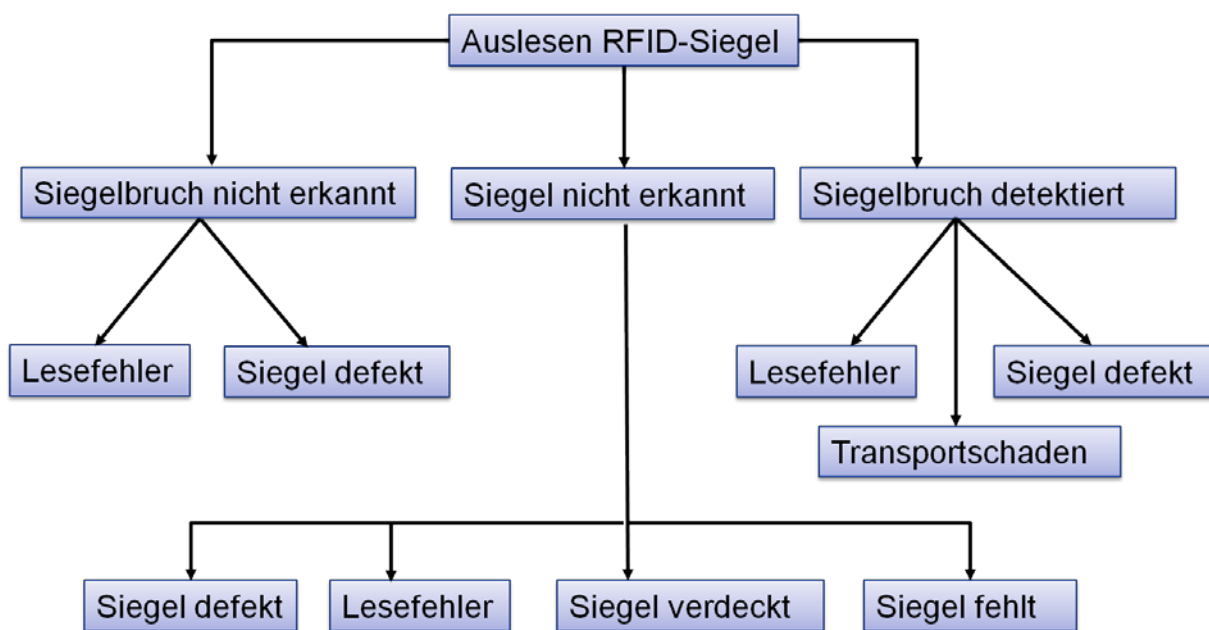


Abbildung 42 Analyse möglicher Fehler der ESecLog-Technologien am Beispiel des Lesens des vom IFF entwickelten RFID-Siegels.

Daher wurden für die Wahrscheinlichkeiten der einzelnen Fehlerquellen auf langjähriger Erfahrung beruhende Schätzwerte angenommen. Jeder Projektpartner hat dabei seine Technologie (sofern zutreffend) auf mögliche Fehlerquellen untersucht, und eine Schätzung der Auftretenswahrscheinlichkeiten vorgenommen. Das an der BAM entwickelte Programm „ESecLog Scoremeter“ (siehe Abbildung 44) benutzt diese Fehlerwahrscheinlichkeiten, um eine Gesamtwahrscheinlichkeit für das Auftreten eines bestimmten Events in der ESecLog-Prozesskette zu berücksichtigen (siehe Abbildung 43). Dabei wird jede Fehlerquelle zusätzlich mit einer Gewichtung versehen. Diese Gewichtung spiegelt die Bewertung dieses Fehlers

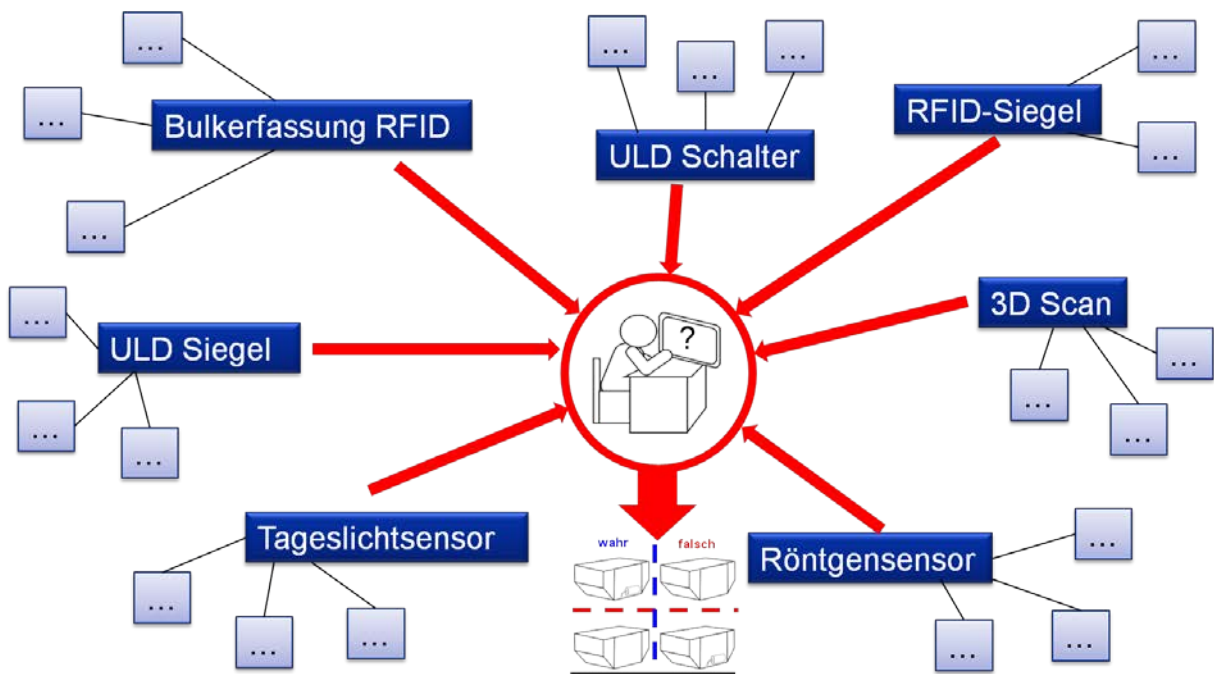


Abbildung 43 Die mögliche Fehlerquellen der ESecLog-Prozesskette müssen bei der Entscheidung „sichere/unsichere Fracht“ berücksichtigt werden..

unter dem Sicherheitsaspekt wider. So kann das Auftreten eines Siegelbruchs außerhalb des Sicherheitsbereichs am Flughafen höher bewertet werden, als ein Siegelbruch innerhalb des Sicherheitsbereichs. Dies bildet die leichtere, und damit wahrscheinlichere Manipulation eines Frachtstückes außerhalb des Sicherheitsbereiches ab. Aus den einzelnen Wahrscheinlichkeiten wird unter Berücksichtigung ihrer eventuellen gegenseitigen Abhängigkeiten und ihres Gewichtungsfaktors eine Gesamtwahrscheinlichkeit berechnet. Diese ergibt einen Scoringfaktor, welcher das Packstück auf einer Skala von 0 (Status sicher) bis 100 (Status unsicher) einordnet (siehe Abbildung 44). Die Entscheidungsschwelle, ab welchem Scoringfaktor das Packstück einer erneuten Überprüfung unterzogen werden muss, bleibt dabei frei variierbar. Dieses Programm kann problemlos in das vom Projektpartner Viaboxx entwickelte Fracht-Fingerprint-Informationssystem (FFI) integriert werden, so dass jederzeit der zu einer bestimmten ESecLog-ID gehörende Sicherheitsstatus einsehbar ist, bzw. bei Erreichen eines bestimmten Wertes des Scoringfaktors ein automatischer Alarm generiert wird. Obwohl die Quantifizierbarkeit des Sicherheitsgewinns, bzw. der anfallenden Kosten durch notwendig werdende Sicherheitsüberprüfungen damit vorerst abhängig von geschätzten Fehlerwahrscheinlichkeiten und subjektiven Gewichtungen bleibt, zeigen umfangreiche Beispielszenarien jedoch einen deutlichen Effekt der im Projekt entwickelten ESecLog-Prozesskette. So wird durch die Anwendung und Kombination mehrerer Sicherheitsmerkmale (RFID-Siegel, 3D-Scan, Vorfeld-Tracking, Lichtsensor, Röntgensensor) selbst bei relativ großen Fehleranfälligkeiten einer einzelnen Technologie eine relativ sichere

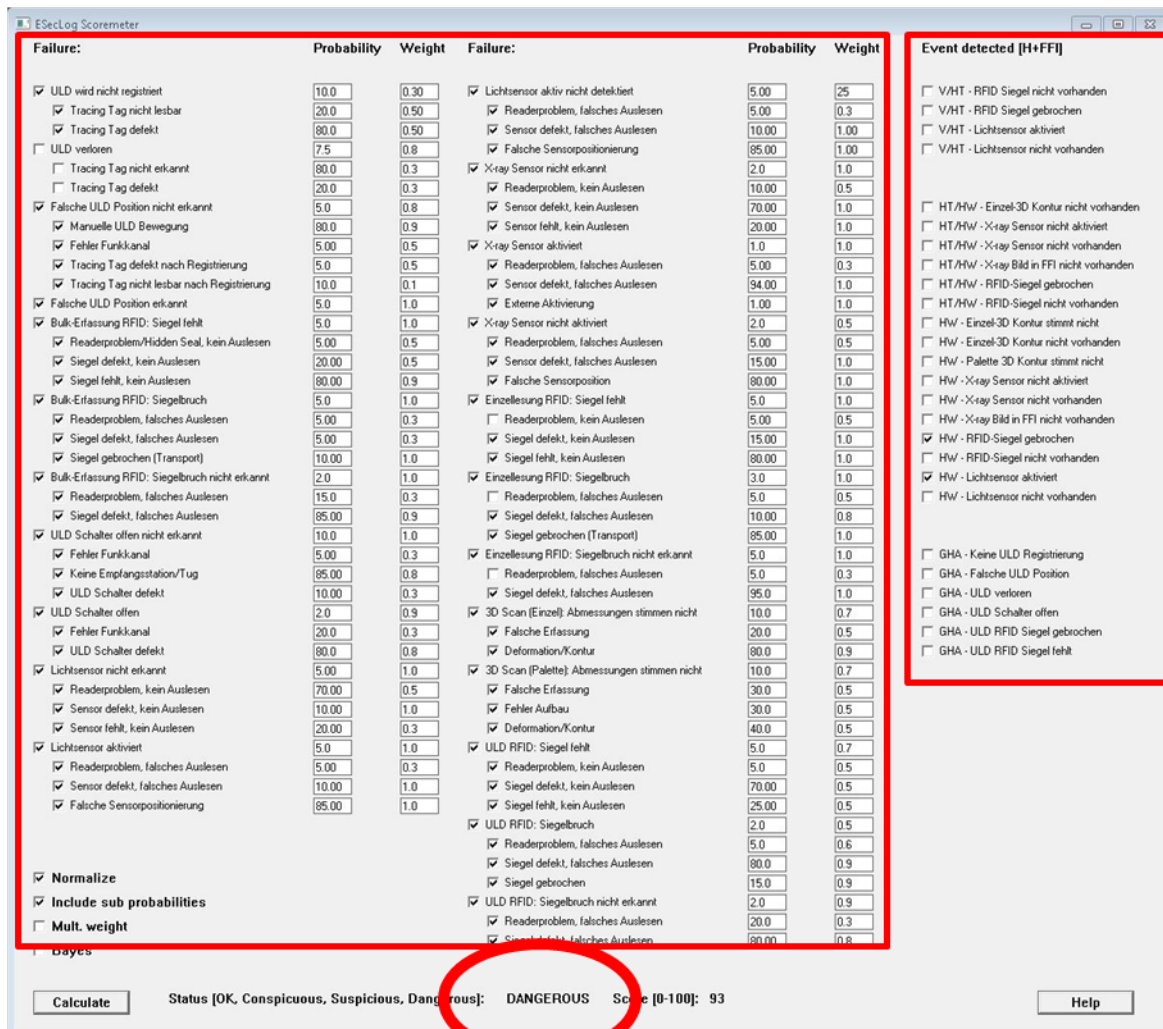


Abbildung 44 Das Programm "ESecLog Scoremeter". Im linken rot markierten Fenster können für die zu berücksichtigenden Fehlerevents Wahrscheinlichkeiten und Gewichtungen vorgegeben werden. Im rechten rot markierten Fenster können die auftretenden Events im Fracht-Fingerprint-Informationssystem (FFI) ausgewählt werden. Das Programm berechnet anschließend einen Score zwischen 0 und 100 und den zugehörigen Sicherheitsstatus (unten).

Aussage über den Sicherheitsstatus eines Packstückes möglich. Elementar ist hierbei, dass bei Auftreten eines einzelnen Events fast immer ein zweites mögliches Event zur Überprüfung herangezogen werden kann. So muss ein defektes RFID-Siegel nicht zwangsläufig eine Manipulation bedeuten, wenn gleichzeitig der Tageslichtsensor anzeigt, dass das Packstück nicht geöffnet wurde. Dabei muss natürlich berücksichtigt werden, dass sich die tatsächliche Wahrscheinlichkeit, mit welcher ein RFID-Siegel versehentlich beim Transport beschädigt wird, erst im praktischen Einsatz der ESecLog-Technologie zeigen wird. Dies sei exemplarisch an einem konkreten Fall beschrieben. Nimmt man eine Fehlerrate von 2% für ein fälschlich als

gerissen detektiertes RFID-Siegel an, bedeutet dies, dass von zehntausend mit einem Siegel versehenen Packstücken zweihundert aufgrund eines Fehlalarms einer gesonderten Sicherheitsüberprüfung unterzogen werden müssten. Sofern man ein gerissenes RFID-Siegel allein als Kriterium für das Unsicher werden einer Fracht heranzieht. Zieht man jedoch in diesem Fall als zweites notwendiges Kriterium einen aktivierten Tageslichtsensor heran, dann bedeutet dies, bei gleicher Fehlerrate des Tageslichtsensors, dass nur noch vier von zehntausend Packstücken einen Fehlalarm generieren.

Ebenso muss ein Verlassen des vorgesehenen Pfades eines mit dem entsprechenden Packstückes beladenen Dolly auf dem Flughafen-Vorfeld nicht unbedingt auf ein sicherheitsrelevantes Ereignisses hindeuten, wenn keine weiteren relevanten Events auftreten. Insgesamt lässt sich also feststellen, dass sich durch die ESecLog-Prozesskette und die in ihr zum Einsatz kommenden Technologien ein deutlich erhöhtes Sicherheitslevel realisieren lassen sollte, ohne die Anzahl und damit die Kosten für auftretende Fehlalarme in wirtschaftlich nicht vertretbare Größenordnungen zu treiben.

Das AP5 wurde mit der entwickelten, zur Kosten-Nutzen-Analyse beitragenden Sicherheitsbewertung erfolgreich und wie geplant abgeschlossen.

1.7 Übertragbarkeiten, Standardisierungsansätze und Leitfaden

In den AP 6 und 7 leistete die BAM Beiträge zur Übertragbarkeit der Projektergebnisse auf Luftfrachtdienstleister außerhalb des Projektkonsortiums, wie auch auf Dienstleister außerhalb der Luftfracht. Es wurden Ansätze zur Standardisierung adressiert und Leitfäden für die Nutzung des im Projekt entwickelten Security-Fracht-Fingerprints für die Luftfracht-Logistik erarbeitet.

Eine generelle Übertragbarkeit der entwickelten Lösungen ist gegeben. So kann beispielsweise der Röntgensensor auch unabhängig von der im Projekt aufgestellten ESecLog-Logistikkette eingesetzt werden, um den Nachweis des Nicht-Röntgens zu erbringen, wie er beispielsweise bei bestimmten Frachtarten (Beispiel Medizinprodukte) vorgeschrieben ist. Anwendungen außerhalb der Luftfracht umfassen den Strahlenschutz, also die Überwachung von Strahlungsdosen in den verschiedensten Anwendungsgebieten. Ebenso denkbar sind Anwendungen in der zerstörungsfreien Prüfung zum Nachweis der zeitlichen Entwicklung von Schäden durch die Anwendung des entwickelten Bildvergleichs. Für die Verwendung eines röntgensichtbaren Siegels sind Bereiche von der Sicherheitsversiegelung bis hin zur zerstörungsfreien Prüfung denkbar.

Von der BAM wurden mehrere Standardisierungsbedarfe im Bereich der Luftfrachtsicherung identifiziert. Einerseits wurde während der praktischen Evaluierung der vorhandenen und in der Luftfrachtsicherung eingesetzten Durchstrahlungsanlagen festgestellt, dass die auf diesen Systemen verwendete Software für den Bereich der Gepäckprüfanlagen entwickelt und optimiert ist, jedoch auch auf den für große Fracht entworfenen Durchstrahlungsanlagen eingesetzt wird. Vor allem durch die wesentlich größeren durchstrahlten Materiallängen bei der Untersuchung von Fracht – im Vergleich zum Passagiergepäck – resultieren hier

Probleme bei der Durchdringung und in der Materialdiskriminierung. Eine unterschiedliche Behandlung der Auswertung der Durchstrahlungsaufnahmen von Gepäck und Fracht ist hier empfehlenswert und sollte in entsprechender Normung und Standardisierung resultieren. Ebenso wurde festgestellt, dass die vorgeschriebenen und verwendeten Testkörper zum Nachweis der Erfüllung der vorgegebenen Mindestanforderungen an Durchstrahlungsanlagen auf die Verwendung in Gepäckprüfanlagen hin entwickelt wurden. Eine Anpassung dieser Testkörper für den speziellen Einsatzbereich in Frachtprüfanlagen ist notwendig und wurde mit dem im Projekt entwickelten Testkörper eingeleitet. Darüber hinaus sollte der Testkörper für Frachtprüfanlagen über die Fähigkeit verfügen, sowohl eine bessere Unterscheidbarkeit der Leistungsfähigkeit der individuellen Durchstrahlungsanlagen zu ermöglichen als auch insgesamt eine verbesserte Beurteilung der Fähigkeiten zur Materialdiskriminierung. Durch die Mitarbeit der Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung in nationalen und internationalen Standardisierungs- und Normungsgremien ist die im Projekt erfolgte Entwicklung des neuen Testkörpers ein wesentlicher Schritt in diese Richtung. So fließen derzeit die Ergebnisse in die Neufassung des ASTM F792-HP „Standard Practice for Evaluating the Imaging Performance of Security X-Ray Systems – Part HP: Methods based on human evaluation of image quality“ mit ein.

In AP7 wurden für die im Projektverlauf entwickelten Lösungen Leitfäden entworfen und erstellt. Dies erfolgte in Form der in der Logistikbranche verbreiteten *Standard Operating Procedures* (SOP). Exemplarisch ist hier SOP für die Verwendung des Röntgen- und Tageslichtsensors in Abbildung 45 wiedergegeben. Die Gesamtheit der erstellten SOP ist im, auch nach der Laufzeit des Projektes verfügbaren Projektwiki unter www.eseclog.de verfügbar. Die Arbeitspakete 6 und 7 wurden damit erfolgreich und wie geplant abgeschlossen.

SOP**Röntgen- und Lichtsensor****Effective Date**

01.06.2016

Scope

Deutschland

Objective

Einbringen des Röntgen- und Lichtsensors in Packstücke

Tools

Internet – Browser, Etiketten - Drucker

General

Einbringen des Röntgen- und Lichtsensor in Packstücke, um eine Manipulation auszuschließen.

Procedure

Der behördlich zugelassene Versender bringt einen Röntgen- und Lichtsensor in sein Packstück ein. Der Sensor wird ausgeschaltet oben auf die Ware gelegt und das Packstück verschlossen. Während des Beladevorgang auf den Nahverkehrs LKW wird der Röntgen- und Lichtsensor mit Hilfe eines Handscanners aktiviert und einer ESecLog ID zugeordnet.

Mit Hilfe des Röntgen- und Lichtsensor kann somit zu jeder Zeit überprüft werden, ob das Packstück geöffnet oder geröntgt worden ist. Diese durch einen Handscanner zu tätigende Prüfung ist mindestens an folgenden Stellen / Übergabepunkte durchzuführen.

- Abholung durch den Nahverkehrsunternehmer.
- Anlieferung an jegliche Umschlagsläger.
- Anlieferung bei der Airline.

Sollte der Röntgen- und Lichtsensor bei einer Prüfung einen Lichteinfall melden oder ein nichterfolgtes Röntgen, ist das Packstück zwingend als „nicht sicher“ zu deklarieren und bedarf einer Luftsicherheitsüberprüfung.

Measurements

Der Lichtsensor wird mit Hilfe von Handscannern aktiviert und ausgelesen.
Die Daten fließen in das FFI.

Abbildung 45 Standard Operating Procedure (SOP) für die Verwendung des Röntgen- und Lichtsensors.

2. Darstellung der wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Siehe Anlage.

3. Darstellung der Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Das Projekt ESecLog wurde im Rahmen der Bekanntmachung des Bundesministeriums für Bildung und Forschung von Richtlinien über die Förderung zum Themenfeld "Sicherheit im Luftverkehr" im Programm "Forschung für die zivile Sicherheit" der Bundesregierung vom 25.07.2011 durchgeführt. Konkret hat das Projekt einen Beitrag geleistet zur in der Bekanntmachung adressierten Entwicklung und Integration

- (1) intelligenter und kostengünstiger Überwachungs- und Verschlusssysteme für manipulationssichere Lieferketten im Lufttransport sowie,
- (2) zukunftsorientierter Maßnahmen zur Verbesserung der Luftfrachtsicherheit durch Vernetzung der gesamten Logistikkette.

Zu den zusätzlichen Aspekten der Bekanntmachung, die durch das Projekt ESecLog z.T. bearbeitet worden sind, zählen:

- (3) innovative Technologien und Konzepte zur verbesserten Gefahr- und Sprengstoffdetektion in der Personen-, Gepäck-, Luftpost- und Luftfrachtkontrolle,
- (4) smarte Sensornetzwerke zur Unterstützung des sicheren Managements von Flughafeninfrastrukturen, Fluggeräten und Passagieren,
- (5) Aus-, Weiterbildungs- und Trainingsmaßnahmen für das Sicherheitspersonal,
- (6) Modelle für Qualitätskontrollen in der Einhaltung von Sicherheitsstandards.

Mit der Entwicklung der ESecLog-Lösungen auf Basis neuer Prüfmerkmale für den Sicherheitsstatus von Luftfracht und die übergreifende Dokumentation des daraus abgeleiteten Fracht-Fingerprints im Fracht-Fingerprint-Informationssystem (FFI) wurden die Punkte (1) und (2) direkt adressiert. Mit den neuartigen Prüfmethoden können neue kostengünstige Überwachungslösungen geschaffen werden, um die Aufrechterhaltung des Sicherheitsstatus einzelner Luftfracht-Packstücke zu überprüfen. Somit sind neue Ansätze gegeben, die Fracht entlang der gesamten Lieferkette bis zur Verladung in das Flugzeug mit einfachen Mitteln auf eventuelle Manipulationen zu überprüfen. Durch die gleichzeitige elektronische Dokumentation aller Prüfungen und Gefahrenübergänge in der Lieferkette im FFI können gleichzeitig eine Verbesserung der Luftfrachtsicherheit (Möglichkeit aus Event-Mustern weitere Unregelmäßigkeiten zu identifizieren) sowie eine bessere Vernetzung der Partner entlang der Logistikkette erzielt werden.

Entsprechend der in Abschnitt II.1. beschriebenen, durch die BAM erarbeiteten Projekthinhalte wurden einerseits neue und innovative Überwachungs- und Verschlusssysteme entwickelt, welche speziell im Bereich der Durchstrahlung die Manipulationssicherheit der Luftfracht deutlich erhöhen. Das entwickelte Röntgensiegel ist eine wirtschaftlich attraktive Möglichkeit Manipulationen des Frachtstückes zu erkennen. Der neu entwickelte und patentierte Röntgensensor ermöglicht erstmals einen direkten und sicheren Nachweis des erfolgten Röntgens einer Fracht zu erbringen. Durch das integrierte RFID-Interface besteht zudem die Möglichkeit, diese Technik einfach in ein Überwachungsnetzwerk zu integrieren. Durch die Entwicklung eines neuen Testkörpers speziell für die Frachtprüfung, wurde die Möglichkeit geschaffen, eine deutlich verbesserte Qualitätskontrolle der verwendeten Durchstrahlungstechnik durchzuführen. Sie schafft die Basis für eine dedizierte Weiterentwicklung der im Projekt entwickelten Lösungen, da die technischen Möglichkeiten individueller Prüfsysteme gezielt genutzt werden können.

Um die Angemessenheit der Projektarbeiten zu wahren, wurden Entwicklungskonzepte im Projektverlauf mehrfach angepasst. So wurde die Berechnung einer Sicherheitssignatur des Durchstrahlungsbildes zu einem direkten Bildvergleich erweitert, da die Integrität des Röntgenbildes bereits durch das entwickelte Fracht-Fingerprint-Informationssystem (FFI) sichergestellt werden kann. Die angestrebte Sicherheitsbewertung wurde zu einem mehrstufigen Konzept zur verbesserten Gefahrenerkennung erweitert.

4. Darstellung des voraussichtlichen Nutzens, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

Als Bundesoberbehörde des Wirtschaftsministeriums arbeitet die BAM vielfältig mit Unternehmen, technischen Einrichtungen wie z.B. Kraftwerken und Verkehrsträgern zusammen. Im ökonomisch geprägten Bereich der Technik, wie beispielsweise im Luftverkehr, gilt es wirtschaftliche Effizienz und Sicherheit, die auch Kosten und Aufwand bedeuteten, in ein ausgewogenes Verhältnis zueinander zu setzen. Anders als bei rein technischen Risiken, gestaltet es sich speziell in der Sicherung des Luftverkehrs schwierig mögliche Manipulationen einzuschätzen. Verbesserte und erweiterte Maßnahmen zur Sicherung von kritischen Infrastrukturen, gerade im Luftverkehr, sind deshalb ein wichtiges und intensiv bearbeitetes Gebiet. Daher sind die allgemeinen wirtschaftlichen Erfolgsaussichten als gut einzustufen.

Durch die im Projekt ESecLog gewonnenen Erfahrungen wird die BAM als Bundesoberbehörde ihre Kompetenzen erweitern. Die neu gewonnenen Erkenntnisse können zum einen als Grundlage für die Verbesserung der Sicherheit von Technik und Infrastrukturen insgesamt genutzt werden. Als Behörde hat die BAM auch Beratungsfunktion für die Regierung und die Öffentlichkeit. Diese Aufgabe kann nur sinnvoll wahrgenommen werden, wenn entsprechende Erfahrungen vorliegen. Das Projekt ESecLog wird dazu beitragen.

Der entwickelte Röntgen- und Tageslichtsensor wurde bereits zur Patentierung eingereicht (Deutsche Patentanmeldung Nr. 102015121174.2: Vorrichtung und Verfahren zum Überprüfen

eines Transportguts auf eine erfolgte Untersuchung mit einer ionisierenden Strahlung, S. Hohendorf, N. Wrobel, U. Ewert), das virtuelle und das physische Röntgensiegel werden ebenfalls zur Patentierung vorbereitet. Hier wäre es der BAM dann auch möglich entsprechende Nutzungsrechte (Lizenzen) zu vergeben. Für eine weitere wirtschaftliche Ausschöpfung ist eine weiterführende Entwicklung der passiven Variante des Röntgensensors notwendig. Dazu sind neue und effizientere Formen des Energy Harvesting notwendig, deren Entwicklung ebenfalls zu möglicherweise zu vergebenden Nutzungsrechten in Form von Lizenzen führen kann. Sowohl das Röntgensiegel als auch der Röntgensensor lassen sich abseits der spezifischen Anwendungen in der Luftfracht-Logistikkette verwenden. Hier wären Anwendungen beim Nachweis des generellen Röntgens, bzw. beim Nachweis des Nichterhaltens einer Strahlungs dosis ebenso denkbar, wie röntgensichtbare Siegel im Bereich der Materialprüfung.

Mit der entwickelten mehrstufigen Sicherheitsbewertung kann, unabhängig vom konkreten Kontext, eine Vernetzung verschiedener Methoden betrachtet werden, deren Kombination zu einer Erhöhung der Sicherheit beitragen kann. Dabei geht es weniger um den konzeptionellen Entwurf von Detektionsstrategien, sondern eher um die Bewertung und die Beurteilung eines komplexen Prozesses und wie einzelne Komponenten zu einem verbesserten Gesamtergebnis beitragen können. Der im Projekt entwickelte Bildvergleich kann nicht nur zur Untersuchung von Flugfrachtcontainern mit teilweise sehr komplexen und detailreichen Bildern angewandt werden, sondern eine Anwendung bei der Beurteilung von Durchstrahlungsbildern im Kontext der zerstörungsfreien Prüfung ist ebenso denkbar. Besonders eine Beurteilung der zeitlichen Entwicklung von Fehlstellen erscheint hier erfolgversprechend, da unterschiedliche Aufnahmebedingungen ausgeglichen werden können.

Der neu entwickelte Testkörper wird, wie bereits derzeit bei der Überarbeitung des ASTM F792 Standards, bei der Aktualisierung, Anpassung und Neuentwicklung von Normen zur Sicherung von Luftfracht beitragen.

5. Darstellung des während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordenen Fortschritts auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Dem Zuwendungsempfänger sind während der Laufzeit des Projektes keine für die Entwicklung der vorgestellten Lösungen relevanten Fortschritte auf dem entsprechenden Gebieten bei anderen Stellen bekannt geworden.

6. Darstellung der erfolgten oder geplanten Veröffentlichungen der Projektergebnisse

Im Rahmen des Projektes erfolgten vielfältige Veröffentlichungen und öffentliche Darstellungen der Arbeiten und Ergebnisse der Projektarbeiten. Diese sind für die BAM nachfolgend kurz aufgelistet:

“Influence of Scattered Radiation on the Efficiency of Dual-High Energy X-Ray Imaging for Material Characterization”, S. Kolkoori, G. Jaenisch, A. Deresch, Proceedings 19. World Conference on Non-Destructive Testing 2016

„New X-ray Backscatter Imaging Technique for Nondestructive Testing of Aerospace Components“, S. Kolkoori, N. Wrobel, U. Zscherpel, U. Ewert, Proceedings DACH Jahrestagung 2015

“Innovative X-ray Backscatter Technique for Security Applications: Detection of Dangerous Materials“, N. Wrobel, S. Kolkoori, U. Zscherpel, U. Ewert, Proceedings 11th European Conference on Non-Destructive Testing (ECNDT 2014)

“Dual High-Energy X-ray Digital Radiography for Material Discrimination in Cargo Containers“, S. Kolkoori, N. Wrobel, A. Deresch, B. Redmer, U. Ewert, Proceedings 11th European Conference on Non-Destructive Testing 2014

Vortrag “Influence of Scattered Radiation on the Efficiency of Dual-High Energy X-Ray Imaging for Material Characterization” auf der 19. World Conference on Non-Destructive Testing vom 13. Bis 17.6.2016 in München

Vortrag „Hochauflösende Röntgenrückstreutechnik zur zerstörungsfreien Untersuchung von Komponenten für die Luftfahrt“ auf der DACH Jahrestagung (Konferenz der deutschsprachigen Gesellschaften für zerstörungsfreie Prüfung (DGZfP, ÖGZfP, SGZfP) vom 10.5.2015 – 13.5.2015 in Salzburg

Vortrag „Innovative X-ray Backscatter Technique for Security Applications: Detection of Dangerous Materials“ auf der 11. ECNDT (Europaen Conference on Non-Destructive Testing) vom 5.10.2014 – 10.10.2014

Abschlussdemonstration mit allen entwickelten Projektlösungen und dem ESecLog-Gesamtkonzept am Flughafen Bremen, 29.06.201

Erstellung der Projekt-Webseite 2014 und fortlaufende Aktualisierung mit News, Terminen und Projektergebnissen

→ <http://eseclog.de/index.php>

Darüber hinaus erfolgte die Teilnahme an zusätzlichen öffentlichen Events, die zu Diskussionen mit Dritten zum Thema Luftsicherheit genutzt wurden:

Teilnahme an den 6. Luftsicherheitstagen des BDSW, Potsdam, 12.-13.02.2014

Teilnahme an den 7. Luftsicherheitstagen des BDSW, Potsdam, 25.-26.02.2015

Teilnahme an den 8. Luftsicherheitstagen des BSDW, Potsdam, 17.-18.02.2016

Anhang

Entwicklung eines Testkörpers für die Frachtprüfung

Tabelle 3 Materialdiskriminierung: Metall - hochdichtes Metall: Ordnungszahl (Z) und Dichte der verwendeten Materialien.

Material	Ordnungszahl (Z)	Dichte (g/cm ³)
Aluminium (Al)	12	2,7
Stahl (Fe)	26	7,8
Wolfram (W)	74	19,25
Blei(Pb)	82	11,34
Messing (CuZn _x)	31	8,8

Tabelle 4 Stoffdichte und effektive Kernladungszahlen der verwendeten Materialien im Test zur Diskriminierung organischer Stoffe.

Material	Dichte (g/cm ³)	Z _{eff}
Polyvinylchlorid (PVC)	1,45	15
Polytetrafluorethylen (PTFE)	2,15	8,5
Polyamide(PA)	1,15	6,2

Tabelle 5 Verwendeten Flüssigkeiten, Feststoffe und Gefahrstoffsimulanten und ihren effektiven Kernladungszahlen (Z_{eff}) und Dichten.

Verbindung	Summenformel	Dichte (g/cm ³)	Z _{eff}
Ammoniumnitrat	NH ₄ NO ₃	1,73	7,4
Cyclohexan	C ₆ H ₁₂	0,78	4,75
Glycerin	C ₃ H ₈ O ₃	1,26	6,87
Wasser	H ₂ O	1	7,5
Zucker	C ₁₂ H ₂₂ O ₁₁	1,1	7,3
Salz	NaCl	1,4	19,2

Entwicklung eines Roentgensiegels

Tabelle 6 Verwendete Elemente bei der Umsetzung des Röntgensiegels.

Material	Dichte (g/cm ³)	Ordnungszahl	Linearer Schwächungskoeffizient (1/cm) [bei 207keV]
Eisen (Fe)	7.9	26	1.1
Zinn (Sn)	7.3	50	2.2
Kupfer (Cu)	8.9	29	1.3
Blei (Pb)	11.3	82	10.1

Bildvergleich – Optimierungsverfahren

Um zwei Bilder automatisiert miteinander vergleichen zu können, müssen sie zuvor möglichst gut überlagert („registriert“) werden, d.h. die Parameter der gewählten Koordinatentransformation müssen passend gewählt werden. Die optimalen Parameter, d.h. jene Parameter, welche die optimale Übereinstimmung ergeben, lassen sich jedoch in aller Regel nicht analytisch bestimmen. Hierfür wird ein Optimierungsverfahren benötigt, welches die Aufgabe hat, die notwendigen Parameter selbstständig zu verändern, das resultierende Ergebnis anhand einer Bewertungsfunktion (Metrik) zu beurteilen, und zu erkennen, wie die Parameterwerte geändert werden müssen, um ein besseres Ergebnis zu erhalten. Das Optimierungsverfahren hat also die Aufgabe das lokale Minimum (oder Maximum) der Bewertungsfunktion zu finden. Dieses entspricht mathematisch einer Extremstelle dieser Funktion. Zum Auffinden des Extremums werden sich Optimierungsverfahren also in aller Regel der Ableitungen der Bewertungsfunktion bedienen.

Abhängig von Problemstellung und verfügbarer Rechenzeit existieren verschiedene Optimierungsverfahren für lineare und nichtlineare Gleichungssysteme. Ein umfassender Abriss über das Gebiet der Optimierung, ebenso wie eine detaillierte, formelhafte Darstellung der verwendeten Optimierungsverfahren, würde den Rahmen des Anhangs überschreiten. Sie können in jedem Lehrbuch zu diesem Fachgebiet nachgeschlagen werden. Es soll jedoch ein kurzer Überblick gegeben werden, um die hier angewandten Optimierungsverfahren (Gradientenverfahren, Konjugiertes Gradientenverfahren und BFGS-Verfahren) einzuordnen.

Es existieren Optimierungsverfahren, welche ganz ohne Berechnung der Ableitungen auskommen, wie bspw. das Downhill-Simplex-Verfahren. Diese Verfahren konvergieren im Allgemeinen recht langsam und können leicht in Nebenminima der Bewertungsfunktion steckenbleiben. Eine weitere Klasse von Optimierungsverfahren benötigt die erste Ableitung (Jacobi-Matrix). Das Gradientenverfahren ist ein Beispiel für diese Klasse. Beim

Gradientenverfahren wird das Gleichungssystem in ein äquivalentes Funktional (oder in eine quadratische Form) umgewandelt, dessen Minimum der Lösung des Gleichungssystems entspricht. Das Funktional muss also minimiert werden. Dafür bildet man den Gradienten des Funktionals und sucht in Richtung des negativen Gradienten bis das Minimum gefunden wurde. Für dieses Vorgehen müssen Suchrichtung und Schrittweite festgelegt werden. Die unterschiedlichen Verfahren unterscheiden sich dabei in der konkreten Bestimmung von Suchrichtung und Schrittweite, und damit im Rechenaufwand, in der Genauigkeit und im Konvergenzverhalten. Beim einfachsten Fall des Gradientenverfahrens, entspricht die Suchrichtung bei jedem Schritt immer der Richtung des größten negativen Gradienten. Bei gut konditionierten Problemen zeigt der Gradient an jeder Stelle mehr oder weniger in Richtung des Minimums und das Verfahren findet relativ schnell die Lösung, bei schlecht konditionierten Problemen konvergiert dieses Verfahren jedoch recht langsam. Hier erreicht man deutliche Verbesserungen, wenn man nicht jeweils in Richtung des größten negativen Gradienten voranschreitet, sondern wenn man die Suchrichtung für jeden Schritt systematisch neu bestimmt, unter Berücksichtigung des vorherigen Schrittes. Dies wird im Verfahren der konjugierten Gradienten(6) angewandt, in welchem man orthogonale (konjugierte) Suchrichtungen benutzt. Bei ungefähr gleichem Rechenaufwand erreicht man dadurch deutlich bessere Konvergenzeigenschaften, das Minimum wird also wesentlich schneller gefunden.

Newton-Verfahren finden die Nullstellen eines nichtlinearen Gleichungssystems durch eine lokale Linearisierung mithilfe der ersten und zweiten Ableitung (die Bewertungsfunktion muss also differenzierbar sein). Das Newton-Verfahren ist als Verfahren zweiter Ordnung genauer als die oben aufgeführten Verfahren erster Ordnung und konvergiert recht schnell (quadratisch). Es benötigt jedoch die explizite Berechnung der zweiten Ableitung (Hesse-Matrix). Diese Berechnung ist aufwendig und bedeutet erheblichen Rechenaufwand. Sogenannte Quasi-Newton-Verfahren verringern diesen Rechenaufwand, indem sie die Hesse-Matrix lediglich approximieren, basierend auf der ersten Ableitung (Jacobi-Matrix) und der Approximation der Hesse-Matrix des vorhergehenden Linearisierungsschrittes. Dies vereinfacht die Berechnung deutlich und verringert damit die benötigte Rechenzeit. Quasi-Newton Verfahren konvergieren jedoch langsamer als reine Newton-Verfahren (superlinear), jedoch immer noch recht schnell gegenüber anderen Verfahren. Die einzelnen Quasi-Newton-Verfahren unterscheiden sich im Wesentlichen durch die konkrete Approximation der Hesse-Matrix. Das Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno-Verfahren (BFGS-Verfahren), benannt nach den Mathematikern Charles G. Broyden, Roger Fletcher, Donald Goldfarb und David F. Shanno, welche dieses Verfahren unabhängig voneinander im Jahr 1970 publiziert haben(7)(8)(9)(10), ist eines der bekanntesten Quasi-Newton-Verfahren und kam aufgrund seiner Robustheit auch hier zum Einsatz.

Bildvergleich - Bewertungsmetrik

Ein Optimierungsalgorithmus benötigt ein Maß, um den Erfolg eines vorgenommenen Optimierungsschrittes bewerten zu können, eine sogenannte Metrik. Die Metrik hängt stark von der konkreten Problemstellung, aber auch von der Wahl des Optimierungsalgorithmus ab.

Für den Vergleich zweier Bilder, wird als Maß für die Übereinstimmung häufig die mittlere quadratische Abweichung benutzt:

$$\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (F_i - G_i)^2$$

Wobei F_i und G_i die Grauwerte des Pixels i in den Bildern F und G darstellen und N die Anzahl der Pixel im Bild.

Diese Metrik benutzt die Grauwertabweichungen zwischen korrespondierenden Pixeln in den beiden zu vergleichenden Bildern. Ein kleiner werdender Wert zeigt damit eine bessere Übereinstimmung an, der beste Wert dieser Metrik ist folglich Null. Offensichtlich müssen aber auch objektgleiche Pixel in beiden Bildern (also Pixel, auf denen die gleiche Stelle desselben durchstrahlten Objektes abgebildet wird), gleiche Grauwerte aufweisen. Bei Aufnahmen unter identischen Bedingungen ist diese Voraussetzung erfüllt. Im Kontext einer Durchstrahlungsaufnahme desselben Objektes bedeuten gleiche Bedingungen in erster Näherung identische Strahlungsquellen, identische Detektoren und identische Betriebsparameter. Während der Entwicklungs- und Testphase des Programms wurde daher diese Metrik gewählt, da sie weniger Rechenzeit als andere Vergleichsmethoden benötigt. Auch für Eigenschaftsbilder, also den aus den eigentlichen Durchstrahlungsaufnahmen berechnete Kanten- und Gradientenbildern kann diese Metrik verwendet werden. Wobei anzumerken ist, dass die mittlere quadratische Abweichung bei Binärbildern, wie den berechneten Kantenbildern, nur unter bestimmten Bedingungen gute Ergebnisse liefert, da in diesem Fall geringe Abweichungen zu großen Sprüngen in der Metrik führt.

Für eine praxistaugliche Anwendung eines Bildvergleichs können identische Aufnahmebedingungen hingegen nicht vorausgesetzt werden. Es existieren unterschiedliche Modelle von Frachtscannern am Markt, und auch gleiche Modelle werden nicht zwingend mit den identischen Systemparametern betrieben, d.h. dasselbe durchstrahlte Objekt weist unterschiedliche Grauwerte in der Aufnahme auf. Ebenso können sich durch Änderungen in der Aufnahmegeometrie unterschiedliche Durchstrahlungslängen ergeben, welche selbst bei ansonsten identischen Aufnahmebedingungen zu unterschiedlichen Grauwerten führen. Durch die vorgenommene Histogrammanpassung beider Bilder, werden diese Unterschiede zwar deutlich verringert, jedoch nicht vollständig eliminiert. Bei Verwendung der ursprünglichen Durchstrahlungsaufnahmen (und nicht der Eigenschaftsbilder) ergibt sich daraus die Notwendigkeit für eine Metrik, welche unempfindlicher gegenüber nichtidentischen Grauwerten ist.

Die Wahl fiel auf eine auf der Transinformation beider Bilder beruhenden Metrik (11)(12). Transinformation beruht auf der Entropie eines Bildes. Definiert man die Entropie eines Bildes F als:

$$H(F) = - \int p_F(f) \log p_F(f) df$$

wobei f die möglichen Grauwerte eines Pixels (bei 16 Bit Bildern also 2^{16} mögliche Grauwerte, nämlich 0 bis 65535) und $p(f)$ die Wahrscheinlichkeit des Auftretens jedes Grauwertes darstellt, dann beschreibt die Entropie den Informationsgehalt eines Bildes. Diese Definition der Entropie geht auf die Informationstheorie zurück(13). Ein vollständig homogenes Bild, also ein Bild, in welchem alle Pixel den gleichen Grauwert aufweisen, hat demnach Entropie 0, enthält also keine Information.

Die bedingte Entropie zweier Bilder F und G ist definiert als

$$H(F, G) = \int p_{FG}(f, g) \log p_{FG}(f, g) df dg$$

wobei $p(f, g)$ die Wahrscheinlichkeit des Grauwertes f in Bild F beschreibt, wenn in Bild G der korrespondierende Pixel den Grauwert g aufweist.

Die Transinformation I zweier Bilder ist nun definiert als

$$I(F, G) = H(F) + H(G) - H(F, G)$$

Sie beschreibt das statistische Wissen über Bild G, wenn Bild F bekannt ist. Bei zwei voneinander unabhängigen Bildern ist $H(F, G) = H(F) + H(G)$, denn $p(f, g) = p(f)p(g)$. Die Transinformation ist somit Null. Sind die Bilder in irgendeiner Form voneinander abhängig, dann ist $H(F, G) < H(F) + H(G)$. Das Ziel der Optimierung, also die Registrierung beider Bilder, ist somit, die bedingte Entropie zu minimieren, d.h. die Transinformation zu maximieren.

Für ein pixelbasiertes Bild liegt keine kontinuierliche Wahrscheinlichkeitsverteilung vor, sondern eine diskrete:

$$H(F) = - \sum_{i \in N} p(f) \log p(f)$$

Um jedoch eine glatte, differenzierbare Verteilung, welche für das Optimierungsverfahren benötigt wird zu erhalten, muss aus der obigen Summe eine kontinuierliche Verteilung erzeugt werden. Dies wird durch eine Kerndichteschätzung (Parzen-Fenster-Methode) realisiert(14). Für ein Sample M von N Grauwerten wird die Wahrscheinlichkeit des Grauwertes f im Bild F abgeschätzt mittels:

$$p(f) \approx \tilde{p}(f) = \frac{1}{N} \sum_{m_i \in M} K(f - m_i)$$

Für die Kernelfunktion K kommen verschiedene Funktionen in Frage. Häufig wird eine Gaussfunktion verwendet, im vorliegenden Fall kommt ein B-Spline Kernel zum Einsatz, da er

weniger Rechenaufwand bedeutet. Aus der obigen Formel wird auch ein weiterer Vorteil der Schätzung der Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion deutlich - es müssen nicht die kompletten Bilder zur Berechnung herangezogen werden, sondern nur es reicht meist eine zufällig gewählte Auswahl an Stichproben.

Benutzt man die Transinformation als Metrik, ergeben sich jedoch auch bestimmte Probleme. So kann die Transinformation nur im Überlappungsbereich beider Bilder bestimmt werden. Die Größe der Überlappungsregion und auch die Bildstruktur haben damit einen Einfluss auf die berechnete Transinformation. Bei geringer Überlagerung beider Bilder, bzw. des interessierenden Bildbereichs und geringer Bildstruktur im Überlagerungsbereich kann somit die Transinformation auch zunehmen für eine schlechter werdende Registrierung der beiden Bilder, und somit zu einer völligen Fehlüberlagerung im Laufe des Optimierungprozesses führen. Dieses Problem wird im vorliegenden Fall durch die stufenweise Registrierung, beginnend mit einfachen Transformationen, minimiert.

Es existieren mehrere konkrete Implementierungen dieses Verfahrens. Im vorliegenden Fall wurde die Implementierung von Mattes(15) gewählt.

Bildvergleich – Kantenbestimmung

Eine Kantenbestimmung lokalisiert in einem Bild die Stellen, an denen sich die Intensität, also der Grauwert des Bildes in einem kleinen Bereich stark ändert, ermittelt also (im Idealfall) die Konturen abgebildeter Objekte. Bildregionen mit starker Intensitätsänderung lassen sich durch Berechnung der ersten Ableitung des Grauwertverlaufs bestimmen. Eine genauere Lokalisation lässt sich mithilfe der zweiten Ableitung durchführen. Um die Bestimmung der Kanten weniger anfällig für im Bild auftretendes Rauschen zu gestalten, wird zuvor noch eine Glättung des Bildes durchgeführt. Kantenbestimmung ist ein intensiv bearbeitetes Gebiet der Bildbearbeitung und es existieren diverse Standardoperationen, welche in jedem einschlägigen Fachbuch nachgeschlagen werden können. Im hier entwickelten Programm zum Bildvergleich, kam das Canny-Verfahren zum Einsatz(16).

Bildvergleich – Momente und Schwerpunkt

Momente in der Bildverarbeitung stellen gewichtete Mittelwerte aus den Grauwerten der Bildpixel dar. Das Moment (f+g)-ten Grades eines Bildes berechnet sich zu:

$$M_{fg} = \sum_x \sum_y x^f y^g g(x, y)$$

wobei x und y der Koordinaten eines Pixels und g(x,y) den Grauwert eines Pixels darstellen. Der Grauwertschwerpunkt S eines Bildes lässt sich aus den Momenten M_{00} , M_{10} und M_{01} berechnen:

$$S = \frac{1}{M_{00}}(M_{10}, M_{01})$$

Bildvergleich – B-Spline Interpolation

Über die Durchstrahlungsaufnahme wird ein Deformationsfeld gelegt, um für jeden Punkt des Bildes eine Deformation, also eine Transformation zu bestimmen. Das Deformationsfeld (siehe Abbildung 46) wird durch ein Netz aus Gitterpunkten beschrieben, welche dem Bild überlagert wird. An jedem Gitterpunkt greift nun eine zweidimensionale "Deformationskraft" an, welche die Verformung des Bildes für jeden Pixel beschreibt. Wie erhält man aber die Verformung des Bildes zwischen den einzelnen Gitterpunkten? Die nötige Interpolation sollte stetig, möglichst glatt, differenzierbar und schnell berechenbar sein.

Dies könnte durch Polynominterpolation jeweils in x- und y-Richtung geschehen. Da die Polynome jedoch immer den Grad k-1 besitzen müssen, wobei k die Anzahl der zu interpolierenden Gitterpunkte darstellt, werden die notwendigen Polynome schnell sehr komplex. Dies bedeutet einerseits steigende Rechenzeit und zunehmende Ungenauigkeit in der Interpolation durch Rundungsfehler, andererseits unerwünschte "Überschwinger" in der Interpolation zwischen zwei Gitterpunkten. Bezier-Kurven vermeiden diese Überschwinger, zeigen aber immer noch die anderen Nachteile der Polynominterpolation. Diese Nachteile lassen sich vermeiden, indem man anstatt einer Bezier-Kurve, welche alle Punkte interpoliert, nur stückweise Bezier-Kurven verwendet und diese zusammensetzt. Kritischer Punkt an diesem Verfahren ist das Zusammensetzen der verschiedenen Kurvensegmente, so dass sie einen möglichst glatten Übergang zeigen. Erweitert man das obige Verfahren nun, so erhält man sogenannte Splines, stückweise Polynome, bei welchen der glatte Übergang sichergestellt ist.

Die sogenannten B-Splines (von Basis-Splines) stellen eine spezielle Form dieser Splines dar. Diese Splines bilden eine Basis (Name!) des verwendeten Polynomraumes. D.h. alle möglichen Polynome dieses Raumes können durch Kombination der Basis-Splines erzeugt werden. Ein weiterer Vorteil der B-Splines besteht darin, dass sie jeweils nur wenige Gitterpunkte umfassen, bzw. beschreiben. Wenn n die Ordnung der Splines darstellt, dann werden pro Dimension n+1 Gitterpunkte benötigt. Im Fall eines zweidimensionalen Bildes und der hier gewählten, zweimal stetig differenzierbaren kubischen Splines sind für die Beschreibung der Deformationstransformation eines Pixels also nur die $(3+1)^2 = 16$ umliegenden Gitterpunkte des Deformationsfeldes nötig. Die Änderung der Koeffizienten eines Gitterpunktes während der Optimierung erfordert also nur die Neuberechnung des lokalen Deformationsfeldes unter Berücksichtigung der umliegenden 16 Gitterpunkte, was einen deutlich reduzierten Rechenaufwand bedeutet.

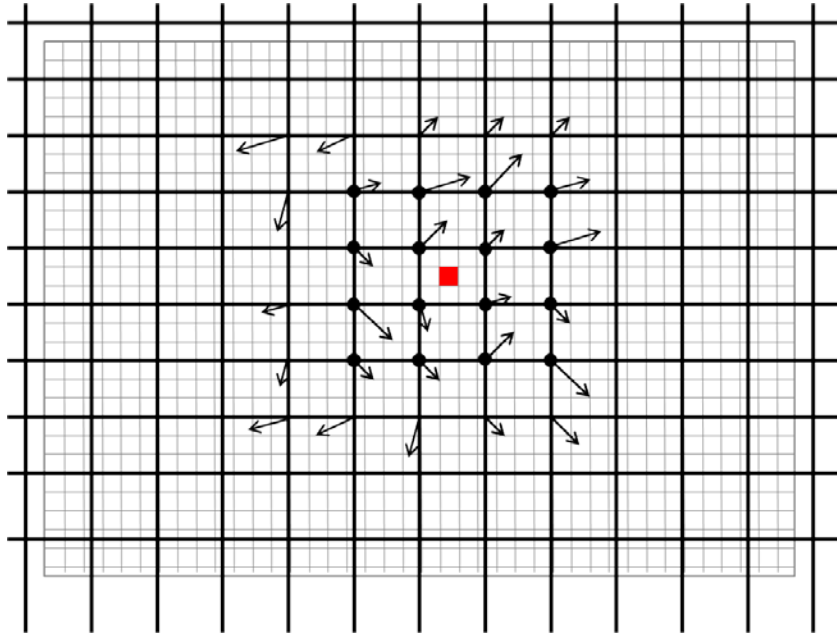


Abbildung 46 Grau: Pixelgitter, Rot: Bildpixel, Pfeile: Deformationskräfte (exemplarisch für 29 Knotenpunkte). Die mit einem kleinen Kreis versehenen Kontrollpunkte stellen die notwendigen Kontrollpunkte dar, welche für die Transformation des roten Pixels notwendig sind.

Wird die lokale Deformation an jedem Gitterpunkt des Deformationsfeldes Φ durch die beiden Koeffizienten Φ_x und Φ_y beschrieben, dann lässt sich die Transformation eines beliebigen Pixels im Bild als Tensorprodukt mit den zugehörigen B-Splines darstellen:

$$T(x, y) = \sum_{m=0}^2 \sum_{n=0}^2 \beta_m(\tilde{x}) \beta_n(\tilde{y}) \Phi_{i+m, j+n}$$

Wobei β_n die n-te Basisfunktion darstellt, i und j den x- und y-Index des Gitterpunktes und (\tilde{x}, \tilde{y}) die auf $[0,1]$ normierten Koordinaten des Bildpixels relativ zu den vier ihn umgebenden Gitterpunkten.

Bildvergleich – Erosion und Dilatation

Erosion und Dilatation sind morphologische Filter, welche auf digitale Bilder angewendet werden können. Das prinzipielle Vorgehen wird hier am Beispiel eines Bildes erklärt, dessen einzelne Pixel nur die Werte 0 oder 1 aufweisen können, wobei Objekte auf dem Bild den Pixelwert 1 aufweisen. Vereinfacht ausgedrückt, wird bei beiden Methoden ein kleines Fenster (Filter) über das Bild geschoben und jeweils geschaut, wie viele Pixel innerhalb dieses Fensters eine 0 bzw. eine 1 aufweisen. Wird ein bestimmter Prozentsatz überschritten, werden entweder alle Pixel innerhalb dieses Fensters auf 0 gesetzt (Erosion) oder aber auf 1

(Dilatation). Die Erosion führt zu einer Verkleinerung großer Strukturen und einem Verschwinden von kleinen Strukturen, die Dilatation führt zu einem Wachsen größerer Strukturen. Führt man zuerst eine Erosion und anschließend eine Dilatation durch, nennt sich dieser Vorgang Opening. Er führt zu einem Verschwinden kleiner Strukturen, während größere Strukturen ihre Größe annähernd beibehalten. Kehrt man die Reihenfolge um, nennt sich dieser Vorgang Closing. Hier werden fragmentierte Strukturen zusammengeführt, d.h. kleine Zwischenräume und Löcher werden gefüllt. Die genauen Auswirkungen von Erosion und Dilatation werden durch die spezifische Form und Größe des Filters gesteuert.

Sicherheitsbewertung – Wahrscheinlichkeitsrechnung

Zur Berechnung einer Gesamtfehlerwahrscheinlichkeit der eingesetzten ESecLog-Technologien wurden die möglichen Fehler der einzelnen Teiltechnologien und deren prozentuale Fehlerraten von den jeweiligen Projektpartnern geschätzt. Beim weiteren Vorgehen muss grundsätzlich unterschieden werden, zwischen disjunkten Fehlerereignissen, also Ereignissen, die nicht gemeinsam eintreten können, und nicht disjunkten Ereignissen. Ein Beispiel für disjunkte Ereignisse stellen die Fehlerquellen „RFID-Siegel fehlt“ und „RFID-Siegel übermittelt falschen Status“ dar. Nicht disjunkte Ereignisse stellen beispielsweise die Fehlerquellen unterschiedlicher Technologien dar. So sind Fehler des Röntgensensors unabhängig von Fehlern des RFID-Siegels oder des Vorfeldtrackings. Andererseits sind nicht alle Fehlerereignisse des Röntgensensors unabhängig von Fehlerereignissen des Tageslichtsensors, da beide beispielsweise denselben RFID-Transponder verwenden.

Für n disjunkte Fehlerereignisse A_j mit $j \in [1, n]$ mit der jeweiligen Wahrscheinlichkeit $P(A_j)$ berechnet sich die Gesamtwahrscheinlichkeit, dass mindestens eines der Fehlerereignisse eintritt, zu:

$$P\left(\bigcup_{j=1}^n A_j\right) = \sum_{j=1}^n P(A_j)$$

Für nicht disjunkte Ereignisse, also Ereignisse, die gemeinsam eintreten können, berechnet sich die Gesamtwahrscheinlichkeit zu:

$$P\left(\bigcup_{j=1}^n A_j\right) = \sum_j P(A_j) - \sum_{j < k} P(A_j \cap A_k) + \sum_{j < k < l} P(A_j \cap A_k \cap A_l) \dots + (-1)^{n-1} P\left(\bigcap_{j=1}^n A_j\right)$$

Die bedingte Wahrscheinlichkeit, also die Wahrscheinlichkeit des Eintretens eines Fehlerereignisses unter der Bedingung, dass bereits ein anderes Fehlerereignis eingetreten ist, berechnet sich, wenn die Fehlerereignisse unabhängig von den anderen sind, zu:

$$P\left(\bigcap_{j=1}^n A_j\right) = \prod_{j=1}^n P(A_j)$$

Für beliebige Fehlerereignisse ist die Wahrscheinlichkeit eines gemeinsamen Auftretens:

$$P(A_1 \cap A_2 \cap A_3 \dots \cap A_n) = P(A_1)P(A_2 | A_1)P(A_3 | A_1 \cap A_2) \dots P(A_n | A_1 \cap A_2 \cap A_3 \dots \cap A_{n-1})$$

Literaturverzeichnis

1. Aviation Security Seminar "Passenger and Baggage Screening". *EUROMED*. Feb. 2008, Session Airport Security Challenges.
2. ASTM Committee F12 on Security Systems and Equipment. *ASTM F792-HP Entwurf 2015*.
3. **Kolkoori, S., Jaenisch, G.-R. and Deresch, A.** Influence of Scattered Radiation on the Efficiency of Dual-High Energy X-Ray Imaging for Material Characterization. *19th World Conference on Non-Destructive Testing*. 2016.
4. **Paulus, C.** A multi energy X-ray backscatter system for explosive detection. *Journal of Instrumentation*. 2013, Vol. 8, pp. 1-15.
5. **lovea, M. et al.** High accuracy dual energy experiments and non-rotational tomography algorithm for explosives detection technique in luggage control. *Proceedings of International symposium on Industrial radiology and computed tomography*. 2007.
6. **Hestenes, E.Stiefel and M.R.** Methods of Conjugate Gradients for Solving Linear Systems. *J. Res. Natl. Bur. Stand.* 1952, Vol. 49, pp. 409-436.
7. **Broyden, Charles G.** The convergence of a class of double-rank minimization algorithms. *Journal of the Institute of Mathematics and Its Applications*. 1970, Vol. 6, pp. 76-90.
8. **Fletcher, Roger.** A New Approach to Variable Metric Algorithms. *Computer Journal*. 1970, Vol. 13, 3, pp. 317-322.
9. **Goldfarb, Donald.** A Family of Variable Metric Updates Derived by Variational Means. *Mathematics of Computation*. 1970, Vol. 24, 109, pp. 23-26.
10. **Shanno, David F.** Conditioning of quasi-Newton methods for function minimization. *Mathematics of Computation*. 1970, Vol. 24, 111, pp. 647-656.
11. **R.P.Woods, S.R.Cherry, and J.C.Mazziotta.** Rapid automated algorithm for aligning and reslicing PET images. *Journal of Computer Assisted Tomography*. 1992, Vol. 16, 4, pp. 620-633.
12. **R.P.Woods, J.C.Mazziotta, and S.R.Cherry.** MRI-PET registration with automated algorithm. *Journal of Computer Assisted Tomography*. 1993, Vol. 17, 4, pp. 536-546.
13. **C.E.Shannon.** A Mathematical Theory of Communication. *The Bell System Technical Journal*. 1948, Vol. 27, pp. 37-423, 623-656.
14. **E.Parzen.** On estimation of a probability density function and mode. *Ann. Math. Stat.* 1962, Vol. 33, pp. 1065-1076.
15. **D. Mattes, D. R. Haynor, H. Vesselle, T. Lewellen.** Nonrigid multimodality image registration. *Proc. SPIE 4322. Medical Imaging 2001: Image Processing*, 2001, pp. 1609-1620.
16. **Canny, J. F.** A Computational Approach To Edge Detection. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 1986, Vol. 8, 6, pp. 679–698.
17. **Bellon, C. and Jaenisch, G.-R.** aRTist - Analytical RT Inspection Simulation Tool. *Proceedings of International Symposium on Digital Industrial Radiology and Computed Tomography*. 2007.