

Schlussbericht zum Teilvorhaben

## **Durchstrahlungs- und orthogonale Detektionstechniken**

im Verbundprojekt



**Sichere Luftfracht-Transportkette:  
Konzepte, Strategien und Technologien für sichere und  
effiziente Luftfracht-Transportketten**

der  
Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung  
(BAM)



Bundesanstalt für  
Materialforschung  
und -prüfung



**Sichere Luftfracht-Transportkette:**  
Konzepte, Strategien und Technologien für sichere  
und effiziente Luftfracht-Transportketten



**Schlussbericht zum Teilvorhaben**

<b><i>Vorhabensbezeichnung:</i></b>	<b>„Durchstrahlungs und orthogonale Detektionstechniken“ im Verbundprojekt: Sichere Luftfracht-Transportkette:</b>
<b><i>Vorhabensbezeichnung:</i></b>	<b>Konzepte, Strategien und Technologien für sichere und effiziente Luftfracht-Transportketten (SiLuFra)</b>
<b><i>Förderkennzeichen:</i></b>	<b>13N12730</b>
<b><i>Zuwendungsempfänger:</i></b>	<b>Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM)</b>
<b><i>Laufzeit des Vorhabens:</i></b>	<b>01.07.2013 – 30.06.2016</b>
<b><i>Berichtszeitraum:</i></b>	<b>01.07.2013 – 30.06.2016</b>
<b><i>Autoren:</i></b>	Justus Vogel Bundesanstalt für Materialforschung und – prüfung BAM Unter den Eichen 87 12205 Berlin, Germany Tel: +49 30 8104 4732 Mail: justus.vogel@bam.de



**Sichere Luftfracht-Transportkette:**  
Konzepte, Strategien und Technologien für sichere  
und effiziente Luftfracht-Transportketten

gefördert von:





# Sichere Luftfracht-Transportkette:

Konzepte, Strategien und Technologien für sichere und effiziente Luftfracht-Transportketten



## Inhalt

I	Kurze Darstellung .....	8
1.	Aufgabenstellung .....	9
2.	Voraussetzungen unter den das Vorhaben durchgeführt wurde .....	10
3.	Planung und Ablauf des Vorhabens .....	11
4.	Wissenschaftlicher und technischer Stand .....	14
5.	Zusammenarbeit mit anderen Stellen .....	15
II	Eingehende Darstellung .....	16
1.	Wichtige wissenschaftliche Ergebnisse .....	16
1.1	Analyse vorhandener Durchstrahlungstechniken .....	16
1.2	Analyse der Hochenergi radiographie .....	20
1.3	Analyse orthogonaler Methoden .....	29
1.4	Entwicklung eines Testkörpers .....	43
1.5	Konzept eines verbesserten Durchstrahlungsverfahrens .....	55
1.5.1	Umsetzung als mobiler Aufbau .....	60
1.6	Demonstration einer Containerprüfung .....	62
2.	Darstellung der wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises .....	74
3.	Darstellung der Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit .....	74
4.	Darstellung des voraussichtlichen Nutzens, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans .....	75
5.	Darstellung des während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordenen Fortschritts auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen .....	75
6.	Darstellung der erfolgten oder geplanten Veröffentlichungen der Projektergebnisse .....	75
	Literaturverzeichnis .....	77



## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Zeitlicher Ablauf des Projektes. ....	14
Abbildung 2 Modell zur Durchstrahlung von Luftfracht.....	18
Abbildung 3 : Durchstrahlungsanlagen verschiedener Anbieter.....	19
Abbildung 4 Röntgenspektren. ....	23
Abbildung 5 Verlauf der Dual-Energy-Funktion $F(Z)$ .....	24
Abbildung 6 Verlauf der Dual-Energy-Funktion $F(Z,t)$ . ....	24
Abbildung 7 Experimenteller Aufbau für die Hochenergie-Messungen. ....	25
Abbildung 8 : Testkörper mit verschiedenen Materialien konstanter Dicke. ....	26
Abbildung 9 : Durchstrahlungsbild des Testkörpers.....	26
Abbildung 10 Verschiedene Testkörper. ....	27
Abbildung 11 Durchstrahlungsbild des Testkörpers. ....	27
Abbildung 12 Übersicht angewandter Verfahren zur Luftfrachtprüfung.....	30
Abbildung 13 : Allgemeines Prinzip von Sprengstoffspurendetektoren .....	33
Abbildung 14 Receiver Operating Charateristic. ....	38
Abbildung 15 ROC Software.....	39
Abbildung 16 Ermittelte Nachweisgrenze von TNT = 0,3 ng bei POD = 0,9. ....	42
Abbildung 17 Ermittelte Nachweisgrenze von RDX = 1 ng bei POD = 0,9.....	42
Abbildung 18 Modell des Testkörpers in der BAM Software aRTist.....	44
Abbildung 19 Simulationsergebnis des Testkörpers.....	45
Abbildung 20 Dual-Energy-Bild.....	45
Abbildung 21 Drahterkennungstest.....	46
Abbildung 22 Test zur Bewertung .....	47
Abbildung 23 Kontrastempfindlichkeitstest .....	48
Abbildung 24 Test zur Bewertung der Ortsauflösung. ....	49



## **Sichere Luftfracht-Transportkette:** Konzepte, Strategien und Technologien für sichere und effiziente Luftfracht-Transportketten



Abbildung 25 Materialdiskriminierung.....	50
Abbildung 26 Materialdiskriminierung.....	52
Abbildung 27 Dichte und effektive Ordnungszahl .....	54
Abbildung 28 Dichte und Ordnungszahl. ....	54
Abbildung 29 Gefahrstofferkennung.....	55
Abbildung 30 Komplexitätsschätzer .....	56
Abbildung 31 Anschauliche Erklärung des laminographischen Verfahrens.....	57
Abbildung 32 Grundsätzliches Schema des mehrstufigen Konzeptes .....	58
Abbildung 33 Mehrstufiges Verfahren im Detail. ....	59
Abbildung 34 Prinzipskizze des BAM eigenen Hexytech.....	60
Abbildung 35 Konstruktionsskizze mobile Durchstrahlungsanlage. ....	61
Abbildung 36 Die mobile Anlage im praktischen Einsatz.....	61
Abbildung 37 Schneller Hochenergie-Zeilenscan des Luftfrachtcontainers .....	63
Abbildung 38 Abrastern des Luftfrachtcontainers mit Betatron .....	64
Abbildung 39 Links Gesamtübersicht des Luftfrachtcontainers.....	64
Abbildung 40 Für die Demonstration präparierter Testcontainer .....	65
Abbildung 41 Die beiden im Testcontainer platzierten USBV.....	66
Abbildung 42 Laminographie des gesamten Luftfrachtcontainers .....	67
Abbildung 43 Transformator .....	68
Abbildung 44 Industriesauger. ....	69
Abbildung 45 Durchstrahlungsbild des mit Flüssigkeit gefüllten Kanisters .....	70
Abbildung 46 Rekonstruierte Tiefenschichten des Kanisters. ....	71
Abbildung 47 Wischprobennahme am Industriesauger.....	73



## **Sichere Luftfracht-Transportkette:** Konzepte, Strategien und Technologien für sichere und effiziente Luftfracht-Transportketten

gefördert von:



### **Tabellenverzeichnis**

Tabelle 1 Projektpartner .....	8
Tabelle 2 Zusammenstellung Anbieter Durchstrahlungstechniken .....	18
Tabelle 3 Übersicht ausgewählter üblicher Sprengstoffe. ....	32
Tabelle 4 Geräte für die Sprengstoffspurendetektion. ....	37
Tabelle 5 Zuverlässigkeit von Sprengstoff-Screening-Methoden.....	40
Tabelle 6 Materialdiskriminierung .....	51
Tabelle 7 Stoffdichte und effektive Kernladungszahlen. ....	52
Tabelle 8 Verwendeten Flüssigkeiten, Feststoffe und Gefahrstoffsimulantien ....	53
Tabelle 9 Ermittelte Nachweisgrenzen bei TNT und RDX .....	72



## I Kurze Darstellung

Das diesem Abschlussbericht zugrundeliegende Projekt SiLuFra (**S**ichere **L**uft**f**racht-Transportkette: Konzepte, Strategien und Technologien für sichere und effiziente Luftfracht-Transportketten) wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 13N12730 für den Zeitraum vom 01.07.2013 bis zum 30.06.2016 gefördert. Das Projekt wurde gemeinsam durch die nachfolgend in Tabelle 1 genannten Projektpartner bearbeitet

*Tabelle 1 Projektpartner*

Entwicklungspartner		
TUHH Institut für Flugzeug-Kabinensysteme ( <b>FKS</b> )	Nesspriel 5	21129 Hamburg
TUHH Institut für Logistik und Unternehmensführung ( <b>LogU</b> )	Schwarzenbergstr. 95	21073 Hamburg
TUHH Institut für Lufttransportsysteme ( <b>ILT</b> )	Blohmstraße 18	21079 Hamburg
Lufthansa Cargo AG ( <b>LHC</b> )	Flughafen Frankfurt, Flughafenbereich West	60546 Frankfurt
LHU - Luft-Hafen-Umschlag GmbH & Co. KG ( <b>LHU</b> )	Ellerholzdamm 23	20457 Hamburg
HLI Hamburger Logistik Institut GmbH ( <b>HLI</b> )	Bredowstraße 20	22113 Hamburg
Accenture GmbH ( <b>ACC</b> )	Campus Kronberg 1	61476 Kronberg im Taunus
DFN-CERT Services GmbH ( <b>Cert</b> )	Sachsenstraße 5	20097 Hamburg
Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung ( <b>BAM</b> )	Unter den Eichen 87	12205 Berlin
Smiths Heimann GmbH ( <b>SH</b> )	Im Herzen 4	65205 Wiesbaden
Bundespolizei – Referat 24 für Luftsicherheit ( <b>BPoI</b> )	Heinrich-Mann-Allee 103	14473 Potsdam

Das übergreifende Projektmanagement erfolgte unter Koordination des Instituts für Flugzeug-Kabinensysteme (FKS) mit Unterstützung des Instituts für Logistik und Unternehmensführung (LogU) der Technischen Universität Hamburg-Harburg (TUHH).





## Sichere Luftfracht-Transportkette:

Konzepte, Strategien und Technologien für sichere und effiziente Luftfracht-Transportketten

gefördert von:



### 1. Aufgabenstellung

Das übergreifende Ziel des Projektes SiLuFra war die Erhöhung der Sicherheit im Luftverkehr bei gleichzeitiger Steigerung oder zumindest dem Erhalt der derzeitigen wirtschaftlichen Effizienz. Das Hauptaugenmerk lag dabei nicht auf der Entwicklung neuer oder zusätzlicher technischer Komponenten, sondern in einer Verbesserung der Luftfrachtsicherheit durch eine verbesserte Interaktion der beteiligten Akteure in der Luftfracht, einem verbessertem Informations- und Datenaustausch und einer verbesserten Einbettung der bestehenden Technik in die Prozesse und die Organisation der Luftfrachtkette. Dazu wurden im Projekt modellbasierte Lösungsspezifikationen und –konzepte entworfen, welche alle an der Luftfracht-Transportkette beteiligten Akteure einbeziehen. Ausgehend von einem aufzustellendem High-Level-Metamodell der Luftfracht mit einer Darstellung bestehender und künftiger Prozessketten und einer umfassende Analyse der wichtigsten Parameter der Sicherheit in der Luftfracht, insbesondere der relevanten (aktuell eingesetzten) Technologien, des gegenwärtigen Personaleinsatzes sowie der bestehenden Bedrohungen und Sicherheitsbedarfe, sollten umfassende und detaillierte Lösungskonzepte für die Gestaltungsbereiche Organisation, Personal und Technologie erarbeitet werden. Die Ergebnisse sollten in Handlungsempfehlungen und einer Demonstration der entwickelten Konzepte resultieren, wobei besonderes Augenmerk auf die Marktgängigkeit der erarbeiteten Lösungen und damit gegebenen Anschlussmöglichkeiten an die in der Luftfracht-Transportkette agierenden Wirtschaftsunternehmen gelegt wurde.

Für die BAM wurden in der Teilvorhabensbeschreibung individuelle Aufgabenstellungen definiert, wobei der Schwerpunkt auf der Anwendung von Durchstrahlungstechniken und orthogonalen Methoden lag. Der Fokus wurde hier speziell auf die Hochenergierradiographie und die chemische Spurendetektionstechnik gerichtet. Ausgehend von einer umfassenden Analyse der auf dem Markt befindlichen Technologie sollte untersucht werden, wie sich bewährte Techniken und Methoden, allein oder durch Kombination, innovativ für neue Aufgabenfelder speziell in der Luftfrachtprüfung einsetzen lassen, und welche Vorteile sie hinsichtlich der Effizienz in der Prozesskette bieten können. Insbesondere für den Bereich der Hochenergierradiographie sollten Maßnahmen, Methoden und Gerätschaften untersucht werden, um neue bzw. zusätzliche Anwendungsmöglichkeiten zu erschließen, zu erweitern oder einzuführen. Ebenso sollten die einzusetzenden Technologien bewertet werden und Optimierungsbedarfe im Anwendungsfeld identifiziert werden, ebenso wie im Bereich Prozesse und Regularien/Standards. Die Bewertung der Technologien sollte auch hinsichtlich einer Beurteilung der Leistungsfähigkeit erfolgen. Bei bildgebenden Verfahren werden in der zerstörungsfreien Prüfung standardisierte Bildgüteprüfkörper verwendet, um die Fähigkeiten eines Verfahrens zu bewerten. Da hierzu kein Pendant im Bereich der Sicherheitsüberprüfung von Luftfracht existiert, sollten Anforderungen und Kriterien für einen zu entwickelnden Testkörper aufgestellt werden, mit welchem sich Durchstrahlungsverfahren und –anlagen testen und bewerten lassen.



## Sichere Luftfracht-Transportkette:

Konzepte, Strategien und Technologien für sichere und effiziente Luftfracht-Transportketten

gefördert von:



Orthogonal hierzu sollten Verfahren zur Detektion bzw. Identifikation von Gefahrstoffen im Spurenbereich betrachtet und die Verfügbarkeit von Referenz- und Kalibrierproben evaluiert werden. In einer Demonstration sollte sowohl die Hochenergiedurchstrahlung eines individuell gepackten Luftfrachtcontainers mit einer realistisch gestalteten unkonventionellen Spreng- und Brandvorrichtung (USBV), als auch die anschließende Detektion und Identifikation von Gefahrstoffspuren unter Berücksichtigung der im Projekt identifizierten Situationen realitätsnah durchgespielt werden.

### **2. Voraussetzungen unter den das Vorhaben durchgeführt wurde**

Der Bereich Luftfracht stellt einen äußerst sicherheitskritischen Bereich dar, insbesondere da der größte Teil der Fracht (~70%) als sogenannte Belly-Fracht in Passagiermaschinen befördert wird. Die Verordnung (EU) Nr. 2320/2002 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 16. Dezember 2002 zur Festlegung gemeinsamer Vorschriften für die Sicherheit in der Zivilluftfahrt wurde in der Folge der Ereignisse des 11. Septembers 2001 in den Vereinigten Staaten verabschiedet. In Deutschland sind die Maßnahmen zur Luftsicherheit seit dem 15. Januar 2005 im Luftsicherheitsgesetz (LuftSiG) geregelt. Auf terroristische Aktivitäten wie (versuchte) Anschläge wurde von politischer Seite mit immer neuen Regularien und Gesetzen geantwortet. So sind inzwischen zwei neue EU-Verordnungen, die Verordnung (EU) Nr. 300/2008 über gemeinsame Vorschriften für die Sicherheit in der Zivilluftfahrt und zur Aufhebung der Verordnung (EU) Nr. 2320/2002, sowie die Verordnung (EU) Nr. 185/2010 zur Festlegung von detaillierten Maßnahmen für die Durchführung der gemeinsamen Grundstandards in der Luftsicherheit erlassen worden. Die Verordnungen (EU) Nr. 300/2008 sowie deren Durchführungsverordnung (EU) Nr. 185/2010 werden laufend aktualisiert und erweitert, um aktuelle Vorkommnisse und daraus resultierende veränderte Gefahrenbewertung sowie neueste Technologien zu berücksichtigen. Auch während der Projektlaufzeit kam es zu Aktualisierungen. Diese Verordnungen beinhalten Vorschriften zu den vorgeschriebenen Sicherheitskontrollen von Postsendungen und Frachtstücken vor dem Verladen in das Flugzeug. So darf ein Luftfahrtunternehmen 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. 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.



## Sichere Luftfracht-Transportkette:

Konzepte, Strategien und Technologien für sichere und effiziente Luftfracht-Transportketten

gefördert von:



Trotz der Vorschriften und Durchführungsverordnungen ist eine hinreichende Prüfung der Praxistauglichkeit dennoch nicht notwendiger Weise gegeben. Das Ziel von SiLuFra war es deshalb, ein möglichst hohes Sicherheitsniveau unter gleichzeitiger Sicherstellung der Praktikabilität von Maßnahmen und der Wirtschaftlichkeit des Gesamtsystems zu gewährleisten. Dies sollte insbesondere durch ein an den Regularien orientiertes und von den an der Luftfracht beteiligten Akteuren entworfenes Sicherheitskonzept erreicht werden, welches Sicherheitsrisiken detailliert beschreibt und die Umsetzbarkeit und Wirksamkeit der Regularien genau untersucht. Hinsichtlich der Dokumentation von Frachtbewegungen und des Sicherheitsstatus wird die Luftfrachtbranche durch stark fragmentierte Informationssysteme und Medienbrüche beim Gefahrenübergang gekennzeichnet. Innerhalb der Prozesskette vom Versender bis zur Verladung in das Flugzeug stellen vor allem zwischenzeitlich auftretende Verdachtsmomente eine zentrale Problemstellung dar. In Deutschland und auch auf europäischer Ebene existieren derzeit keine integralen bzw. praktikablen Konzepte zur Lösung der gegenständlichen Sicherheitsproblematik. Dies gilt sowohl für Strukturen als auch für Strategien und Prozesse. Insbesondere besteht kein Gesamtansatz mit einer dokumentierten Metaebene zur Erhöhung der Sicherheit und Effizienz im Luftverkehr. Kernpunkt des Projektes SiLuFra war daher die Sicherheit über die gesamte Transportkette und alle Akteure hinweg bei zugleich hoher Prozesseffizienz zu gewährleisten.

### 3. Planung und Ablauf des Vorhabens

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

- AP 1: Analyse Prozesse & Regularien
- AP 2: Analyse relevanter Technologien
- AP 3: Analyse bestehender Personaleinsatz
- AP 4: Bedrohungs- und Bedarfsanalyse
- AP 5: Entwurf von Zukunftsszenarien
- AP 6: Lösungskonzepte für den Gestaltungsbereich Organisation
- AP 7: Lösungskonzepte für den Gestaltungsbereich Personal
- AP 8: Lösungskonzepte für den Gestaltungsbereich Technologie
- AP 9: Demonstration und Integration der Konzepte
- AP 10: (Aus-) Wirkungsanalyse
- AP 11: Entwurf von Handlungsempfehlungen

Die Entwicklungspartner waren jeweils an unterschiedlichen Arbeitspaketen mit ihren jeweiligen Schwerpunkten beteiligt. Für die BAM waren nur die Arbeitspakete 2, 4, 8, 9 und 11 relevant. Im Folgenden wird jedoch der Vollständigkeit halber ein kurzer Überblick über alle Arbeitspakete gegeben. Entsprechend der im Abschnitt I.1. umrissenen Arbeitsschwerpunkten wird in den jeweils relevanten Arbeitspaketen auf die durch die BAM bearbeiteten Themenstellung genauer eingegangen:

#### AP1 - Analyse Prozesse & Regularien



## **Sichere Luftfracht-Transportkette:**

Konzepte, Strategien und Technologien für sichere und effiziente Luftfracht-Transportketten

gefördert von:



Im ersten Arbeitspaket wurden die grundlegenden Prozesse und Regularien beim Transport von Frachtgütern im Luftverkehr identifiziert und als High-Level Metamodell dargestellt. Ziel des Arbeitspaketes war eine Beschreibung der vollständigen Luftfrachttransportkette unter Einschluss aller beteiligten Akteure. Dieses Modell bildete die Grundlage für die in den späteren Arbeitspaketen erfolgende Bedrohungs- und Bedarfsanalysen. Für die Erfassung der IST-Aufnahme wurden Interviews und Befragungen mit den beteiligten Unternehmen, Dienstleistern und Behörden durchgeführt.

### **AP2 - Analyse relevanter Technologien**

In Arbeitspaket 2 wurden sowohl die aktuell in den Logistikprozessen eingesetzten als auch die zukünftig einsetzbaren Technologien betrachtet und hinsichtlich ihrer Möglichkeiten und ihres Technologiereifegrades bewertet. Im Mittelpunkt stand dabei die Eignung dieser Technologien zur Erhöhung der Sicherheit und Effizienz beim Transport von Frachtgütern, ebenso wie die Identifikation möglicher Schwachstellen. Gleichfalls wurden Technologien betrachtet, welche noch nicht marktreif sind, aber in absehbarer Zeit zur Marktreife entwickelt werden könnten. Aufgabe der BAM war es hier vorhandene und angewandte Durchstrahlungstechniken mit elektromagnetischer Strahlung unterschiedlicher Frequenz, vor allem aus dem Bereich der Hochenergie-Radiographie und orthogonale Vor-Ort Methoden zum chemischen Nachweis von Gefahrstoffen zu analysieren. Dazu wurde zunächst die IST-Situation analysiert und untersucht, welche Anforderungen an die verschiedenen Verfahren und Techniken gestellt werden, und wie gut diese Anforderungen erfüllt werden können.

### **AP3 - Analyse bestehender Personaleinsatz**

Im Arbeitspaket 3 wurde der Faktor Mensch als wesentliches Element innerhalb der Luftfracht-Transportkette untersucht. Zentrales Element war hier die Interaktion zwischen Mensch und Technik. Dazu wurde der Personaleinsatz vor Ort analysiert und mögliche Angriffsvektoren und die Verletzbarkeit der Sicherheit der Transportkette durch das eingesetzte Personal identifiziert.

### **AP4 - Bedrohungs- und Bedarfsanalyse (Prozesse, Regularien, Technologie und Personal)**

Im AP 4 wurde, aufbauend auf den vorangegangenen Arbeitspaketen, eine Bedrohungs- und Bedarfsanalyse durchgeführt. Diese umfasste sowohl die technologischen, regulatorischen und personellen als auch die prozessualen Risiken als Quelle und Ziel einer Bedrohung. Die identifizierten Schwachstellen wurden bewertet und mit bereits existierenden Schutzmaßnahmen abgeglichen, um den tatsächlichen Handlungsbedarf zu ermitteln. Die BAM hat bei dieser Analyse den Schwerpunkt auf die angewandten Durchstrahlungsverfahren gelegt. Hier ist die Erkennung von Gefahrenmerkmalen abhängig von Material und Art der Ladung, eingesetzter Technik, aber auch der Erfahrung der Anwender. Es wurden Entwicklungsbedarfe identifiziert, sowie Möglichkeiten und Grenzen der eingesetzten Technologie aufgezeigt. Darüber hinaus wurden auch zukunftsweisende Ideen identifiziert und Aspekte der Regelsetzung und Normung berücksichtigt.



## **Sichere Luftfracht-Transportkette:**

Konzepte, Strategien und Technologien für sichere und effiziente Luftfracht-Transportketten

gefördert von:



### **AP5 - Entwurf von Zukunftsszenarien**

Ziel des AP 5 war der Entwurf und die Darstellung von Zukunftsszenarien in der Luftfracht-Transportkette. Dazu wurden Beispielszenarien mit konkreten Abläufen, Anwendungsfällen und Sicherheitslösungen beschrieben.

### **AP6 - Lösungskonzepte für den Gestaltungsbereich Organisation**

Im AP 6 wurden Lösungskonzepte für den Gestaltungsbereich Organisation entworfen. Hier wurde das Augenmerk vor allem auf eine Optimierung hinsichtlich der Sicherheit und Effizienz beim Transport von Luftfracht gelegt. Aufbauend auf der in den vorhergehenden Arbeitspaketen erfolgten IST-Analyse wurden Optimierungspotentiale erschlossen und ein SOLL-Konzept entworfen. Dafür wurden Organisations- und Interaktionsmodelle für alle beteiligten Unternehmen und Behörden erstellt.

### **AP7 - Lösungskonzepte für den Gestaltungsbereich Personal**

Im AP 7 wurden Lösungskonzepte für den Gestaltungsbereich Personal entwickelt. Dies beinhaltete sowohl eine Optimierung des Personaleinsatzes als auch Konzepte für eine optimale Personalauswahl und Personalentwicklung. Es wurden definierte Anforderungsprofile an das verwendete Personal entworfen, um die Sicherheit und Effizienz in der Luftfracht-Transportkette zu steigern. Ebenso wurden Konzepte zu Ausbildung, Weiterbildung und Einsatz, aber auch Kontrolle des Personals erarbeitet.

### **AP8 - Lösungskonzepte für den Gestaltungsbereich Technologie**

Im AP 8 wurden analog zu den vorhergehenden Arbeitspaketen Lösungskonzepte erarbeitet, welche sich hier jedoch auf den Gestaltungsbereich Technologie konzentrierten. Ziel in diesem Arbeitspaket war es den Transport von Frachtgütern im Luftverkehr hinsichtlich Sicherheit und Effizienz zu optimieren. Grundlage für die Lösungskonzepte war der in AP 2 analysierte IST-Zustand. Im AP 8 wurden weniger neue Techniken zur Identifizierung sicherer und unsicherer Fracht entworfen, als vielmehr ein effizienterer Einsatz der vorhandenen Detektionstechniken untersucht. Die BAM hat in diesem Arbeitspaket ein Konzept zur Durchstrahlung von Luftfracht mittels Hochenergie-Radiographie mit anschließender Gefahrstoffdetektion entworfen. Hierbei wurden die in den vorhergehenden Arbeitspaketen identifizierten Anforderungen, ebenso wie die spezifische Zusammensetzung der zu untersuchenden Fracht berücksichtigt.

### **AP9 - Demonstration und Integration der Konzepte**

Das AP 9 umfasste die Demonstration und Integration der in den vorhergehenden Arbeitspaketen entwickelten Lösungen zu einer Gesamtlösung. Neben den technischen Lösungen wurden hier auch bislang übliche Prozesse in der Luftfracht modifiziert und abgebildet. Darüber hinaus wurde eine Strategie zur Vermarktung und Verwertung der im Projekt generierten Ergebnisse entworfen. Für die BAM war das Ziel dieses Arbeitspaketes die Durchstrahlung eines Luftfrachtcontainers mittels





## Sichere Luftfracht-Transportkette:

Konzepte, Strategien und Technologien für sichere und effiziente Luftfracht-Transportketten

gefördert von:



Hochenergie und die anschließende Gefahrstoffdetektion unter Berücksichtigung der im Projekt identifizierten Bedürfnisse und Situation realitätsnah zu demonstrieren.

### AP10 - (Aus-) Wirkungsanalyse

In diesem Arbeitspaket wurden die Auswirkungen und die Akzeptanz der in den vorhergehenden Arbeitspaketen entwickelten Lösungen bei den betroffenen Unternehmen, bzw. Anwendern untersucht. Dazu wurden Expertenbefragungen durchgeführt und dokumentiert.

### AP11 - Entwurf von Handlungsempfehlungen

Im letzten Arbeitspaket wurden die erarbeiteten Lösungen und Handlungsoptionen zur Erhöhung der Sicherheit und Effizienz in der Luftfracht-Transportkette gebündelt, eruiert und in einen gemeinsamen Maßnahmenkatalog überführt. Die BAM steuerte hier technische Aspekte zu den Handlungsempfehlungen bei, insbesondere eine Gegenüberstellung, mit welcher Technik welche Objekte so untersucht werden können, dass Gefahrenmomente mit vertretbarer Sicherheit erkannt werden.

Der zeitliche Ablauf des Projekts im Rahmen der Projektlaufzeit vom 01.07.2013 bis 30.06.2016 wird in Abbildung 1 dargestellt.

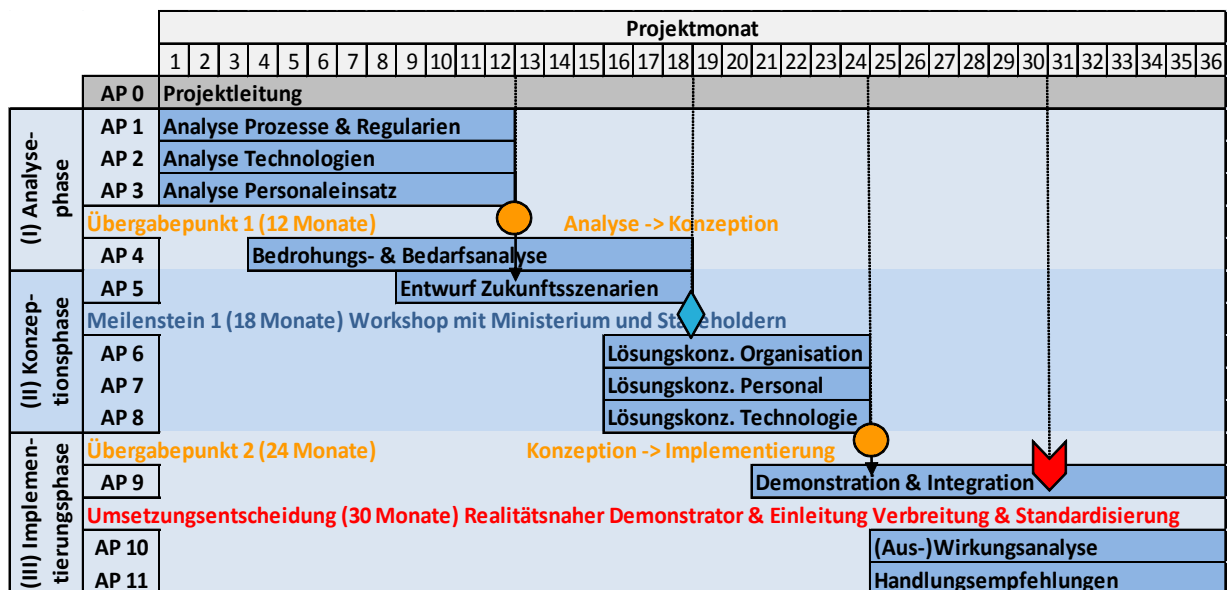


Abbildung 1 Zeitlicher Ablauf des Projektes.

## 4. Wissenschaftlicher und technischer Stand

Auf EU-Ebene wurde, bzw. wird Sicherheitsforschung der EU-Staaten innerhalb des siebten Forschungsrahmenprogramms (FP7, 2007 - 2013) und Horizon2020 (2014-2020) betrieben. Auch Forschungsvorhaben in Deutschland auf nationaler Ebene



## Sichere Luftfracht-Transportkette:

Konzepte, Strategien und Technologien für sichere und effiziente Luftfracht-Transportketten

gefördert von:



befassen sich mit der Sicherheit des Lufttransports. Die Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung hat als Bundesoberbehörde die Aufgabe Sicherheit in Chemie und Technik zu gewährleisten und war an einigen dieser Projekte beteiligt. Beispielhaft genannt seien hier die Projekte ACCIS („Automatisches Cargo-Container Inspektionssystem“), in welchem der kombinierte Einsatz von Neutronen- und Gammastrahlen zur Identifikation von Materialien bei der Inspektion von Luftfrachtcontainern untersucht wurde. Im Projekt FluSs („Flughafen-Sicherungssystem“) wurden Konzepte zum Sicherheitsmanagement bewertet, im Projekt SefLog („Sichere und effiziente Logistikprozesse“) wurden Technologien zur Gefahrendetektion in Frachtcontainern untersucht. Im Projekt ESecLog („Enhanced Security for Logistics“) entwickelte die BAM Hard- und Software zur Erhöhung der Sicherheit in der Luftfracht.

Es liegt im Aufgabenbereich der BAM, angewandte Methoden zu prüfen und zu bewerten. Bei der Bewertung der Durchstrahlungstechniken arbeitet die BAM in den entsprechenden Normungsgremien, wie DIN, 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. In Bezug auf bildgebende Verfahren mit Röntgen-, mm-Wellen-, Terahertz- und Neutronenstrahlen, sowie darauf aufbauende Rekonstruktionsverfahren (Tomographie) verfügt die BAM über jahrzehntelange Erfahrung. Auch bei der Anwendung und Bewertung von Detektionsverfahren zum Nachweis von Gefahrstoffen verfügt die BAM, gemäß ihrem Aufgabenbereich, über langjährige Expertise. Durchstrahlungs- und Spurendetektionsverfahren werden bei der Gepäck- und Containerüberwachung und bei der Personenkontrolle standardmäßig angewendet. Zum Einsatz kommen niederenergetische Röntgenquellen bei der Durchstrahlung und beispielsweise Ionenmobilitätsspektrometer (IMS) bei der Spurendetektion. Da im Projekt SiLuFra keine technischen oder methodischen Neuentwicklungen angestrebt wurden, evaluierte die BAM im Projekt die Anwendung und Kombination bewährter Methoden für die Untersuchung von Luftfracht, um einen effizienteren und die Sicherheit erhöhenden Einsatz dieser Techniken zu ermöglichen.

Zusätzlich wurden bei Vor-Ort Terminen bei den Projektpartnern (Smith Heimann GmbH) und assoziierten Partnern (Lufthansa Cargo AG, Flughafen Frankfurt) Probleme im praktischen Einsatz bei 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. Ein das Vorhaben begleitendes Advisory Board setzt sich zusammen aus



## **Sichere Luftfracht-Transportkette:**

Konzepte, Strategien und Technologien für sichere und effiziente Luftfracht-Transportketten

gefördert von:



- VACAD - Verband der Air Cargo Abfertiger Deutschlands e.V.
- Kühne + Nagel (AG & Co.) KG
- Flughafen Hamburg GmbH mit ihrer Abteilung Luftfracht
- IATA Cargo Security Group
- DAKOSY Datenkommunikationssystem AG
- Lufthansa Technik AG
- Luftfahrt-Bundesamt (LBA)
- Siemens AG - Infrastructure & Cities Sector
- a.hartrodt (GmbH & Co) KG - Hamburg Airfreight
- BMW Group
- Airbus Operations GmbH
- AOB Außenwirtschafts- und Organisationsberatung
- TAPA EMEA Transported Asset Protection Association Europe, Middle East and Africa
- Duisburg packing logistics GmbH
- Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e.V. GDV
- CHAMP Cargosystems (Germany) GmbH
- Lorenz Sönnichsen - Loss Prevention Beratung

Durch die gleichzeitige Beteiligung des Projektpartners BAM und der assoziierten Partner Lufthansa Cargo und Luftfahrtbundesamt (LBA) an den Projekten ESecLog und SiLuFra konnte ein fortlaufender inhaltlicher Austausch zwischen den Projekten stattfinden.

## **II Eingehende Darstellung**

### **1. Wichtige wissenschaftliche Ergebnisse**

#### **1.1 Analyse vorhandener Durchstrahlungstechniken**

Ein Fokus bei den Arbeiten der BAM in den Arbeitspaketen 2 und 4 lag auf der Analyse der vorhandenen Durchstrahlungstechniken und ihrer potentiellen Schwachstellen. Diese Analyse bildete auch die Grundlage für die Ermittlung der Optimierungsbedarfe und der Ausarbeitung eines verbesserten Durchstrahlungskonzeptes. Die zu untersuchenden Methoden konzentrierten sich





## Sichere Luftfracht-Transportkette:

Konzepte, Strategien und Technologien für sichere und effiziente Luftfracht-Transportketten

gefördert von:



speziell auf die Durchstrahlungsverfahren im Hochenergiebereich sowie ergänzend auf den Einsatz alternativer Strahlenverfahren.

Zunächst erfolgte eine Recherche über die weltweiten Hersteller von Technologien zur Durchstrahlung von Luftfracht und deren Angebot an zugehörigen Produkten. Hier gibt es mehrere Anbieter, die auf dem internationalen Markt vertreten sind.

Tabelle 2 zeigt eine Zusammenstellung von vergleichbaren auf dem Markt vorhandenen Röntgenprüfsystemen für die Luftfrachtkontrolle. Verglichen werden hier speziell Röntgensysteme, die eine Tunnelgröße von 1.00-2.0m x 1.00-2.0m 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.

Speziell für den Einsatz in Deutschland gibt es hier Richtlinien und Anforderungen für die Zulassung durch die zuständige Behörde, das Luftfahrtbundesamt (LBA). Die in deutschen Luftfrachtunternehmen am häufigsten eingesetzten Geräte sind von den Firmen Smiths Detection und von Rapiscan. Die hier am häufigsten eingesetzten Anlagen sind die HI-SCAN 180180-2is von Smiths Detection mit einer Tunnelgröße von 1.80m x 1.80m, sowie die vergleichbare Anlage von Rapiscan, Rapiscan 638XR, welche sich nur in der eingesetzten Röntgenröhrenspannung (lt. Herstellerangabe) von der Smiths Detection Anlage unterscheidet (siehe Abbildung 2).

Fast alle aufgelisteten Durchstrahlungsanlagen nutzen die Dual View und die Dual Energy Technologie. Mit Dual-View ist die Durchstrahlung aus zwei verschiedenen Richtungen gemeint, zum einen horizontal (von der Seite) und vertikal (von oben). Dual-Energy bedeutet die Durchstrahlung mit zwei unterschiedlichen Röntgenenergien. Dies ermöglicht in gewissem Umfang eine Materialdiskriminierung. Es erfolgt eine Unterscheidung zwischen anorganischen und organischen Materialien, wobei sowohl die Materialdichte als auch die unterschiedlichen effektiven Kernladungszahlen  $Z_{\text{eff}}$  eine Rolle spielen.

Organisches Material erscheint im Dual-Energy Bild in der Regel orange, anorganisches Material grün, blau bzw. lila.

Company / Manufacturer	Reference	Type	Tunnel Size	X-ray source energy	Penetration	Technology	Application
Smiths Detection	<a href="http://www.smithsdetection.com/de/produkte-loesungen/roentgenpruefung">http://www.smithsdetection.com/de/produkte-loesungen/roentgenpruefung</a>	HI-SCAN180180-2is	1.8m x 1.8m	300 kV	60 mm steel	dual view, dual energy material discrimination	parcels, pallets, LD-3 air freight containers
Rapiscan	<a href="http://www.rapiscansystems.com/en/products">http://www.rapiscansystems.com/en/products</a>	Rapiscan 638XR	1.8m x 1.8m	200 kV	50 mm steel	dual view, dual energy material discrimination	parcels, pallets, LD-3 air freight containers
Nuctech	<a href="http://www.nuctech.com/templates/T_ThreProduct_EN/index.aspx?nodeid=169">http://www.nuctech.com/templates/T_ThreProduct_EN/index.aspx?nodeid=169</a>	CX150180SI	1.55m x 1.81m	~200 kV	50 mm steel	single view, dual energy	parcels, pallets
Adani	<a href="http://security.adanisystems.com/en/catalog/freight_and_cargo_inspection_systems">http://security.adanisystems.com/en/catalog/freight_and_cargo_inspection_systems</a>	BV 160165	1.62m x 1.65m	200 kV	~ 60 mm steel	single view, dual energy	parcels, pallets
L3 Security & Detection Systems	<a href="http://www.sds.l3com.com/products/cargoscreen.htm">http://www.sds.l3com.com/products/cargoscreen.htm</a>	CX-Pallet	> 2m x 2m	> 500 kV	~ 200 mm steel	dual view, dual energy material discrimination	parcels, pallets, air freight containers (also densely packed)
Eidetics Corporation	<a href="http://www.eideticscorp.com/THScan/palletized_cargo_inspection.htm">http://www.eideticscorp.com/THScan/palletized_cargo_inspection.htm</a>	TH Scan: PB2024	> 2m x 2m	> 500 kV	~ 200 mm steel	dual view, dual energy material discrimination	parcels, pallets, air freight containers (also densely packed)
Safran Morpho	<a href="http://www.morpho.com/detection/voir-tous-les-produits/x-ray/?lang=en">http://www.morpho.com/detection/voir-tous-les-produits/x-ray/?lang=en</a>	HRX 180™	1.8m x 1.8m	~ 300 kV ?	programmable penetration	dual view, dual energy material discrimination	parcels, pallets, air freight containers
AS&E	<a href="http://www.as-e.com/products-solutions/markets/air-cargo">http://www.as-e.com/products-solutions/markets/air-cargo</a>	GEMINI®100100	1.0m x 1.0m	~200 kV	34 mm steel	dual view, dual energy material discrimination	large parcels, breakbulk cargo
ASTROPHYSICS	<a href="http://www.astrophysicsinc.com/content/cargo">http://www.astrophysicsinc.com/content/cargo</a>	XIS 1818DV	1.81m x 1.80m	320 kV	for „in-depth“ screening	dual view	Cargo, Military Cargo

**Tabelle 2 Zusammenstellung weltweiter Anbieter von Durchstrahlungstechniken für die Luftfrachtprüfung.**

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). Da der BAM bis zum jetzigen Zeitpunkt 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 auch eine Bewertung der Fehlalarmraten vertrauliche Informationen von der Herstellerseite, so dass die BAM hier keine Auskünfte darüber geben kann.



Smiths Detection: HI-SCAN180180-2is

Rapiscan Systems: Rapiscan 638XR

**Abbildung 2 Die am häufigsten eingesetzten Modell zur Durchstrahlung von Luftfracht.**

Bemerkenswert sind die beiden Luftfrachtdurchstrahlungsanlagen der Firmen L3 und Eidetics (siehe Abbildung 3). Sowohl die Anlage von L3: CX-Pallet als auch die von Eidetics: TH Scan PB2024 haben eine Tunnelgröße von  $> 2\text{ m} \times 2\text{ m}$ , die bei beiden variabel eingestellt werden kann und nutzen eine Durchstrahlungsenergie von  $> 500\text{ keV}$ . Durch die Anwendung der Hochenergie-radiographie resultiert hier eine größere Durchdringungsfähigkeit von bis zu  $200\text{ mm}$  Stahl. Daraus resultieren weniger Dunkelalarme, da auch dichtgepackte Paletten und Container mit schwerem Packgut durchdrungen werden können.



L3: CX-Pallet



Eidetics: TH Scan PB2024

**Abbildung 3 : Durchstrahlungsanlagen verschiedener Anbieter im Hochenergiebereich.**

Ein entscheidendes Kriterium für die Aufstellung und Nutzung von Röntgensystemen für die Frachtprüfung sind die in Deutschland zu berücksichtigenden Strahlenschutzbestimmungen. Die Geräte die eine Durchstrahlungsenergie von  $> 500\text{ keV}$  nutzen, unterliegen in Deutschland strengeren Schutzmaßnahmen als jene im niederenergetischen Bereich von  $200\text{-}300\text{ keV}$ . Bei allen aufgezeigten Durchstrahlungsanlagen sind die Abschirmungen von Strahlung in das Gesamtsystem integriert.

Alle aufgelisteten Herstellerfirmen bieten in ihrer Produktpalette individuelle Systeme in Bezug auf die zu untersuchende Fracht an. Es sind auch Röntgengeräte vorhanden, die nur für kleine Pakete oder Packstücke ausgelegt sind (variabel in der Tunnelgröße und Durchstrahlungsenergie). Durch die Vorort-Besichtigungen von Luftfrachttransportunternehmen hat sich hier aber herausgestellt, dass Geräte mit größerer Tunnelgröße bevorzugt eingesetzt werden, da mit diesen jede Fracht bis hin zum Luftfrachtcontainer durchstrahlt werden kann, und somit die Anschaffungskosten geringer sind als bei zwei oder drei Geräten, die nur eine bestimmte Größe haben.



## Sichere Luftfracht-Transportkette:

Konzepte, Strategien und Technologien für sichere und effiziente Luftfracht-Transportketten

gefördert von:



### 1.2 Analyse der Hochenergierradiographie

Die durchgeführte Analyse der Durchstrahlungstechniken beinhaltete auch die Untersuchungen der Anforderungen und der Erfüllung bzw. Zuverlässigkeit der verschiedenen eingesetzten Verfahren und Techniken. Hierzu wurde von der BAM speziell auf die Anwendbarkeit und Einsetzbarkeit des von allen Herstellern integrierten Dual-Energy-Verfahrens zur Materialdiskriminierung eingegangen. Speziell die Anwendbarkeit in der Hochenergierradiographie wurde untersucht, da diese aufgrund der nötigen Strahlenschutzvorkehrungen noch nicht weit verbreitet ist. Parallel wurden die Auswertungsmöglichkeiten untersucht. Hierbei ging es speziell um die Kriterien zur Bildanalyse, Bildbewertung und Bildauswertung beim Einsatz dieses Verfahrens.

Der Vorteil der Hochenergierradiographie in der Frachtprüfung liegt in der höheren Durchdringungsfähigkeit. Gerade im Frachtbereich stoßen herkömmliche Frachtscanner an ihre Grenzen, beispielsweise wenn sich metallene Motorenteile in der Fracht befinden. Im Durchstrahlungsbild erscheinen diese Regionen dann als dunkle Bereiche, in welchen sich nur schwer oder gar nicht Details erkennen lassen. Im Extremfall muss daher eine manuelle Inspektion der Fracht erfolgen.

Das Dual-Energy-Verfahren wird zur Darstellung und Qualifizierung von unterschiedlichen Materialien innerhalb eines Prüfobjektes (Frachtstücks) verwendet. Bei Durchstrahlungsaufnahmen mit nur einer Energie erhält man auf dem Detektor einen Grauwert, welcher von der Materialdicke und den Absorptionseigenschaften des durchstrahlten Materials abhängig ist. Rückschlüsse auf das Material selbst sind dabei nur sehr bedingt, bzw. gar nicht möglich. Da die Absorptionseigenschaften eines Materials jedoch nicht nur vom Material selbst, sondern auch von der Energie der verwendeten Röntgenstrahlung abhängen, lassen sich durch die Durchstrahlung eines Objektes mit zwei verschiedenen Energien Rückschlüsse auf das Material ziehen.

Durch die Verrechnung beider Durchstrahlungsaufnahmen werden Rückschlüsse auf die Kernladungszahl und die Dichteverteilung der verschiedenen Materialien und damit eine Materialdiskriminierung ermöglicht.

Grundsätzlich wird die Schwächung von Röntgenstrahlung in Materie durch Photoionisation, Compton-Streuung und Paarbildung verursacht. Der Anteil und die Größe des jeweiligen Effektes hängen von der Energie der Röntgenstrahlung, ihrer spektralen Verteilung, der effektiven Kernladungszahl  $Z_{\text{eff}}$  des durchstrahlten Materials, seiner Dichte und, durch spektrale Aufhärtung, auch von der durchstrahlten Materialdicke ab. Auftretende Streustrahlung ist bei der Berechnung ebenfalls zu berücksichtigen.

Die Dual-Energy-Messung ist bei Röntgenuntersuchungen mit niedrigen Energien (<450keV), wie beispielsweise bei der Gepäckprüfung, Stand der Technik. Die Röntgenspektren bei den beiden jeweils verwendeten Energien sind gut getrennt, die effektive Schwächung ist primär von der effektiven Kernladungszahl abhängig.

Bei der Hochenergierradiographie kommen in der Regel Linear- oder Kreisbeschleuniger mit Energien >1MeV zum Einsatz. Zum einen sind hier die Spektren für unterschiedliche Energien nicht mehr gut getrennt (siehe Abbildung 4), was zu einer geringeren Abhängigkeit des Schwächungskoeffizienten von der Kernladungszahl führt, andererseits sind die durchstrahlten Materialdicken in der



## Sichere Luftfracht-Transportkette:

Konzepte, Strategien und Technologien für sichere und effiziente Luftfracht-Transportketten

gefördert von:



Hochenergierradiographie bei der Berechnung der effektiven Schwächung nicht mehr zu vernachlässigen, ebenso wie Aufhärtungseffekte. Dies führt zu einer erschwerten Anwendung der Dual-Energy-Methode in der Hochenergierradiographie.

Im Rahmen des Projektes SiLuFra wurden sowohl theoretische Untersuchungen als auch praktische Messungen zur Anwendung der Dual-Energy-Methode in der Hochenergierradiographie durchgeführt. Als Beschleuniger kam ein transportables Betatron mit einer einstellbaren Energie von 2.5 – 7.5 MeV zum Einsatz, für die Bildgebung ein digitaler Matrixdetektor.

In einem ersten Schritt erfolgte die theoretische Modellierung der Dual-Energy-Funktion. Wenn  $S(E)$  das kontinuierliche Röntgenquellenspektrum und  $D(E)$  die Detektorresponsefunktion bezeichnet, dann ist die ohne Absorption gemessene Intensität der Röntgenstrahlung durch

$$I_0 = \int_{E=0}^{E_{\max}} S(E) \cdot D(E) dE$$

gegeben, und die Intensität bei einem absorbierenden Objekt der Dicke  $t$  im Strahlengang durch

$$I = \int_{E=0}^{E_{\max}} S(E) \cdot D(E) e^{-\mu(E) \cdot t} dE$$

Der Schwächungskoeffizient ist dabei gegeben durch

$$\begin{aligned} \mu &= \frac{-1}{t} \left( \log \left( \frac{I}{I_0} \right) \right) = \frac{-1}{t} \left( \log \left( \frac{\int_{E=0}^{E_{\max}} S(E) \cdot D(E) e^{-\mu(E) \cdot t} dE}{\int_{E=0}^{E_{\max}} S(E) \cdot D(E) dE} \right) \right) \\ &= \frac{-1}{t} \left( \log \left( \int_{E=0}^{E_{\max}} W(E) e^{-\mu(E) \cdot t} dE \right) \right) \end{aligned}$$

mit der Wichtungsfunktion

$$W(E) = \frac{S(E) \cdot D(E)}{\int_{E=0}^{E_{\max}} S(E) \cdot D(E) dE}$$

Beim weiteren Vorgehen müssen nun zwei Fälle berücksichtigt werden. Bei kurzen Durchstrahlungslängen (kleine Objekte) kann die Materialdicke vernachlässigt werden und es gilt näherungsweise für den Schwächungskoeffizienten





## Sichere Luftfracht-Transportkette:

Konzepte, Strategien und Technologien für sichere und effiziente Luftfracht-Transportketten

gefördert von:



$$\mu = \int_{E=0}^{E_{\max}} W(E) \mu(E) dE$$

Die Dual-Energy-Funktion ist dann gegeben durch

$$F(Z) = \frac{\mu_{Low}(Z)}{\mu_{High}(Z)} = \left( \frac{\int_{E_1=0}^{E_{\max}} W(E_1) \mu(E_1, Z) dE_1}{\int_{E_2=0}^{E_{\max}} W(E_2) \mu(E_2, Z) dE_2} \right)$$

Wobei *low* and *high* das nieder-, bzw. hochenergetische zur Durchstrahlung verwendete Spektrum bezeichnen.

Bei größeren Durchstrahlungslängen kann die Materialdicke des durchstrahlten Objektes nicht mehr vernachlässigt werden, d.h. die Dual-Energy-Funktion hängt hier nicht mehr nur von der Kernladungszahl des durchstrahlten Materials ab, sondern auch von der Materialdicke. Die Dual-Energy-Funktion ist dann gegeben durch:

$$F(Z) = \frac{\mu_{Low}(Z)}{\mu_{High}(Z)} = \left( \frac{\log \left( \int_{E_1=0}^{E_{\max}} W(E_1) e^{-\mu(E_1, Z) \cdot t} dE_1 \right)}{\log \left( \int_{E_2=0}^{E_{\max}} W(E_2) e^{-\mu(E_2, Z) \cdot t} dE_2 \right)} \right)$$

Abbildung 4 zeigt die, mit der BAM Software „aRTist – analytical Radiographic Testing inspection simulation tool“ (1) simulierten polychromatischen Spektren des Betatrons für die in den Messungen verwendeten Energien von 3 und 7,5 MeV. In Abbildung 5 ist die resultierende Dual-Energy-Funktion für den Fall zu vernachlässigender Materialdicke dargestellt. Es lassen sich drei Regionen identifizieren. Die erste Region umfasst die Materialien mit einem niedrigen Z-Wert ( $Z \leq 10$ ). In dieser Region befinden sich auch die meisten explosiven Stoffe. Hier ist die Dual-Energy-Funktion konstant, eine Materialdiskriminierung ist damit sehr schwierig. Im anschließenden Bereich ändert sich die Dual-Energie-Funktion monoton mit der Ordnungszahl (Z), eine zuverlässige Materialdiskriminierung ist in diesem Bereich gegeben. In einer dritten Region (mit  $Z \geq 46$ ) kann die Dual-Energy-Funktion vergleichbare Werte für zwei unterschiedliche Ordnungszahlen aufweisen. Da sich in diesem Z-Bereich die Schwermetalle befinden, sind diese folglich schwierig zu unterscheiden.

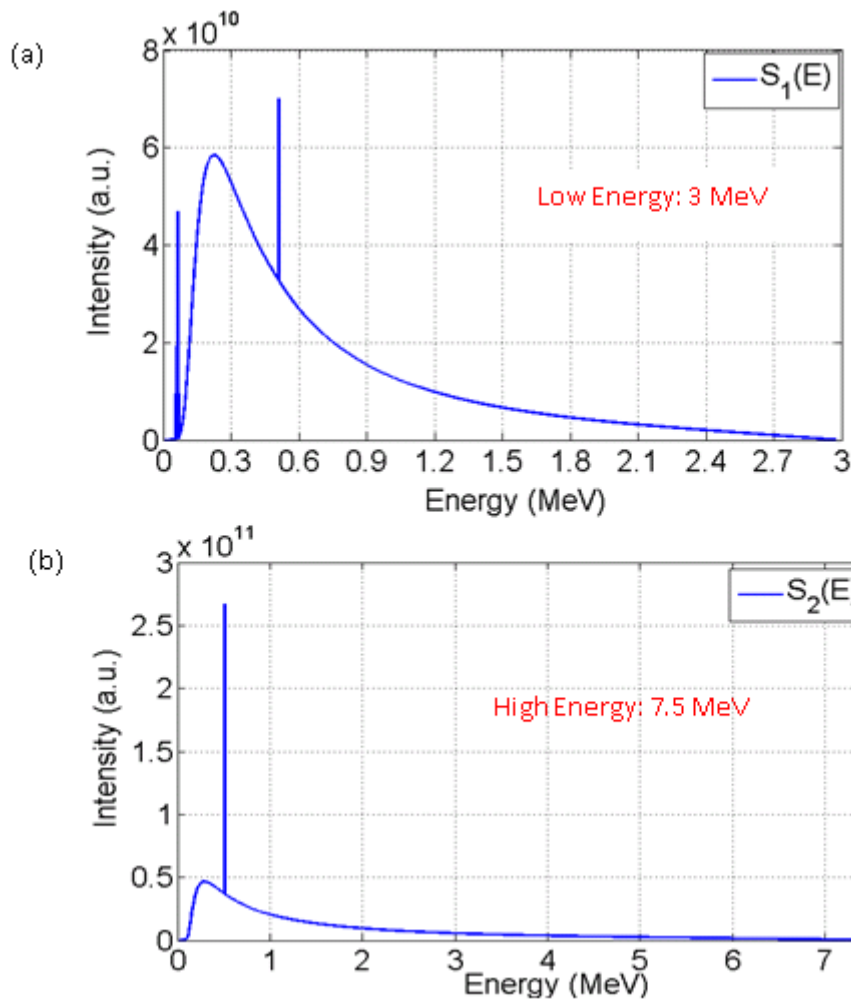


Abbildung 4 Mit aRTist (1) simulierte polychromatische Betatron Röntgenspektren bei einer Energie von (a) 3 MeV und einem 4 mm dicken Cu-Vorfilter und (b) 7.5 MeV mit einem 10 mm dicken Cu-Vorfilter.

In Abbildung 6 ist die Dual-Energy-Funktion bei Berücksichtigung der Durchstrahlungslänge dargestellt. Die Durchstrahlungslänge, also die Materialdicke, nimmt dabei von oben nach unten zu. Die Funktion ist dabei zwischen den Kernladungszahlen  $Z = 1$  und  $Z = 21$  näherungsweise unabhängig von der Materialdicke. Für niedrige Materialdicken ( $t \leq 10$  mm, in Abbildung 6 blau dargestellt) weist sie mehrere monoton steigende Bereiche auf (bspw. zwischen  $Z = 21$  und  $Z = 36$ ). Insgesamt sinkt die Wahrscheinlichkeit, Materialien zu unterscheiden, mit steigender Materialdicke.

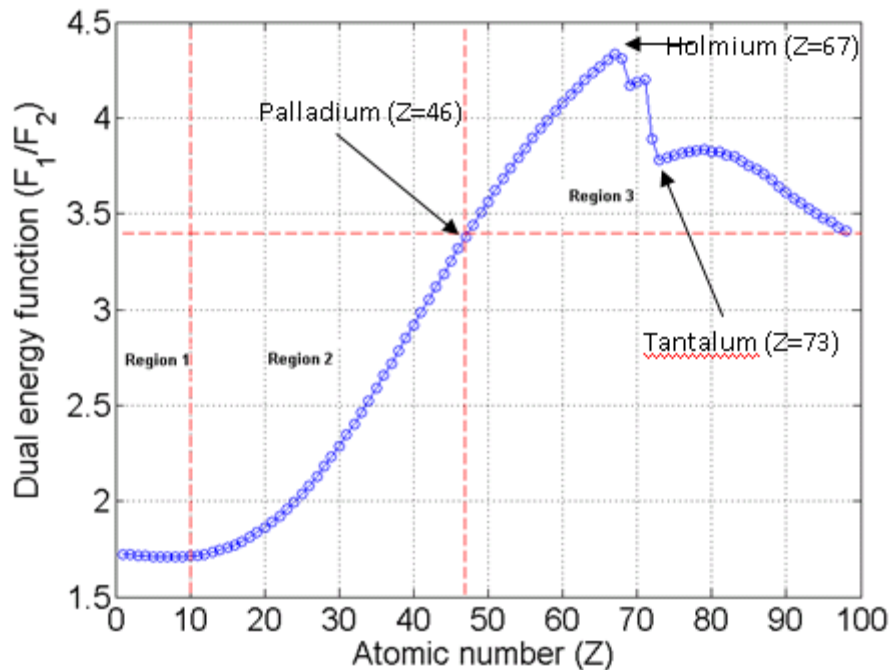


Abbildung 5 Verlauf der Dual-Energy-Funktion  $F(Z)$  für Durchstrahlungsenergien von 3 und 7,5 MeV bei zu vernachlässigender Materialdicke. Der scharfe Einschnitt bei der Ordnungszahl 73 (Tantal) resultiert aus dem Umstand, dass das Target der Betatron-Strahlenquelle aus diesem Metall besteht.

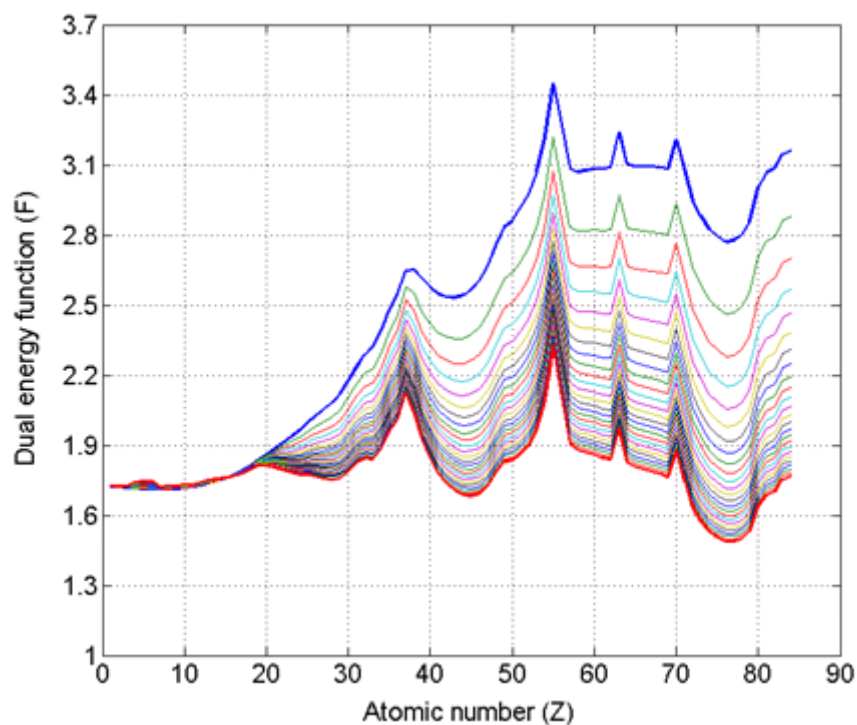
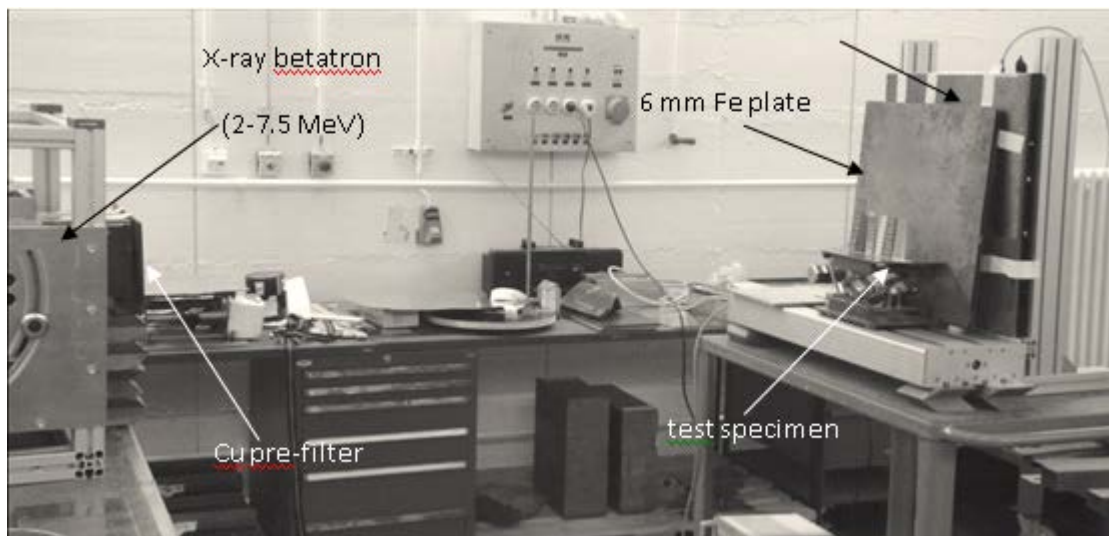


Abbildung 6 Verlauf der Dual-Energy-Funktion  $F(Z,t)$  für unterschiedliche durchstrahlte Materialdicken (von oben nach unten zunehmend).



Zur Validierung der Simulationsergebnisse wurden Hochenergie-Dual-Energy Messungen durchgeführt. Der Versuchsaufbau ist in der Abbildung 7 gezeigt. Als Hochenergie-Strahlungsquelle wurde ein gepulstes Betatron mit einem 0.6 mm Tantalum Target benutzt, welches eine Energie bis zu 7.5 MeV mit einer Pulsfrequenz von 200 Hz hat. Für die Bildgebung wurde ein hochauflösender digitaler Matrix-Detektor (Model: Perkin Elmer XRD 1622) mit einer Detektionsfläche von 40.96 cm x 40.96 cm, 2048 x 2048 Pixeln und einer Pixelgröße von 200  $\mu\text{m}$  verwendet.



**Abbildung 7** Experimenteller Aufbau für die Hochenergie Dual-Energy-Messungen.

In Abbildung 8 ist einer der verwendeten Testkörper dargestellt. Es wurden Materialien mit niedriger Kernladungszahl (low-Z) wie PMMA, PVC, Aluminium (Al) und Magnesium (Mg) und Materialien mit hoher Kernladungszahl (high-Z) wie Eisen (Fe), Kupfer (Cu) und Blei (Pb) verwendet. Alle Materialien wurden auf eine 5mm dicke Fe-Platte aufgebracht. Diese sorgt für eine zusätzliche und für alle einzelnen Testmaterialien gleiche Absorption. Die jeweiligen Durchstrahlungsaufnahmen wurden mit einer Röntgenenergie von 3 und 7,5 MeV angefertigt. Abbildung 9 links zeigt exemplarisch das Durchstrahlungsbild bei 3 MeV, Abbildung 9 rechts das aus den Aufnahmen bei 3 und 7,5 MeV berechnete Dual-Energy-Bild. Metalle (Al, Cu, Fe, Pb, Ti) und organische Materialien (PVC, PMMA) lassen sich gut unterscheiden. Abweichungen konnten bei Magnesium beobachtet werden. Dies liegt an der Empfindlichkeit des Detektors für Streustrahlung, was die Genauigkeit des berechneten Schwächungskoeffizienten herabsetzt. Eine Reduktion des Einflusses der Streustrahlung ließe sich durch Verwendung eines hochauflösenden Zeilendetektors erreichen, da hier jeweils nur ein stark kollimierter Röntgenstrahl detektiert wird, und nur wenig aus anderen Richtungen auftreffende Streustrahlung.

Mit einem weiteren Testkörper (siehe Abbildung 10) wurde der Einfluss der Materialdicke auf die Dual-Energy-Funktion verifiziert. Hier wurden wiederum verschiedene Materialien mit niedriger Kernladungszahl (low-Z) wie z.B. PMMA, Magnesium (Mg), Aluminium (Al) und mit hoher Kernladungszahl (high-Z) wie Eisen (Fe), Kupfer (Cu), Zinn (Sn) verwendet, diesmal jedoch in Form von Stufenkeilen mit

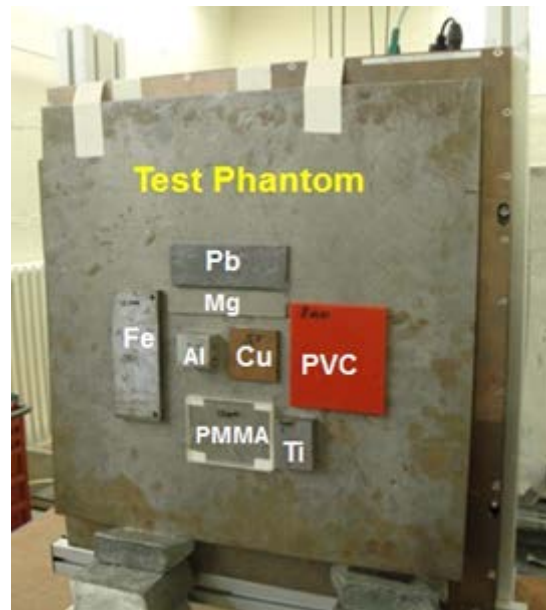


Abbildung 8 : Testkörper mit verschiedenen Materialien konstanter Dicke.

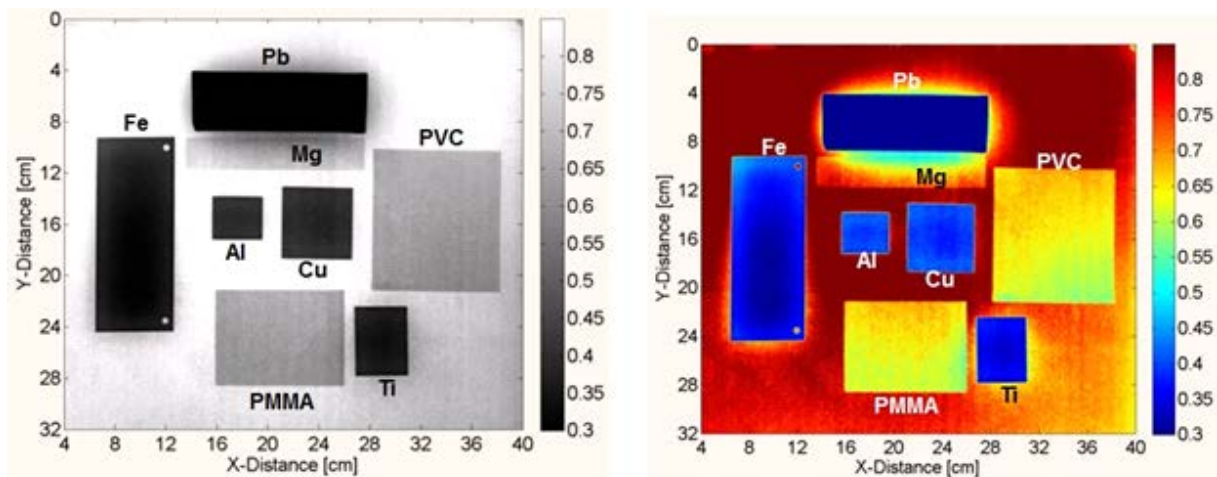


Abbildung 9 : Durchstrahlungsbild bei 3 MeV (links) und berechnetes Dual-Energy Bild (rechts) des in Abbildung 8 gezeigten Testkörpers..

zunehmender Materialdicke. Zusätzlich wurde eine 6 mm dicke Stahlplatte zwischen den Testkörpern und den Matrix-Detektor gestellt. In der Abbildung 11 ist von dem in Abbildung 10 gezeigten Testkörper das Durchstrahlungsbild bei 3MeV (links) und das aus den Aufnahmen bei 3 und 7,5 MeV berechnete Dual Energy Bild (rechts) zu

sehen. Klar zu erkennen ist, dass die Schwächung der Röntgenstrahlen am stärksten durch den verwendeten Fe-Stufenkeil im Vergleich zu den anderen Materialien ist. Die Qualität des Dual-Energy Bildes konnte insgesamt wesentlich verbessert werden, indem zur Aufhängung ein Vorfilter verwendet wurde, welcher den niederenergetischen Anteil des vom Betatron emittierten Bremsstrahlungsspektrums minimiert. Insgesamt lässt sich feststellen, dass sich die Materialdiskriminierung mit steigender Materialdicke verschlechtert. Ein weiterer entscheidender Faktor, welcher bei der Unterscheidung von Materialien berücksichtigt werden muss, ist die vorhandene Streustrahlung. Im Vergleich zu simulierten Dual-Energy-Bildern, bei welchen die Streustrahlung herausgerechnet werden kann, ist hier ein deutlicher Unterschied erkennbar, so dass bei praktischen Messungen Vorkehrungen, wie die Verwendung eines weniger auf Streustrahlung reagierenden Zeilendetektors notwendig sind.

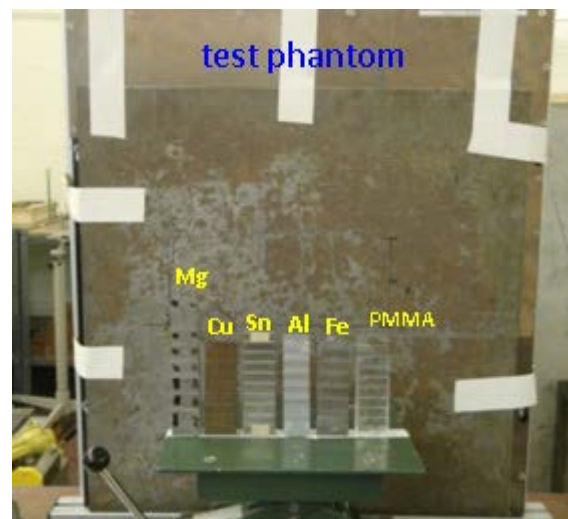


Abbildung 10 Verschiedene Testkörper: Stufenkeile aus low-Z und high-Z Materialien.

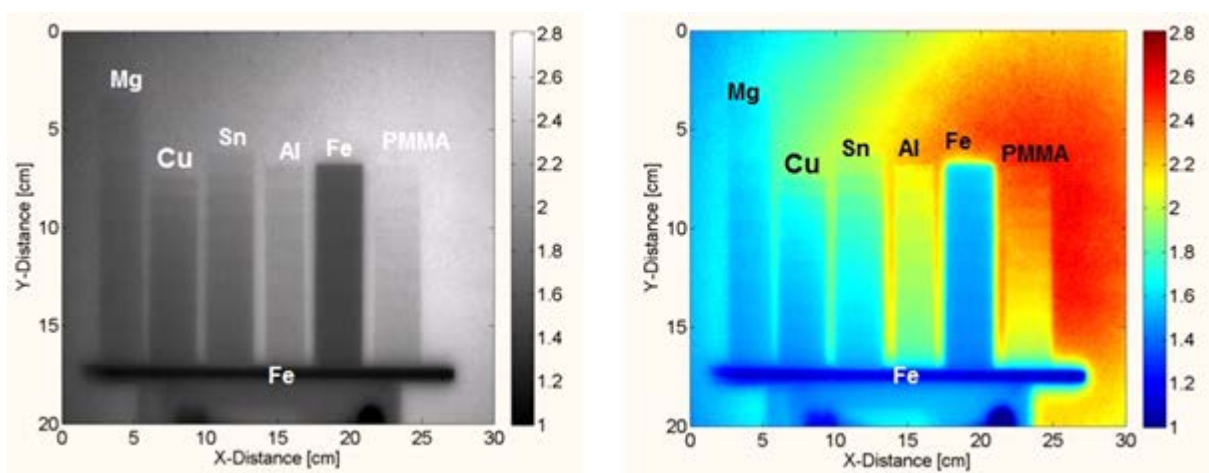


Abbildung 11 Durchstrahlungsbild und berechnetes Dual-Energy Bild des in Abbildung 10 gezeigten Testkörpers.



## Sichere Luftfracht-Transportkette:

Konzepte, Strategien und Technologien für sichere und effiziente Luftfracht-Transportketten

gefördert von:



Eine detaillierte Analyse der erhaltenen Ergebnisse wurde in (2) veröffentlicht.

Ein weiterer Arbeitspunkt im Projekt bestand in der Aufstellung von Kriterien für die Bildanalyse, -bewertung und -auswertung im Bereich der Hochenergierradiographie. Speziell bei der Luftfrachtprüfung handelt es sich dabei um Kriterien zur Gefahrenerkennung im Bild. Hierzu müssen Mindestanforderungen für eine eindeutige Erkennbarkeit des Gefahrenmomentes festgelegt, bzw. überprüft werden. Bei der Hochenergierradiographie gibt es physikalische und technische Besonderheiten, welche berücksichtigt werden müssen. Bei der Aufnahme eines Durchstrahlungsbildes von Luftfracht geht es zunächst um die Objekterkennbarkeit. Hierfür ist die Einstrahlrichtung bzw. die Objektausrichtung für die Untersuchung des Frachtstückes ausschlaggebend. Um die räumliche Erkennbarkeit sicher zu stellen oder zu verbessern, sind Mehrfachprojektionen das Mittel der Wahl, so wie bereits in vielen am Markt erhältlichen Röntgenscannern die Dual-View-Technik angewendet wird. Allgemein führt eine Überdeckung von Strukturen zu schlechterer Erkennbarkeit.

Für die Erkennung von chemischen Gefahrstoffen und Sprengstoffen ist die Dual-Energy-Technik entscheidend, bei der Erkennung von unkonventionellen Spreng- und Brandvorrichtungen spielt auch die räumliche Auflösung und die Bildqualität eine Rolle, um beispielsweise kleine Drähte (Zündvorrichtungen) zu erkennen. Für die Bildqualität sind damit einige Kriterien für eine gute Erkennbarkeit einzuhalten, wie z.B. das Signal-Rausch-Verhältnis (SNR) oder die Ortsauflösung. Für eine gute Erkennbarkeit sind ebenso Objektform und Formerkennung zu berücksichtigen. Hier spielen Objektgrößen, sowie deren typische Signaturen eine Rolle. Die Erkennbarkeit in Durchstrahlungsbildern kann aber durch bestimmte Faktoren an ihre Grenzen stoßen.

Für den Hochenergiebereich sind hier bei der Dual-Energy-Technik spektrale Überlappungen zu nennen, welche eine Materialdiskriminierung erschweren. Dies kann bei der Identifikation von Gefahrstoffen zu einer Verwechslung mit harmlosen Materialien führen, aufgrund unzureichender Materialdiskriminierung. Ebenfalls spielt speziell in der Hochenergierradiographie die Streustrahlungsempfindlichkeit eine Rolle, wobei Matrixdetektoren an ihre Grenzen stoßen können und der Einsatz von kollimierten Zeilendetektoren zu bevorzugen ist.

Weitere Kriterien für die Bildanalyse liegen in der Bilddarstellung. Für die Bildbearbeitung stehen hier die Einstellung von Kontrast und Helligkeit im Vordergrund, sowie auch die Art der Filterungsmethoden z.B. der automatischen Bandpassfilterung. Für die Formerkennung kann Kantenkontrastanhebung entscheidend sein oder die Kompensation von Überlagerungen bspw. wenn ein Vorwissen über gesuchte Formen bereits vorhanden ist. Eine Verbesserung der Bilderkennung kann hier durch das Herausfiltern von störenden Eigenschaften erfolgen, welches für die Auswertung durch eine Minimierung der visuellen Beurteilung durch z.B. die LSKK als Vorteil erweist.

Ein entscheidendes Ergebnis dieses Arbeitspunktes war die Feststellung, dass derzeit kein Testkörper für die Beurteilung der Leistungsfähigkeit der im Einsatz befindlichen Röntgenscanner existiert. Die derzeit verwendeten Testkörper dienen





## Sichere Luftfracht-Transportkette:

Konzepte, Strategien und Technologien für sichere und effiziente Luftfracht-Transportketten

gefördert von:



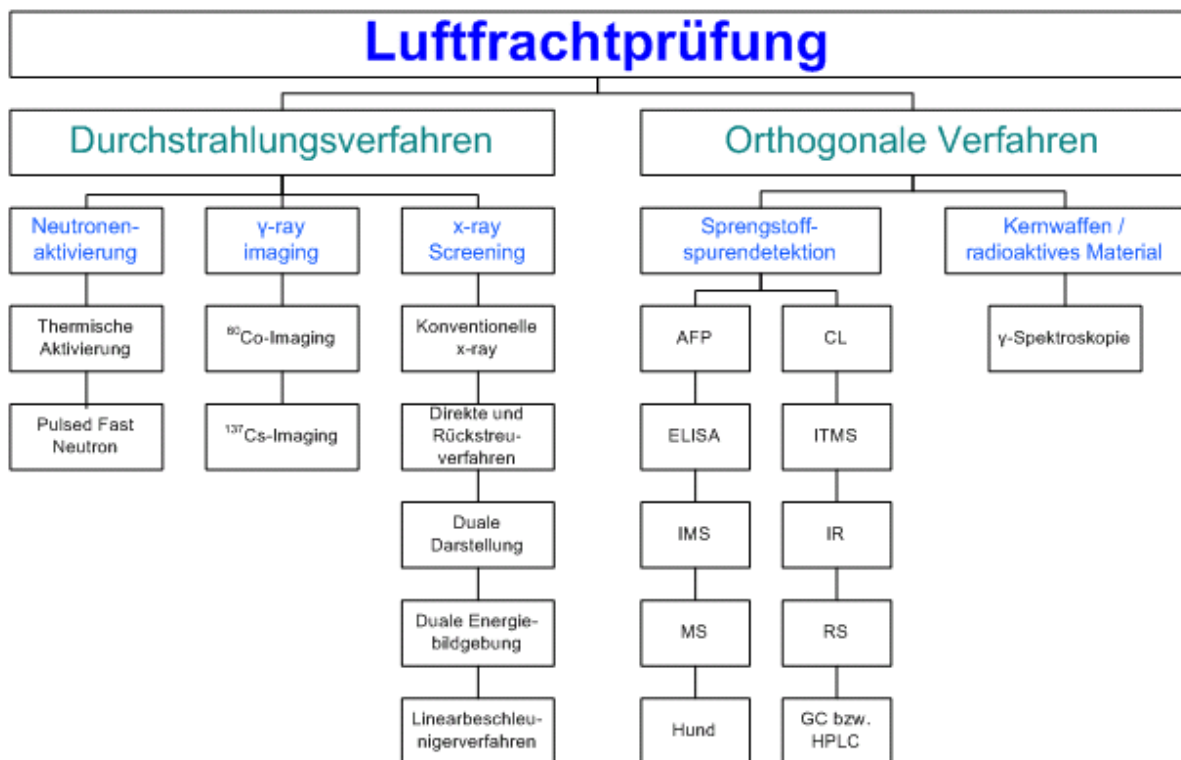
lediglich dem Nachweis, dass die verwendeten Anlagen den Mindestanforderungen genügen. Eine darüber hinausgehende, vergleichende Bewertung der unterschiedlichen Anlagen ist kaum möglich. Ebenso sind die verwendeten Testkörper auf den Einsatz in Gepäckprüfanlagen optimiert, werden aber auch bei den wesentlich größeren Frachtscannern eingesetzt. Eine Weiter- bzw. Neuentwicklung eines Testkörpers speziell für Frachtprüfanlagen wird von der BAM als notwendig angesehen. Dieser Testkörper sollte darüber hinaus eine genauere Beurteilung der Leistungsfähigkeit einer Durchstrahlungsanlage ermöglichen, speziell eine verbesserte Möglichkeit zur Bewertung der Materialdiskriminierung. Weiterhin sollte dieser Testkörper auch für die Hochenergieradiographie verwendbar sein.

### 1.3 Analyse orthogonaler Methoden

Ein weiterer Schwerpunkt des AP2 und AP4 bestand in der Analyse und Bewertung alternativer Durchstrahlungsverfahren und bestehender orthogonaler Methoden. Eine Übersicht der angewandten Verfahren ist in Abbildung 12 gegeben. Die in der Luftfahrtsicherheit relativ neue Terahertz-Technik ist dort nicht aufgeführt, da sie nicht zu den Durchstrahlungsverfahren zählt. Ein bekanntes Beispiel für die Anwendung der Terahertzstrahlung sind die sogenannten Körperscanner. Terahertzstrahlung ist im Gegensatz zu direkt ionisierender Röntgenstrahlung und indirekt ionisierender Neutronenstrahlung nicht ionisierend und daher gesundheitlich unbedenklich. Terahertzstrahlung kann zwar Kleidung und Kunststoffe durchdringen, aber beispielsweise kein Metall. Sie kann daher zur Detektion von unter der Kleidung befindlichen Gegenständen benutzt werden, wie in Körperscannern, aufgrund der mangelnden Durchdringungsfähigkeit jedoch nicht zur Frachtprüfung. Die Durchstrahlung mit Neutronen ist unter technischen Gesichtspunkten, aufgrund der zu Röntgenstrahlung komplementären Durchdringungseigenschaften, vielversprechend. So können beispielsweise massive Metallteile problemlos durchdrungen werden. Das größte Problem im praktischen Einsatz stellt jedoch die notwendige Neutronenquelle dar. Für einen Einsatz bei der Frachtprüfung kommen nur stark radioaktive Quellen in Frage, welche jedoch, abgesehen von den notwendigen Strahlenschutzmaßnahmen, ihrerseits ein nicht unerhebliches Gefährdungspotential darstellen. So würde eine bei der Prüfung möglicherweise detonierende USBV zu einer erheblichen radioaktiven Umweltkontamination führen. Eine weitere Einschränkung bildet die im Vergleich zu Röntgenbildern deutlich schlechtere Qualität der Durchstrahlungsaufnahmen.

Mit dem Begriff orthogonale Methoden werden zu den Durchstrahlungsverfahren komplementäre Methoden bezeichnet, bei denen es sich im Wesentlichen um Verfahren zur Vor-Ort-Detektion von Sprengstoffen (Gefahrstoffe) und deren Vorstufen handelt. Sie werden im Folgenden beschrieben, analysiert und bewertet. Auf dem Markt befindliche Geräte werden in Tabelle 3 aufgelistet. Die Einteilung explosionsgefährlicher Stoffe erfolgt in Sprengstoffe, Initialsprengstoffe, pyrotechnische Erzeugnisse, Schieß- bzw. Zündmittel sowie unkonventionelle Spreng- und Brandvorrichtung (USBV). Unter dem Begriff Sprengstoffe, bzw. Explosivstoffe werden Stoffe oder Stoffgemische zusammengefasst, welche nach

energetischer (mechanischer oder thermischer) Aktivierung innerhalb weniger Sekunden reagieren und dabei eine hohe Energiemenge freisetzen. Die dabei entwickelten Gase benötigen ein größeres Gasvolumen, was eine Druckwelle zur Folge hat. Diese Oxidationsreaktionen sind exotherm, das heißt es wird Wärme freigesetzt. Sprengstoffe enthalten häufig sauerstoffhaltige funktionelle Gruppen. Der Sauerstoff ist meist an Stickstoff – Nitrite, Nitrate, Nitro- oder Nitroverbindungen – oder Chlor – Chlorate und Perchlorate – gebunden. Sprengstoffe mit hohem Gefährdungspotential sind Nitroverbindungen, wie Nitroglycerin (NG), Pentaerythritoltetranitrat (PETN), Hexogen (RDX) und Trinitrotoluol (TNT), siehe Tabelle 3 [(3)(4)(5)]. Bei Initialsprengstoffen handelt es sich um Stoffe, welche durch mechanische oder thermische Einwirkungen sehr schnell zur Detonation kommen. Diese Stoffe werden zur Explosion größerer Mengen trägerer Explosivstoffe verwendet. Wichtige Initialsprengstoffe sind u. a. Knallquecksilber, Bleiazid, Silberazid, Acetonperoxid und Bleipikrat (6)(3)(7). Unter pyrotechnischen Erzeugnissen werden Brand-, Nebel-,



**Abbildung 12** Übersicht angewandter Verfahren zur Luftfrachtprüfung nach Homeland Security Research Corporation(8), Legende: AFP - Amplifying fluorescent polymer based detection technology; CL – Chemolumineszenz; ELISA - antikörperbasierte enzymatische Analyse (engl. enzyme-linked immunosorbent assay); GC – Gaschromatographie; IMS - Ionen-Mobilitäts-Spektroskopie; IR - Infrarot-Spektroskopie; ITMS - Ionen-Einfang-Mobilitäts-Spektroskopie; MS – Massenspektrometrie, RS - Raman-Spektroskopie und γ-ray - Gammaskpektroskopie.



## Sichere Luftfracht-Transportkette:

Konzepte, Strategien und Technologien für sichere und effiziente Luftfracht-Transportketten

gefördert von:



Rauchwaffen, Leuchtsätze, Signalmittel sowie Feuerwerksartikel verstanden. Hier entstehen bei einer exothermen Reaktion Rauch, akustische und optische Effekte. Hauptbestandteile eines pyrotechnischen Satzes sind Oxidationsmittel, Chlorate, Nitrate, Peroxide und Brennstoffe, z. B. Holzkohle, Schwefel und Magnesium sowie Hilfsmittel zur Flammenfärbung und Abbrandregelung. Die Reaktion wird durch Feuer (Flamme, Zündschnur), Reibung, elektrostatische Aufladung oder Schlag ausgelöst. Militärisch genutzte pyrotechnische Erzeugnisse sind Brandwaffen, Signalmittel, Leuchtsätze und Rauchwaffen (3)(9)(10). Treib- und Zündmitteln werden wegen ihrer relativ langsamen Reaktionsgeschwindigkeit als Treibladungspulver für Munition und Pyrotechnik eingesetzt. Die Geschwindigkeit der chemischen Reaktion hängt von der Partikelgröße und -geometrie sowie der chemischen Zusätze dieser Pulver ab. In geschlossenen Behältnissen sind Treibladungspulver als Explosivstoffe anwendbar (3)(4)(11)(12). Bei Sprengstoffen aus Eigenproduktion, sogenannten „Unkonventionellen Spreng- und Brandvorrichtungen (USBV)“ handelt es sich um nicht-industriell hergestellte Sprengladungen (6)(3)(4)(5). Für diese Vorrichtungen ist aufgrund der großen Differenziertheit keine Klassifizierung möglich. Zu ihnen zählen Nitroverbindungen, Peroxide und Mischungen von starken Oxidationsmitteln mit Brennstoffen. Oft verwendete Oxidationsmittel sind Nitrate, Chlorate, Perchlorate und Permanganate. Als Brennstoffe werden Mineral- und Pflanzenöl, Metallpulver, Schwefel und Phosphor eingesetzt (4)(13).

Stoffklasse	Sprengstoff		M / g/mol	Formel	CAS-Nummer
	Akronym	Name			
Salz	---	Ammoniumnitrat	80,04	H <sub>4</sub> N <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6484-52-2
	Aliphatische Nitroverbindungen	---	Nitromethan	61,04	CH <sub>3</sub> NO <sub>2</sub>
	DMNB	2,3-Dimethyl-dinitrobutan	176,17	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> N <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	3964-18-9
Aromatische Nitroverbindungen	<i>o</i> -MNT	2-Nitrotoluol	137,14	C <sub>7</sub> H <sub>7</sub> NO <sub>2</sub>	88-72-2
	<i>p</i> -MNT	4-Nitrotoluol	137,14	C <sub>7</sub> H <sub>7</sub> NO <sub>2</sub>	99-99-0
	DNT	2,4-Dinitrotoluol	182,14	C <sub>7</sub> H <sub>6</sub> N <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	121-14-2
	TNT	2,4,6-Trinitrotoluol	227,13	C <sub>7</sub> H <sub>5</sub> N <sub>3</sub> O <sub>6</sub>	118-96-7
	TNP	2,4,6-Trinitrophenol	229,11	C <sub>6</sub> H <sub>3</sub> N <sub>3</sub> O <sub>7</sub>	88-89-1
Nitratester	EGDN	Ethylglykoldinitrat	152,06	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> N <sub>2</sub> O <sub>6</sub>	628-96-6
	NG	Glycerintrinitrat	227,09	C <sub>3</sub> H <sub>5</sub> N <sub>3</sub> O <sub>9</sub>	55-63-0
	PETN	Pentaerythritoltetranitrat	314,14	C <sub>5</sub> H <sub>8</sub> N <sub>4</sub> O <sub>12</sub>	78-11-5
	NC	Cellulosenitrat (Schießbaumwolle)	327,21	(C <sub>8</sub> H <sub>13</sub> N <sub>3</sub> O <sub>11</sub> ) <sub>n</sub>	9004-70-0
Nitramine	Tetryl	<i>N</i> -Methyl- <i>N</i> -2,4,6-tetranitroanilin	287,15	C <sub>7</sub> H <sub>5</sub> N <sub>5</sub> O <sub>8</sub>	479-45-8
	RDX	Hexogen	222,12	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> N <sub>6</sub> O <sub>6</sub>	121-82-4



## Sichere Luftfracht-Transportkette: Konzepte, Strategien und Technologien für sichere und effiziente Luftfracht-Transportketten

gefördert von:



	HMX	Oktogen	296,16	$C_4H_8N_8O_8$	2691-41-0
	CL-20	Hexanitrosowurtzitan	438,19	$C_6H_6N_{12}O_{12}$	135285-90-4
Peroxide	TATP	Triacetanperoxid	138,08	$C_9H_{18}O_6$	17088-37-8
	HMTD	Hexamethylen-triperoxiddiamin	208,17	$C_6H_{12}N_2O_6$	283-66-9

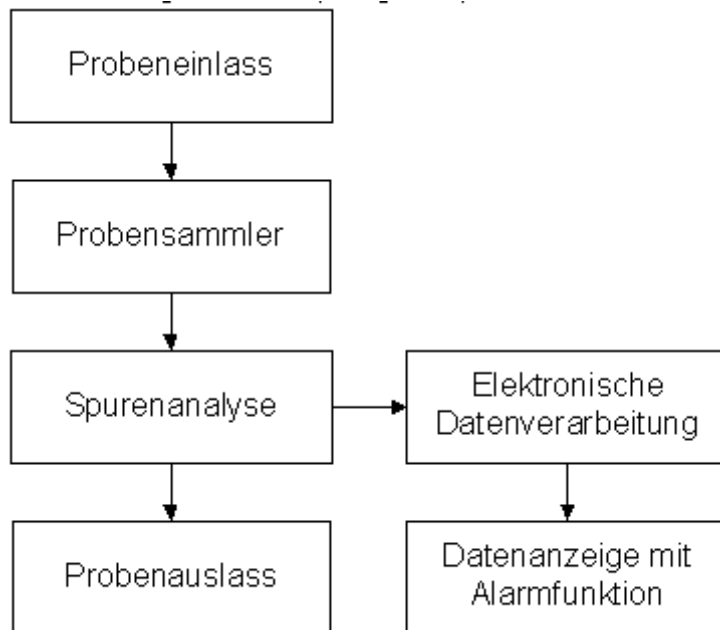
**Tabelle 3 Übersicht ausgewählter üblicher Sprengstoffe und deren Stoffdaten (3)(14)(15).**

Die Detektion von Sprengstoffspuren ist definiert als Nachweis von explosionsgefährlichen Bestandteilen sowie Sprengstoffen nach Probenahme und Analyse an untersuchter Luftfracht mit Spürhunden oder instrumentellen chemisch-analytischen Methoden (16). Orthogonal zu den verschiedenen Durchstrahlungsverfahren und Sprengstoffspürhunden gibt es eine Vielzahl an instrumentellen analytischen Methoden zur Sprengstoffspurendetektion in der Luftfrachtprüfung, siehe Abbildung 12.

Der Einsatz von Spürhunden ist eine weltweit etablierte und gute Methode zum Aufspüren von Sprengstoffen – auch Minen und anderen Waffen. Sprengstoffspürhunde sind speziell ausgebildete Diensthunde der Polizei, des Zolls und Militärs. Dabei nutzen sie ihre geschulte empfindliche Nase zum Aufspüren von gefährlichen Stoffen. Sprengstoffspürhunde werden auf ein bestimmtes Verhalten trainiert, sobald ein Gefahrstoff positiv detektiert wird. Es gibt in der Literatur jedoch keine Studien über quantitative Sprengstoffbestimmungen an Luftfracht mit Sprengstoffspürhunden (17)(18).

Instrumentelle analytische Methoden arbeiten nach dem gleichen Prinzip. Dies ist schematisch in Abbildung 13 dargestellt. Zur Bestimmung der Anwesenheit und Identifikation eines explosionsgefährlichen Gefahrstoffs nach einer Sprengstoffspurendetektionsmethode, muss das Messgerät zuerst geringe Menge eines Sprengstoffs entweder als Dampf oder in Partikelform (oder beides) sammeln. Die Probenahme erfolgt nach zwei Verfahren, entweder nach Ansaugen in Luft befindlicher Moleküle / Partikel oder per partikulärer Wischprobenahme an einer Oberfläche verdächtiger Objekte. Die Proben werden in einem Probensammler aufkonzentriert und dann dem Messgerät zugeführt. Das elektronische Signal des Detektors wird verarbeitet und als Analysenergebnis – identifizierter Sprengstoff und Konzentration – auf einer Anzeige dargestellt.





**Abbildung 13 : Allgemeines Prinzip von Sprengstoffspurendetektoren(8).**

Die Ionen-Mobilitäts-Spektrometrie (IMS) ist eine analytisch-chemische Methode, zur Detektion gasförmiger organischer Verbindungen und explosionsgefährlichen Stoffen. Diese Methode wird sehr häufig vom Militär und Behörden zur Detektion von Sprengstoffen, chemischen Kampfstoffen und Gefahrstoffen eingesetzt (8)(3)(17)(19)(20)(21).

Ionen-Mobilitäts-Spektrometer bestehen aus einem Probeneinlass, einer Ionisierungsquelle bei Atmosphärendruck, einem Ionen-Molekül Reaktor, einer Driftzelle und einem Detektor. Die Sprengstoffdetektionen erfolgen nach Partikelsammlung und Desorption oder aus der Gasphase. Die Messung läuft nach dem folgenden Prinzip ab. Umgebungsluft vom direkt untersuchten Testobjekt, z. B. Luftfracht, wird vom Einlasssystem angesaugt und in eine Driftzelle geleitet. Die Driftzelle besteht aus einer Ionisierungszone, einem Pulsgitter und einer Driftzone. In der Ionisationszone erfolgt die Ionisierung der angesaugten Moleküle. Es gibt Geräte mit radioaktiven Quellen ( $\beta$ -Strahler wie  $^{63}\text{Ni}$  oder  $^3\text{H}$ ), Laseranregung, Feld-Ionisation, Coronaentladung und nicht-radioaktive Elektronenemitter. Dabei entstehen nach Ionen-Molekül-Reaktionen positive oder negative Produkt-Ionen. Bei Sprengstoffen sind es meist negative Produkt-Ionen, z. B. durch Protonenabstraktion  $(\text{M-H})^-$ -Ionen. Die Ionisationszone ist von der Driftzone durch ein Pulsgitter getrennt. Die erzeugten Produkt-Ionen bewegen sich nach einem elektrischen Impuls in die Driftzone. Während ihrer Bewegung durch das elektrische Feld, werden die Ionen in Abhängigkeit von ihrem Masse / Ladungsverhältnis separiert. Am Ende der Driftstrecke und übertragen die Ionen ihre Ladung an einen Detektor. Die IMS-Methode eignet sich besonders gut zur Sprengstoffspurendetektion wegen der niedrigen Nachweisgrenzen bis in den unteren Pikogramm-Bereich ( $1 \text{ pg} = 1 \times 10^{-12} \text{ g}$ ). Ein Problem der IMS-Methode ist eine schwierige Quantifizierbarkeit. Deshalb erfolgt der Nachweis von Sprengstoffen als Ja / Nein-Entscheidung, also ob ein



## Sichere Luftfracht-Transportkette:

Konzepte, Strategien und Technologien für sichere und effiziente Luftfracht-Transportketten

gefördert von:



Sprengstoff vorhanden ist oder nicht. Ein weiterer Nachteil sind Querempfindlichkeiten, das heißt andere leicht-flüchtige Verbindungen können das Vorhandensein von Sprengstoffen vortäuschen und somit zu falsch-positiven Alarmen führen. Zur Reduzierung von Querempfindlichkeiten werden weitere orthogonale Methoden benötigt, z. B. Aufreinigung von Stoffgemischen über eine GC-Kapillarsäule – GC-IMS. Die Kosten von tragbaren Geräten liegen im Bereich von 18000 € bis 35000 € und Labortischgeräte betragen zu 50000 €.

Eine weitere Möglichkeit bieten Gassensoren. Dies sind Sensorelemente zur Detektion gasförmiger Stoffe, z. B. in der Sicherheitstechnik, Emissionsmessung, Bestimmung der Luftfeuchte, Prozessüberwachung oder Motorregelung. Zur Erfassung und Bewertung komplexer Gasgemische sowie zur Verringerung von Querempfindlichkeiten ist die Kombination mehrerer Sensoren (Multigassensoren) sinnvoll. Multigassensoren bestehen gemäß VDI/VDE 3518 aus einem oder mehreren Sensorelementen sowie aus Baueinheiten zur Steuerung und Signalauswertung (22). Sie bieten niedrige Analysenzeit und Nachweisgrenzen.

Die biotechnologische Analysenmethode ELISA (engl. *enzyme linked immunosorbent assay*) ist ein antikörperbasiertes Nachweisverfahren von Sprengstoffen, Proteinen, Toxinen. Diese Analysenmethode basiert auf einer enzymatischen Antigen-Antikörper-Reaktion bei der entweder Antikörper- oder Antigen-Enzym-Konjugate und photometrischer Auswertung. Nach Zugabe eines geeigneten Substrats wird die Enzymaktivität photometrisch gemessen (23). Dieses Verfahren ist sehr spezifisch und sensitiv, weist allerdings eine hohe analytische Streuung auf.

Häufig eingesetzt in der Sprengstoffspurenanalytik wird die Gaschromatographie in Kopplung mit einem Chemilumineszenzdetektor (GC-CL). Die Gaschromatographie ist eine etablierte analytisch-chemische Methode in der Spurenanalytik. Es können sowohl Proben aus der Gasphase als auch nach Wischprobe und Desorption einem Gaschromatographen zugeführt werden. Im Gaschromatographen werden die gasförmigen Proben oder unzersetzt verdampfbaren Stoffe über eine Kapillarsäule getrennt und vom Trägergas zum Detektor transportiert. Dort reagieren Stickstoffverbindungen in einer Stickstoffatmosphäre zu Stickstoffmonoxid. Stickstoffmonoxid reagiert dann mit Ozon zu Stickstoffdioxid in einer Detektionskammer. Dabei entstehen Sauerstoff und energetisch angeregtes Stickstoffdioxid, was Licht im roten bis infraroten Bereich (800 bis 3200 nm) emittiert und dann detektiert wird. Die Lichtintensität ist direkt proportional zur Stickstoffmenge in der Probe. Dieser Nachweis von Nitroverbindungen ist sowohl sensitiv als auch selektiv (8)(24), allerdings können keine nicht-stickstoffhaltigen Stoffe detektiert werden.

Die Kombination der Gaschromatographie mit einem Elektroneneinfangdetektor (GC-ECD) können Stoffe mit hoher Elektronenaffinität wie Sprengstoffen und ähnliche Gefahrstoffe sensitiv nachgewiesen werden. Dabei wird eine Gasprobe über eine GCKapillarsäule zur Identifizierung verschiedener Sprengstoffe aufgereinigt. Ein Gasgemisch aus nacheinander eluierenden Analyt-Molekülen und Trägergas gelangt dann in die Ionisationskammer des Detektors. Die Analyt-Moleküle fangen die aus



## Sichere Luftfracht-Transportkette:

Konzepte, Strategien und Technologien für sichere und effiziente Luftfracht-Transportketten

gefördert von:



einer radioaktiven Quelle emittierten Elektronen ( $\beta$ -Strahlung, z. B.  $^{63}\text{Ni}$ -Folie) ein und es erfolgt eine Verringerung des Trägergasgrundstroms. Die Messgröße im ECD ist somit eine konzentrationsabhängige Stromänderung (25). Dieses Verfahren bietet einen sehr sensitiven Nachweis von Stoffen bis 0,1 pg, enthält allerdings eine radioaktive Quelle (Strahlendosis 185 MBq), was die Berücksichtigung entsprechender Sicherheitsmaßnahmen und Zulassungen erfordert.

Eine weitere Möglichkeit zum Nachweis von Sprengstoffspuren bieten Massenspektrometer. Dies sind Geräte zur Bestimmung der Masse von Molekülen. Die Moleküle werden ionisiert und entsprechend ihrem Verhältnis Masse/Ladung ( $m/z$ ) getrennt und detektiert. Die Massenspektrometrie findet ihren Einsatz bei gas- und flüssigchromatographischen Untersuchungen (GC-MS oder HPLC-MS) zur chemischen Analyse und Stoffbestimmung im Labor eingesetzt. Dabei ermöglicht dieses Verfahren eine Aufreinigung komplexer Proben und Detektion verschiedener Stoffe. Mit einem Massenspektrometer können sehr geringe Stoffmengen nachgewiesen werden (ca.  $> 1 \times 10^{-15}$  g).<sup>[69]</sup>, allerdings ist ein hoher apparativer Aufwand nötig.

Auch mittel der Infrarotspektroskopie lassen sich Sprengstoffe nachweisen. Die Infrarotspektroskopie ist ein Verfahren der optischen Spektroskopie. Dabei erzeugt die Wechselwirkung zwischen IR-Strahlung und fester, flüssiger oder gasförmiger Verbindungen ein spezifisches Spektrum in Abhängigkeit zur Wellenlänge der IR-Strahlung.

Thermo-Redox-Detektoren nutzen eine elektrochemische Methode zum Nachweis von Sprengstoffen, welche auf der thermischen Zersetzung von Sprengstoffmolekülen und der nachfolgenden Reduktion von Nitrogruppen basiert. Die Probenahme erfolgt nach Ansaugen von Luft über der Luftfracht. Die eingesaugte Luft strömt über eine Anreicherungseinheit, auf der selektiv Sprengstoffmoleküle adsorbiert werden. Die Anreicherungseinheit wird vor der Messung schnell aufgeheizt. Dabei werden  $\text{NO}_2$ -Moleküle gebildet und spezifisch und als Nitrogruppen im Pyrolyseprodukt nachgewiesen. Nachteil dieser Methode ist, dass  $\text{NO}_2$  haltige nichtexplosive Stoffe nicht von Sprengstoffen unterschieden werden können und keine Sprengstoffe nachweisbar sind, die keine Nitrogruppe enthalten

Ebenfalls am Markt erhältlich sind einfache Farbtests. Bei Farbtests bilden stoffspezifische Farbreaktionen die Grundlage zur Sprengstoffspurendetektion. Der Luftfrachtkontrolleur nimmt eine Probe an einem verdächtigen Frachtstück und sprüht diese auf diese Probe ein Farbreaenz. Eine dabei auftretende spezifische Farbänderung ist auf das Vorhandensein eines Sprengstoffes zurückzuführen. Vorteil dieser Methode ist der leicht handhabbare Einsatz, der keinerlei Stromversorgung vor Ort erfordert.

Auch die Raman-Spektroskopie wird zur Spurendetektion benutzt. Die Raman-Spektroskopie ist ein Teilgebiet der Schwingungsspektroskopie. Der Raman-Effekt ist



## Sichere Luftfracht-Transportkette:

Konzepte, Strategien und Technologien für sichere und effiziente Luftfracht-Transportketten

gefördert von:



die Lichtstreuung der Wechselwirkung zwischen einer Probe und Strahlung. Dabei enthält das Streulichtspektrum eines mit monochromatischem Laserlicht bestrahlten Stoffes (fest, flüssig oder gasförmig) stoffspezifische Linien. Diese sind auf Schwingungen und Rotationen der streuenden Moleküle zurückzuführen. Die Raman-Spektroskopie eignet sich vor allem zur Untersuchung unpolarer oder wenig polarer Bindungen, z. B. ringförmige Verbindungen, oder  $C\equiv C$ ,  $C=C$ ,  $C-C$ ,  $N=N$  etc. Die Raman-Spektroskopie wird zur qualitativen und quantitativen Analyse sowie zur Strukturaufklärung angewandt. Einer der Vorteile dieser Methode ist die mögliche Analyse durch Glas- oder transparenter Kunststoffverpackungen, ein Nachteil die niedrige Empfindlichkeit der Methode, da Raman-Streuung sehr schwach ist und daher höhere Stoffmengenkonzentrationen oder höhere Strahlungsintensitäten benötigt werden.

Zu den neu entwickelten tragbaren Sprengstoffspurendetektoren gehören Messgeräte mit Fluoreszenz verstärkenden Polymeren (amplifying fluorescent polymers) Mit dieser Technik können Sprengstoffmengen größer als  $1 \times 10^{-15} \text{ g} = 1 \text{ fg}$  nachgewiesen werden. Diese Detektoren benötigen keine radioaktive Ionisationsquelle und haben äußerst geringe Nachweisgrenzen.

Verfahren	Produkte
Ionen-Mobilitäts-Spektrometrie	Hardened MobileTrace, Morpho Detection (26) Itemiser DX, Morpho Detection (27) Itemiser 3 Enhanced, Morpho Detection (28) MobileTrace, Morpho Detection (29) MobileTrace Explosives, Morpho Detection(30) MobileTrace Narcotics, Morpho Detection(31) EGIS Defender, Thermo Fischer Scientific (32) EN5000 Trace Detector, Autoclear (33) N2200 Narcotics Trace Detector, Autoclear (34) EN3300 Trace Detector, Autoclear (35) RAID AFM, Bruker Corporation (36) RAID M100, Bruker Corporation(37) RAID S2, Bruker Corporation (38) RAID XP, Bruker Corporation (39) QS-B220, D-TeC (40) GUARDION, Smith Detection (41) IONSCAN 400B, Smith Detection (41) IONSCAN 500DT, Smith Detection (41) MMTM – Multi-mode Threat Detector, Smith Detection (41) SABRE 5000, Smith Detection(41)
Gassensoren	GDA-X Explosives, Airsense Analytics (42)
ELISA	Portable Toxin Detector, Bruker Corporation (43)



## Sichere Luftfracht-Transportkette:

Konzepte, Strategien und Technologien für sichere und effiziente Luftfracht-Transportketten

gefördert von:



GC-CL	Nitrogen Chemiluminescence Detector, Agilent Technologies (44) E4500 Trace Detector, Autoclear LLC.(45) EGIS III, Thermo Fisher Scientific Inc. (46) E3500 Explosives Trace Detector, Autoclear LLC.(47)
Massenspektrometrie	GRIFFIN 824, FLIR Systems (48)
Infrarotspektroskopie	Mobil-IR, Bruker Corporation (49) RAPID, Bruker Corporation (50) SIGIS II, Bruker Corporation(51) miniExplonix, RS Dynamics (52) Explonix, RS Dynamics (52) TARGET-ID, Smith Detection (41)
Thermo-Redoxdetektoren	EVD 3000 Plus, Autoclear LLC (53)
Farbtest	Expray® - Kit zur Sprengstoffdetektion und Identifikation (54)
Raman-Spektroskopie	StreetLab Mobile, Morpho Detection (55) ACE-ID, Smith Detection Group Ltd. (41)
Fluoreszenz verstärkende Polymere (AFP)	FIDO NXT, FLIR Systems Inc. (56) FIDO X3, FLIR Systems Inc. (57) FIDO XT, FLIR Systems Inc. (58)

*Tabelle 4 Auf dem Markt befindliche Geräte für die verschiedenen Methoden zur Sprengstoffspurendetektion.*

Alle Sprengstoffspurendetektoren haben Vor- und Nachteile und liefern nach einer Kalibrierung erklärable Messergebnisse. Für den praktischen Einsatz der aufgezählten Methoden müssen jedoch mehrere Faktoren abgewogen werden. Zum einen muss die Dauer der Analyse gegenüber der Anzahl der Ladevorgänge, und damit der zur Verfügung stehenden Zeit abgewogen werden. Desweiteren muss berücksichtigt werden, welche Sprengstoffe durch ein bestimmtes Verfahren überhaupt detektiert werden können, und mit welcher jeweiligen Empfindlichkeit. Unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten sind hier die jeweiligen Wartungsintervalle zu berücksichtigen. Desweiteren beinhalten einige Messgeräte eine radioaktive Ionisationsquelle. Für den Betrieb dieser Geräte sind spezielle Zertifikate notwendig. Die wichtigsten Kriterien, welche die Leistungsfähigkeit der Messgeräte bestimmen sind jedoch die Nachweisgrenze der zu detektierenden Sprengstoffspuren und die prozentuale Anzahl der Falschalarme. Für beide Kriterien ist die Probenahme entscheidend. Je nach Verfahren werden Analytmoleküle in Partikelform auf einem Wischtuch bzw. -stab gesammelt oder direkt aus der Umgebungsluft einem Messgerät zur Identifizierung zugeführt.

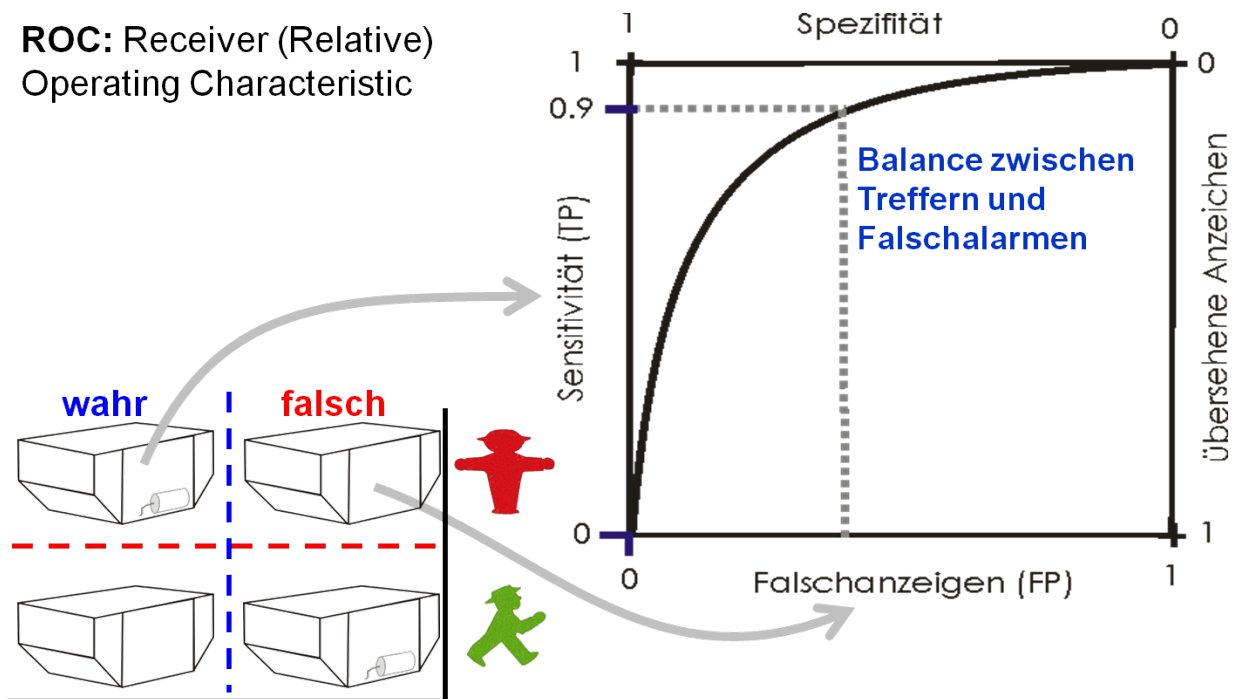
Bei der Probenahme von Partikeln aus der Luft werden gasförmige Dämpfe vom Messgerät angesaugt. Diese Art der Probenahme bietet den Vorteil, dass kein



direkter Kontakt mit den getesteten Gepäckstücken oder Frachtgütern notwendig ist. Die Probennahme in Form von Wischproben erfordert dagegen einen direkten Kontakt. Hier werden die Partikel beim Abwischen von festen Stoffen an Oberflächen aufgenommen und nach anschließender thermischer Desorption in der Probenaufnahmeeinheit des Messgerätes der Auswerteeinheit zugeführt.

Die Bewertung der verschiedenen Techniken unter Sicherheitsaspekten, also hinsichtlich Auffindwahrscheinlichkeiten und Fehlalarmen war ein weiterer Punkt in den Arbeitspaketen 2 und 4. Der klassische Ansatz einer technologischen Sicherheitsbewertung basiert auf einer *Probability Of Detection* Bestimmung (POD), also einer Bestimmung mit welcher Wahrscheinlichkeit ein

**ROC: Receiver (Relative) Operating Characteristic**



**Abbildung 14 Receiver Operating Characteristic (ROC).** Bei der Sicher/Unsicher-Beurteilung eines Packstückes existieren vier Möglichkeiten (links). Jeweils zwei richtige und zwei falsche. Das Verhältnis zwischen richtigen und falschen Entscheidungen wird durch die ROC-Kurve (rechts) beschrieben.

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 14 dargestellt. Ausgehend von der zentralen Fragestellung, der Erkennung eines manipulierten Frachtgutes, also beispielsweise der Detektion von Sprengstoffspuren, 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 Frachtstücken auch immer eine höhere Anzahl an fälschlicherweise als manipuliert erkannten Sendungen, einen sogenannten Fehlalarm. Dies ist exemplarisch im rechten oberen Diagramm in Abbildung 14 veranschaulicht. Ein Fehlalarm bedeutet, dass eine unmanipulierte Luftfracht der gleichen Behandlung wie eine manipulierte Fracht unterzogen wird. Eine Verringerung der Anzahl der Fehlalarme kann durch ein Ändern der Entscheidungsschwelle der jeweiligen Technik erreicht werden. Dies verringert jedoch auch die Treffsicherheit, bzw. Zuverlässigkeit einer Detektion. Bei jeder Detektionstechnik ist daher eine Abwägung zwischen der zu erreichenden Sicherheit, also der Minimierung des Risikos, und den durch Fehlalarme anfallenden Kosten vorzunehmen. Die BAM hat dafür eine Software entwickelt (siehe Abbildung 15) und den Projektpartnern zur Verfügung gestellt, mit welcher sich für eine gegebene Technik die Auffindwahrscheinlichkeiten und die Anzahl der Fehlalarme bestimmen lassen. Sie ermöglicht es, verschiedene Techniken hinsichtlich ihrer Zuverlässigkeit, und damit auch hinsichtlich potentiell anfallender Kosten durch Fehlalarme, zu vergleichen.

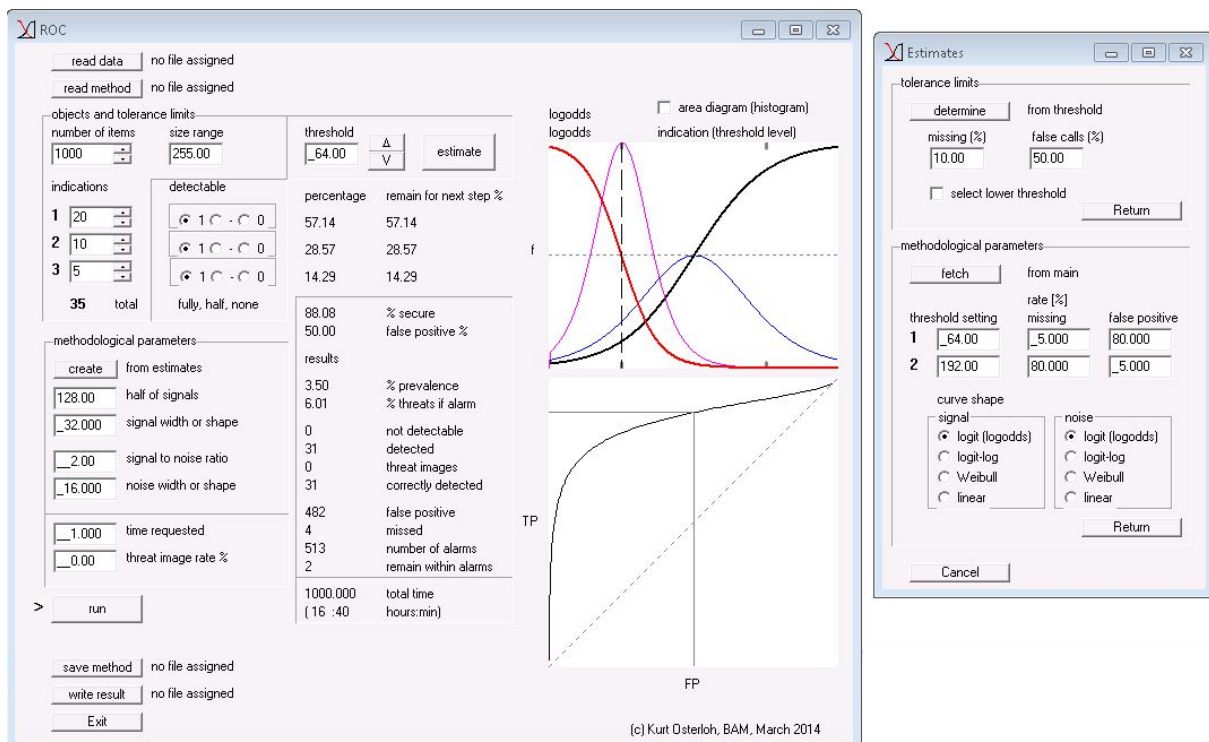


Abbildung 15 Die von der BAM entwickelte ROC Software zur Bewertung von Auffindwahrscheinlichkeiten und Fehlalarmen einer Detektionstechnik.

Beispielhaft sei das Vorgehen hier für das in AP8 und AP9 verwendete ETD-Gerät QS-B 220 von Implant Science Corporation dargestellt. Zur Bestimmung der



## Sichere Luftfracht-Transportkette:

Konzepte, Strategien und Technologien für sichere und effiziente Luftfracht-Transportketten

gefördert von:



prozentualen Anzahl der Falschalarme dieser Untersuchungsmethode werden die qualitativen Messergebnisse durch einen Klassifikator in verschiedene Klassen angeordnet. Dabei werden zur Sprengstoffdetektion Ja/Nein-Fragen formuliert, das heißt es befindet sich ein Sprengstoff in der Luftfracht oder nicht? Als Ergebnis können die erwähnten vier Fälle auftreten. Wenn in der Luftfracht ein explosionsgefährlicher Stoff ist, kann das Testergebnis positiv (richtig-positiv, RP) oder auch negativ (falsch-negativ, FN) sein. Ebenso kann bei Untersuchungsobjekten ohne explosionsgefährliche Stoffe, das Testergebnis positiv (falsch-positiv, FP) oder negativ (richtig-negativ, RN) sein. Die Testergebnisse werden in einer Tabelle aufgelistet (siehe

*Tabelle 5) (59)(60).*

Sprengstoff in Luftfracht?			
Ja/Nein-Frage → Testergebnis ↓	Ja	Nein	Summe
Positiv (Sprengstoff detektiert)	<b>RP</b>	<b>FP</b>	$RP + FP$
Negativ (Sprengstoff nicht detektiert)	<b>FN</b>	<b>RN</b>	$FN + RN$
Summe	$RP + FN$	$FP + RN$	$n = RP + RN + FP + FN$

*Tabelle 5 Testvalidierung der Zuverlässigkeit von Sprengstoff-Screening-Methoden.*

Die Auffindwahrscheinlichkeit bzw. Richtig-Positiv-Rate ( $TPR$ ) ist die Wahrscheinlichkeit mit der das Testergebnis positiv ist. Für den Fall, dass sich Analyt  $A$  in der Luftfracht befindet, gilt:

$$TPR = p(pos|A) = \frac{RP}{RP + FN}$$

Die Richtig-Negativ-Rate ( $RNR$ ) ist die Wahrscheinlichkeit, dass das Testergebnis negativ ist und Analyt  $A$  nicht vorhanden ist ( $\bar{A}$ ):

$$RNR = P(neg|\bar{A}) = \frac{RN}{RN + FP}$$

Die Falsch-Positiv-Rate ( $FPR$ ) gibt die Wahrscheinlichkeit eines positiven Testergebnisses an, für den Fall, dass Analyt  $A$  nicht vorhanden ist ( $\bar{A}$ ):

$$FPR = P(T^+|\bar{A}) = \frac{FP}{RN + FP}$$





## Sichere Luftfracht-Transportkette:

Konzepte, Strategien und Technologien für sichere und effiziente Luftfracht-Transportketten

gefördert von:

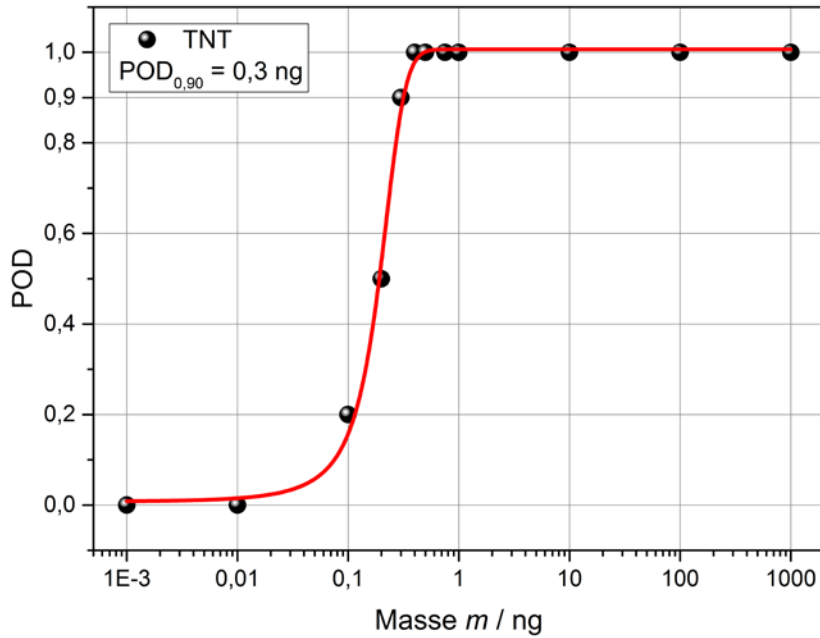


Die Falsch-Negativ-Rate (*FNR*) gibt die Wahrscheinlichkeit eines negativen Testergebnisses an, obwohl ein Sprengstoff (Analyt *A*) in der Probe vorhanden ist:

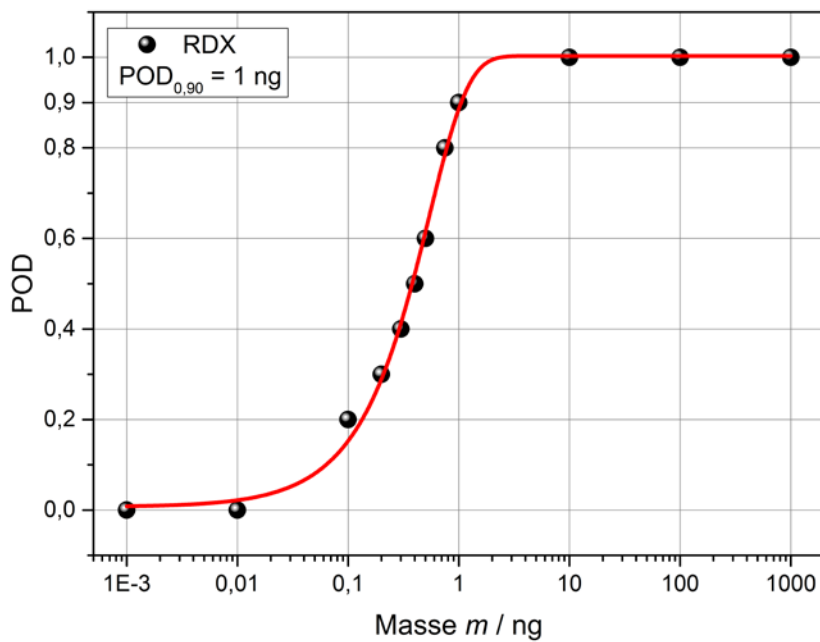
$$FNR = P(neg|A) = \frac{FN}{RP + FN}$$

Weitere wichtige Aussagen dieser Wahrscheinlichkeitsberechnung sind die Aussagen über die Häufigkeit von Analyt *A* in *n* Proben, das Verhältnis richtiger Übereinstimmungen (*CR*), die Testeffizienz (*TE*) sowie die positive als auch negative Vorhersagerate (*PPV* und *NPV*)(59).

Das erste Qualitätskriterium der Testvalidierung ist die Richtig-Positiv-Rate bzw. Auffindwahrscheinlichkeit. Eine optimale Richtig-Positiv-Rate ist größer als 90 %. Bei der Falsch-Negativ-Rate handelt es sich um Proben, deren Menge an Analyt *A* niedriger als die Nachweisgrenze sind. Die Falsch-Positiv-Rate gibt die Häufigkeit an falschen Alarmen an. Da Messgeräte nur relative Messsignale liefern, werden Vergleichsproben mit einer oder mehreren definierten Eigenschaften zur Kalibrierung benötigt. Falsch-positive und falsch-negative Ergebnisse sind auf Unsicherheiten sowie quantitative, mengenmäßige Einflüsse zurückzuführen. Die Menge der zur Kalibrierung verwendeten festen, flüssigen oder gasförmigen Standardproben bzw. zertifizierte Referenzmaterialien muss genau bekannt und auf SI-Basiseinheiten unter Berücksichtigung aller Messunsicherheiten rückführbar sein, z. B. Stoffmenge / mol oder Masse / kg (59)(61)(62)(63)(64)(65). In der quantitativen Analytik lässt sich ein funktionaler Zusammenhang als Kalibrierfunktion zur Festlegung eines Messbereiches zwischen Messsignal und Probenmenge ermitteln, z. B. eine lineare Funktion  $y = b \times x + a$ . Dabei ist *y* das Messsignal des Gerätes, *x* die bekannte Menge einer Probe sowie *b* und *a* die Parameter der linearen Kalibrierfunktion. Zur Messgerätecharakterisierung können verschiedene charakteristische Größen verwendet werden, wie Nachweisgrenze, Richtigkeit und Präzision. Die Nachweisgrenze eines Messverfahrens ist definiert, als niedrigste mit einer statistischen Sicherheit feststellbare Konzentration. Dieser Wert ist die Alarmschwelle des Messgerätes und muss in die Gerätesoftware eingetragen werden. Die Richtigkeit ist die Übereinstimmung des Messergebnisses von der tatsächlich vorgelegten Menge der Standardprobe. Die Präzision ist die Übereinstimmung einzelner Messergebnisse und ist äquivalent zur Standardabweichung.



*Abbildung 16 Ermittelte Nachweisgrenze von TNT = 0,3 ng bei POD = 0,9.*



*Abbildung 17 Ermittelte Nachweisgrenze von RDX = 1 ng bei POD = 0,9.*



## Sichere Luftfracht-Transportkette:

Konzepte, Strategien und Technologien für sichere und effiziente Luftfracht-Transportketten

gefördert von:



Zur Bestimmung der Nachweisgrenzen des verwendeten ETD-Gerätes QS-B 220 in Abhängigkeit von der Auffindwahrscheinlichkeit wurden Versuchsreihen mit definierten Mengen Sprengstoffes, welche auf das verwendete Wischpad aufgetragen wurden, durchgeführt und die jeweiligen Richtig-Positiv-Raten bestimmt. Abbildung 16 und Abbildung 17 zeigen exemplarisch die ermittelten Nachweisgrenzen für TNT und RDX.

Insgesamt lässt sich feststellen, dass alle Sprengstoffspurendetektoren ihre Vor- und Nachteile haben und nach einer Kalibrierung erklärbar messergebnisse liefern. Es besteht aber der Bedarf, weitere Anwendungsfelder physikalisch-chemischer Analysemethoden weiterzuentwickeln, um bestehende Sprengstoffdetektoren zu optimieren oder neue zuverlässige Methoden und Geräte zu entwickeln. Eine aktuelle Neuentwicklung stellt der Evaneszenzfeldsensor für die Detektion von Explosivstoffen dar. Es ist eine spektroskopische Methode, mit der stoffspezifisch Sprengstoffmoleküle nachweisbar sind (66).

Hinsichtlich der notwendigen Referenzmaterialien und erforderlicher Normung lässt sich feststellen, dass zwar DIN-Normen zum Nachweis von Sprengstoffen existieren, allerdings sind in diesen die Bestimmung von Sprengstoffen in Wasser, Grundwasser oder Böden beschrieben (beispielweise DIN 38407-21). Eine Norm für das hier vorgestellte IMS-Verfahren zur schnellen Bestimmung von Sprengstoffen existiert nicht. Für die Kalibrierung existieren zwar standardisierte Sprengstofflösungen (wie das für die Demonstration verwandte NIST-Referenzmaterial SRM 2905), Referenzmaterialien zur Bestimmung der Nachweisgrenze von Sprengstoffspurenmaterialien aus Deutschland existieren jedoch nicht. Als Handlungsempfehlungen (AP11) lassen sich hier die Mitarbeit an einem technischen Regelwerk zur ETD mittels IMS und anderer schneller Detektionstechnologien und die Herstellung und der Vertrieb von zertifizierten Referenzmaterialien identifizieren.

### 1.4 Entwicklung eines Testkörpers

Einer der im Projekt identifizierten Optimierungsbedarfe bestand in der Entwicklung eines Testkörpers speziell für Frachtscanner, welcher sowohl eine bessere Beurteilung der Leistungsfähigkeit eines Röntgenscanners ermöglicht, als auch eine bessere Materialdiskriminierung. Dieser Testkörper sollte insbesondere auch für Durchstrahlungsanlagen im Hochenergiebereich einsetzbar sein. Die derzeit für die Zulassung und Überprüfung von Röntgenscannern benutzten Testkörper (ECAC-Standard-Testpiece, Combined-Test-Piece, ASTM F792 Standard Test Piece) sind für Gepäckprüfanlagen und für die Klein-Paketprüfung entwickelt worden und für Durchstrahlungsanlagen mit einer Energie <300kV optimiert.

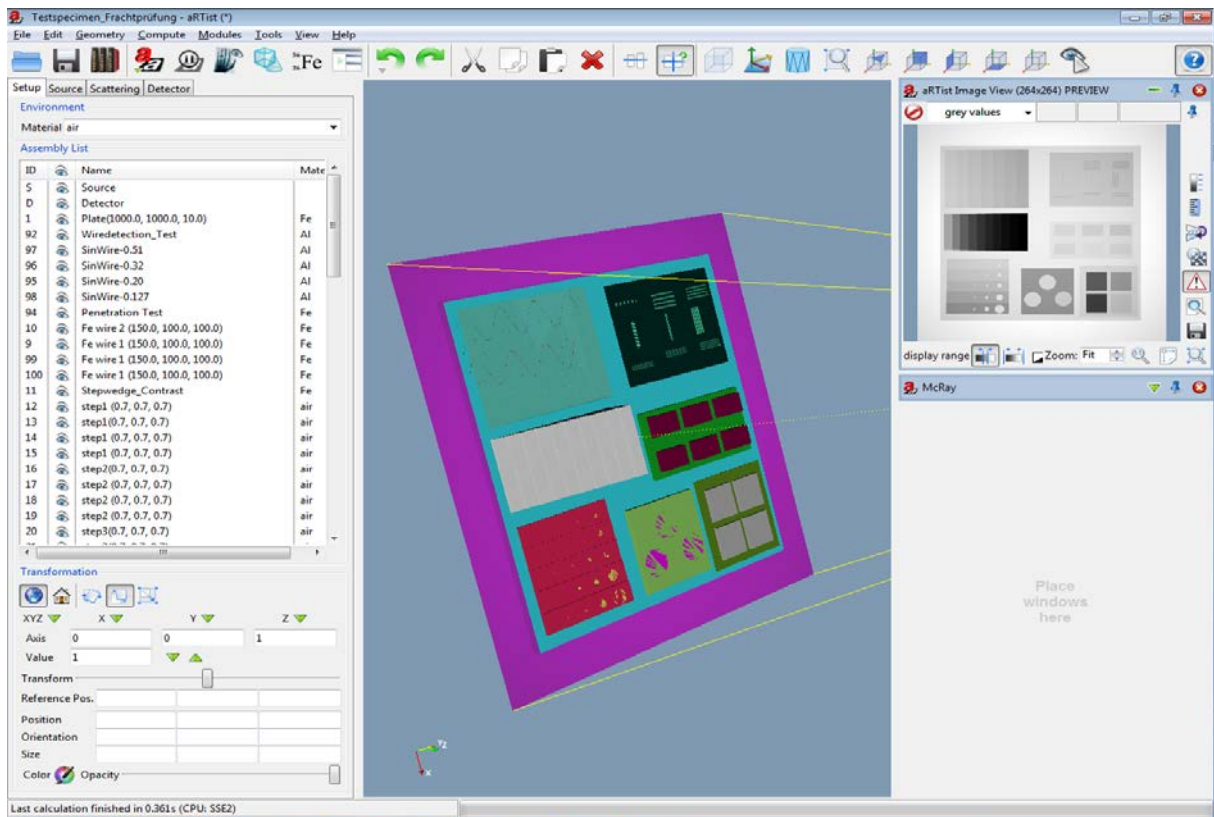
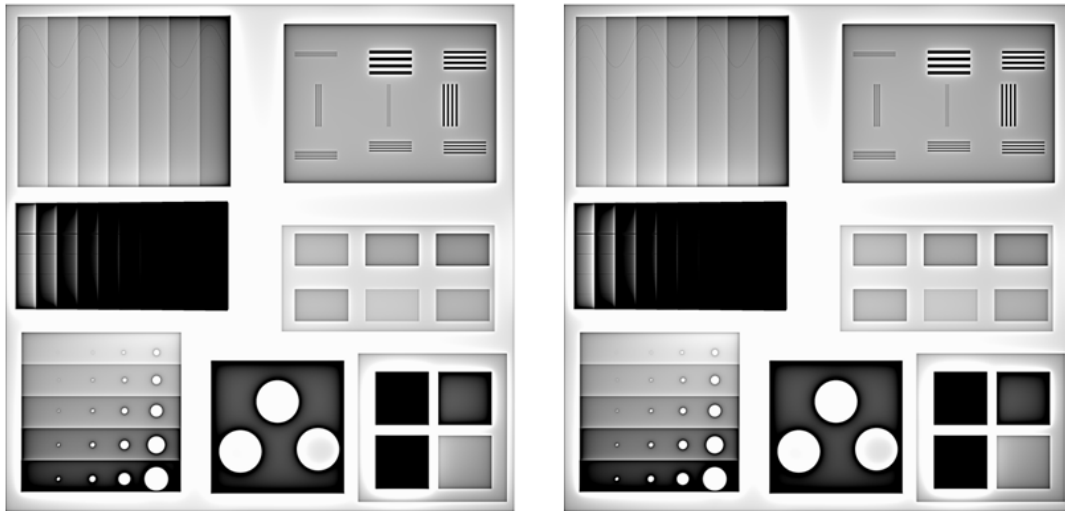


Abbildung 18 Modell des Testkörpers in der BAM Software aRTist.

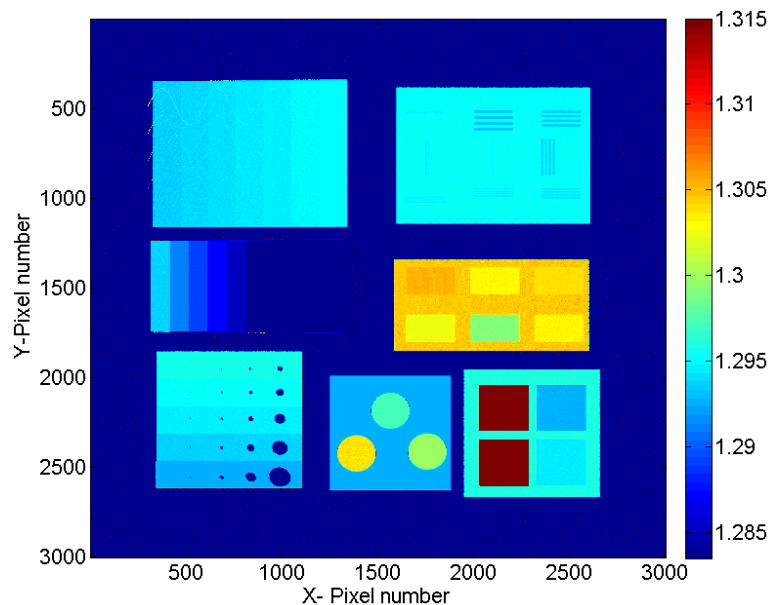
Der neu zu entwickelnde Testkörper sollte sowohl eine bessere Beurteilung der Leistungsfähigkeit einer Durchstrahlungsanlage, beispielsweise der Auflösung, als auch eine verbesserte Materialdiskriminierung, beispielsweise zwischen Metall und hochdichtem Metall, ebenso wie eine verbesserte Erkennbarkeit von Gefahrstoffen (Explosives) aufweisen. Der Testkörper sollte für Durchstrahlungsanlagen im Energiebereich 200kV bis 7MeV anwendbar sein. Die Grundlagen für den neuen Testkörper wurden in Zusammenarbeit mit dem LBA und dem ASTM-Security-Ausschuss abgestimmt.

Der Aufbau des Testkörpers leitet sich unter anderem aus den Methoden, welche in der zerstörungsfreien Prüfung für die Bewertung von Durchstrahlungstechniken herangezogen werden, ab. Er weist einzelne, im Folgenden beschriebene Komponenten zur Bestimmung der Detailerkennbarkeit, der Durchdringung, der Kontrastempfindlichkeit und der Ortsauflösung auf. Darüber hinaus wurde ein erweiterter Materialdiskriminierungstest zur Unterscheidung von Metallen, Leichtmetallen und hochdichten Metallen, zur Unterscheidung von organischem und anorganischem Material, zur Unterscheidung von Flüssigkeiten und Feststoffen und zur erweiterten Gefahrstofferkennung integriert. Bei der Entwicklung des Testkörpers wurden zuerst die einzelnen Komponenten mithilfe der BAM-eigenen Simulations- und Modellierungssoftware „aRTist (analytical Radiographic Testing Simulation tool)“ (1) hinsichtlich der Materialparameter, wie Abmessungen, Materialart usw., optimiert (siehe Abbildung 18). In einem zweiten Schritt wurden die Dual-Energy Fähigkeiten

optimiert. Der modellierte Testkörper besteht aus verschiedenen leichten Materialien mit niedriger Kernladungszahl (PTFE, PA, PVC) und Materialien mit hoher Kernladungszahl (Eisen, Kupfer, Wolfram, Blei) in der Form von Zylindern und Platten. Abbildung 19 zeigt Simulationsrechnungen für den Testkörper bei zwei verschiedenen Energien, Abbildung 20 das aus diesen Aufnahmen resultierende Dual-Energy-Bild.

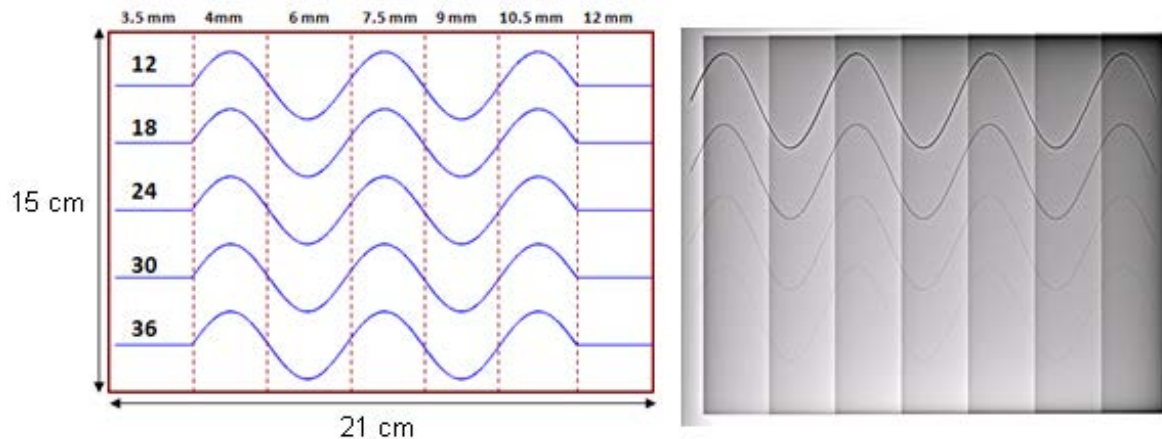


**Abbildung 19** Simulationsergebnis des Testkörpers mit aRTist. Die Bilder zeigen synthetisch berechnete Durchstrahlungsaufnahmen bei zwei verschiedenen Röntgenenergien (3 MeV und 6 MeV).



**Abbildung 20** Dual-Energy-Bild, welches sich aus den beiden Durchstrahlungsaufnahmen in Abbildung 19 ergibt. Farbgebung für Materialien: blau für Metalle, gelb für leichte organische Materialien und rot für Hochdichtes Materialien.

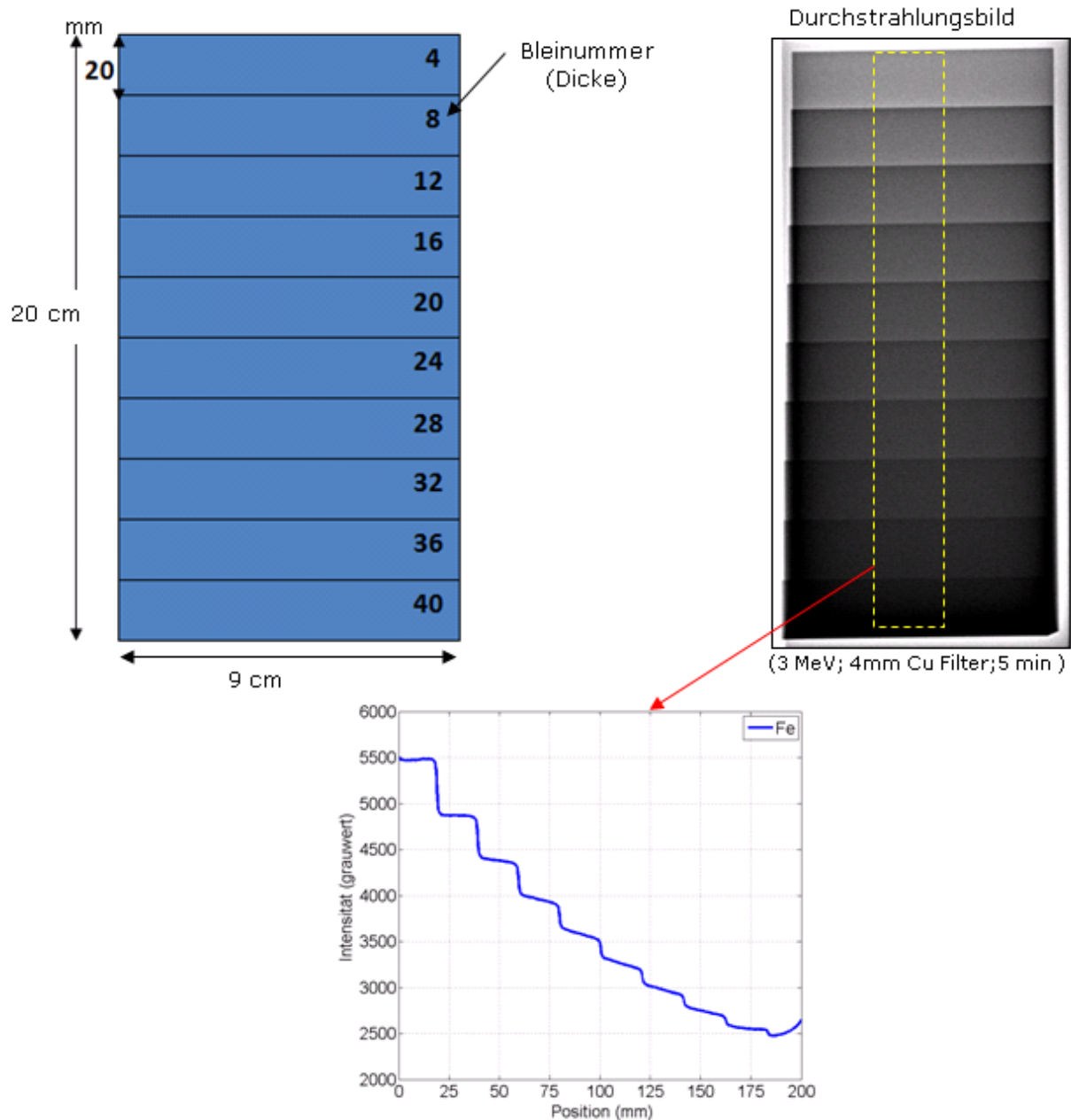
Die realen Labormessungen wurden mit einem Betatron mit einer variablen Energie von 2,5 bis 7 MeV und einem Matrixdetektor PEXRD1622 (Szintillatormaterial  $Gd_2O_2S$ , Pixelgröße  $200\mu m$ , aktive Fläche  $40.96 \times 40.96 cm^2$ ) vorgenommen. Im Folgenden werden die einzelnen Komponenten des Testkörpers näher erläutert.



**Abbildung 21 Drahterkennungstest.** Links: schematische Darstellung mit Angabe der Dicke des jeweiligen Stufenkeils und der AWG (American Wire Gauge) Nummer der verwendeten Drähte (AWG12:  $\varnothing 2.1 mm$ ; 18:  $\varnothing 1.02 mm$ ; 24:  $\varnothing 0.51 mm$ ; 30:  $\varnothing 0.25 mm$ ; 36:  $\varnothing 0.127 mm$ ). Rechts: Durchstrahlungsbild aufgenommen bei einer Energie von 3MeV.

**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 21 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:  $0.127 mm$ ) ist ähnlich wie im ASTM F792 Testkörper. Zusätzlich ist hier die ausgewählte maximale Dicke des Stufenkeils  $12 mm$ .



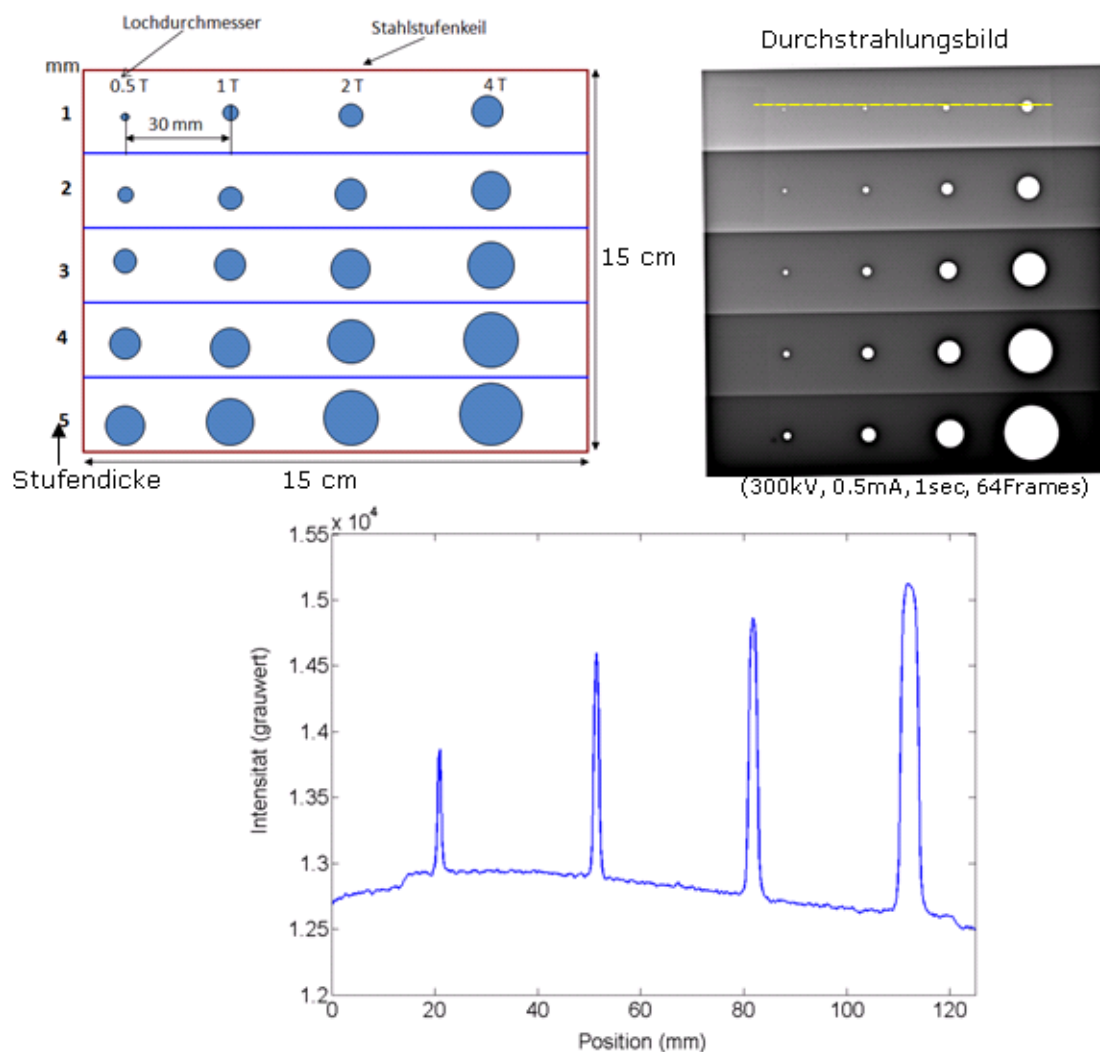


**Abbildung 22** Test zur quantitativen Bewertung der Durchdringungsfähigkeit eines Röntgengeräts. Links: schematische Darstellung des Stufenkeils. Rechts: resultierendes Durchstrahlungsbild (3MeV). Unten: Intensitätsverlauf im Durchstrahlungsbild senkrecht zu den unterschiedlich dicken Stufen. Alle Stufen werden mit unterschiedlicher Intensität erkannt.

**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 22). 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

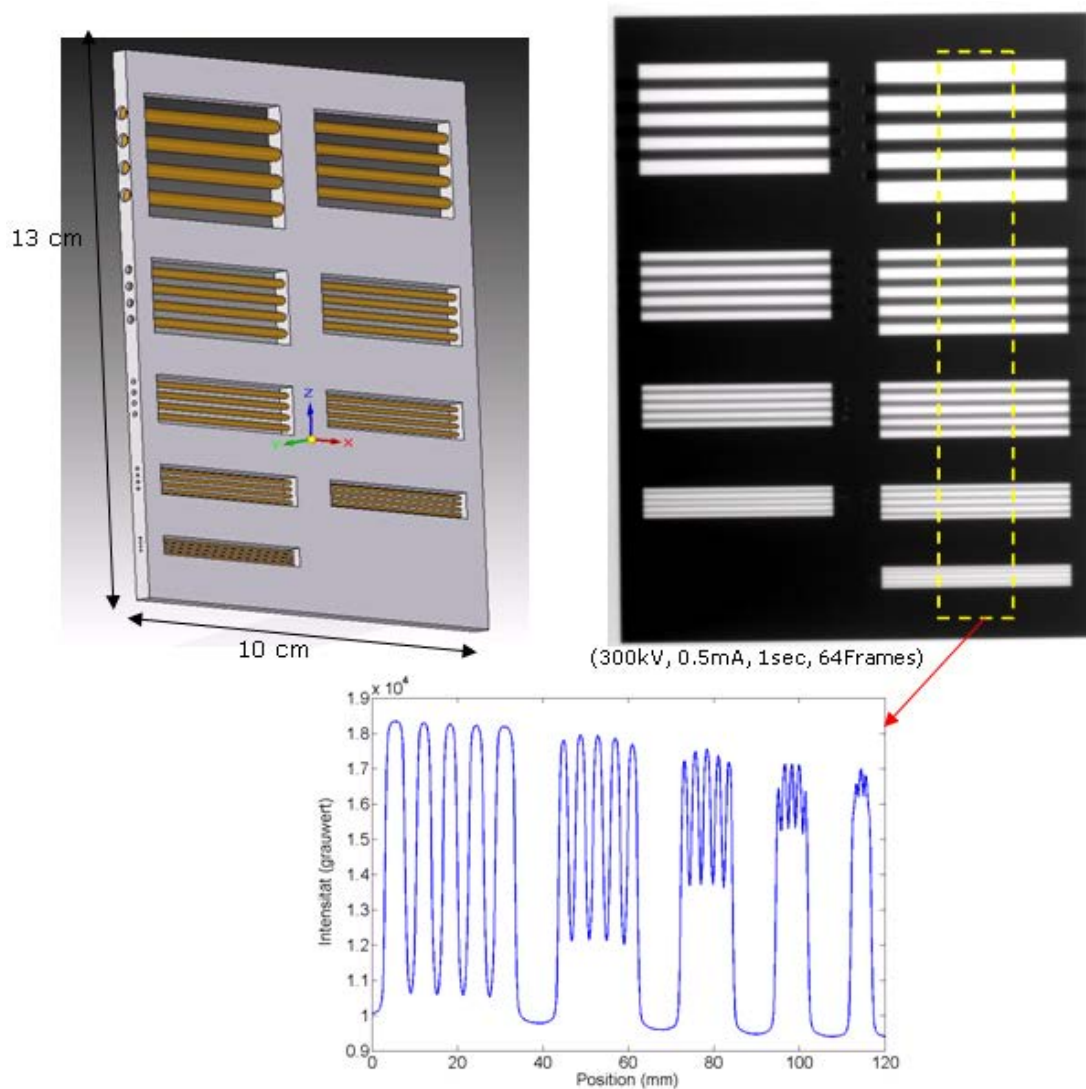
mangelhafter Durchdringungsfähigkeit des Röntengerätes sind die dickeren Stufen nicht mehr unterscheidbar.

**Kontrastempfindlichkeitstest:** Die Abbildung 23 zeigt den Einzeltest zur Bewertung der erreichbaren Stahl-Kontrastempfindlichkeit eines Röntengerätes. 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 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.



**Abbildung 23 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.

**Ortsauflösetest:** Mit einem Ortsauflösetest wird evaluiert, bis zu welcher Größe Details durch ein Durchstrahlungssystem 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

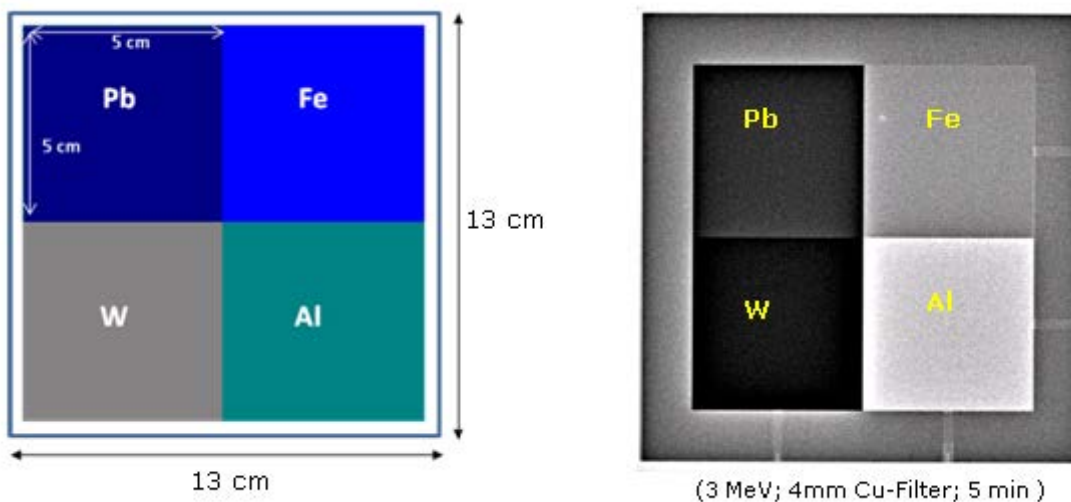


**Abbildung 24** Test zur Bewertung der Ortsauflösung eines Scannersystems. Links: schematische Darstellung. Rechts: resultierendes Durchstrahlungsbild (300kV). Unten: Intensitätsverlauf des im Durchstrahlungsbild gelb markierten Bereichs (nähere Erklärung im Text).

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

Durchstrahlungssystemen 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.

**Materialdiskriminierungstest:** Der Materialdiskriminierungstest besteht aus drei einzelnen Testelementen. Das erste Testelement dient zur Unterscheidung zwischen leichten und hochdichten Metallen (siehe Abbildung 25). Eine wesentliche Einschränkung bei den bestehenden Testkörpern besteht darin, dass eine Diskriminierung zwischen (leichten) Metallen und hochdichten Metallen nicht vorgesehen ist. Der von der BAM entwickelte neue Testkörper enthält Elemente aus den metallischen Werkstoffen Aluminium (Al) und Stahl (Fe), sowie als hochdichte



**Abbildung 25 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 20 rechts unten.

Metalle Blei (Pb) und Wolfram (W). Die einzelnen Elemente sind in einem Rahmen aus Messing ( $\text{CuZn}_x$ ) gefasst. Die Materialdicke der einzelnen Metallelemente beträgt jeweils 5 mm. Die jeweiligen Stoffdichten und Ordnungszahlen der verwendeten Metalle sind in Tabelle 6 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



## Sichere Luftfracht-Transportkette:

Konzepte, Strategien und Technologien für sichere und effiziente Luftfracht-Transportketten

gefördert von:



Abbildung 20). Aus den unterschiedlichen Schwächungen bei zwei verschiedenen Durchstrahlungsenergien kann auf die Kernladungszahl 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

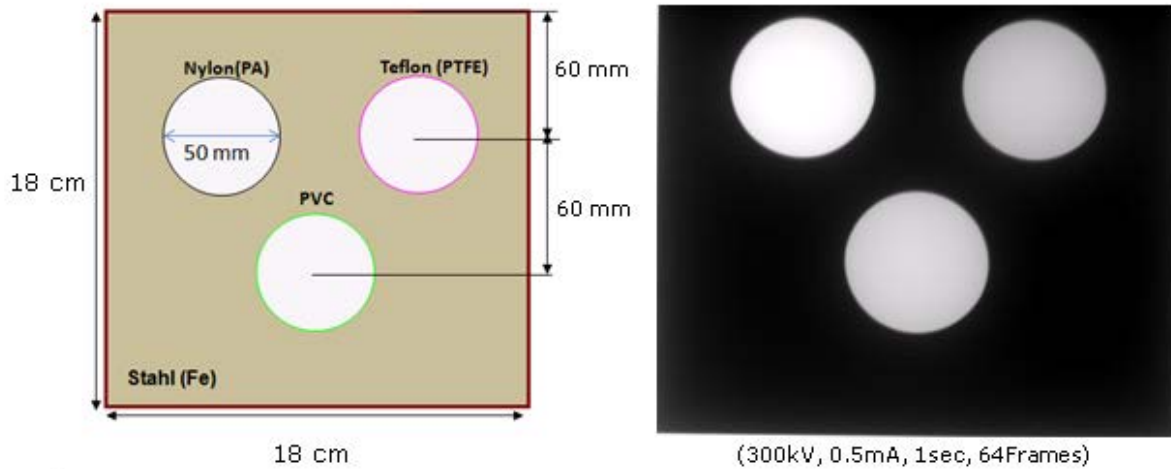
gewählt werden, um ähnliche Schwächungen zu erhalten. Das zweite Testelement (siehe Abbildung 26) dient zur Unterscheidung von organischen Materialien mit unterschiedlichen effektiven Ordnungszahlen. Die einzelnen Elemente bestehen aus den organischen Materialien Polytetrafluoräthylen (PTFE), Polyamide (PA) und Polyvinylchlorid (PVC). Diese sind jeweils als zylinderförmige Elemente mit einem

**Tabelle 6 Materialdiskriminierung: Metall - hochdichtes Metall: Ordnungszahl (Z) und Dichte der verwendeten Materialien.**

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

Durchmesser von 50mm und einer Dicke von 20mm, eingebettet in einen Rahmen aus Stahl (Fe) ausgestaltet. Die Stoffdichten und Ordnungszahlen der verwendeten Materialien sind in Tabelle 7 gegeben. Die Auswertung dieses Diskriminierungstests wird anhand der Farbkodierung im Dual-Energie-Bild durchgeführt. Die verwendete Durchstrahlungsanlage sollte alle drei Materialien mit unterschiedlicher Farbkodierung darstellen (siehe Abbildung 20).





**Abbildung 26 Materialdiskriminierung: Organisches Material.** Links: schematische Darstellung. Rechts: Durchstrahlungsbild bei 300 kV. Für das zugehörige Dual-Energy Bild siehe Abbildung 20 unten.

**Tabelle 7 Stoffdichte und effektive Kernladungszahlen der verwendeten Materialien im Test zur Diskriminierung organischer Stoffe.**

Material	Dichte (g/cm <sup>3</sup> )	Zeff
Polyvinylchlorid (PVC)	1,45	15
Polytetrafluorethylen (PTFE)	2,15	8,5
Polyamide(PA)	1,15	6,2

Eine weitere Einschränkung der bestehenden Testkörper besteht im Fehlen eines Flüssigkeit-Feststoff Diskriminierungstest und im Fehlen von zu erkennenden Gefahrstoffen, 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 (C<sub>12</sub>H<sub>22</sub>O<sub>11</sub>), sondern auch die Flüssigkeiten Cyclohexan (C<sub>6</sub>H<sub>12</sub>), und Glycerin (C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>O<sub>3</sub>) und Wasser (H<sub>2</sub>O), sowie den desensibilisierten Sprengstoff Ammoniumnitrat (NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub>) (siehe Tabelle 8).





## Sichere Luftfracht-Transportkette:

Konzepte, Strategien und Technologien für sichere und effiziente Luftfracht-Transportketten

gefördert von:



*Tabelle 8 Verwendeten Flüssigkeiten, Feststoffe und Gefahrstoffsimulanten und ihren effektiven Kernladungszahlen (Zeff) und Dichten.*

Verbindung	Summenformel	Dichte (g/cm <sup>3</sup> )	Zeff
Ammoniumnitrat	NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub>	1,73	7,4
Cyclohexan	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub>	0,78	4,75
Glycerin	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> O <sub>3</sub>	1,26	6,87
Wasser	H <sub>2</sub> O	1	7,5
Zucker	C <sub>12</sub> H <sub>22</sub> O <sub>11</sub>	1,1	7,3
Salz	NaCl	1,4	19,2

Die Begründung für die Auswahl der verwendenden Materialien ergibt sich aus Abbildung 27 und Abbildung 28. 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 29 rechts zeigt das resultierende Dual-Energy-Bild.

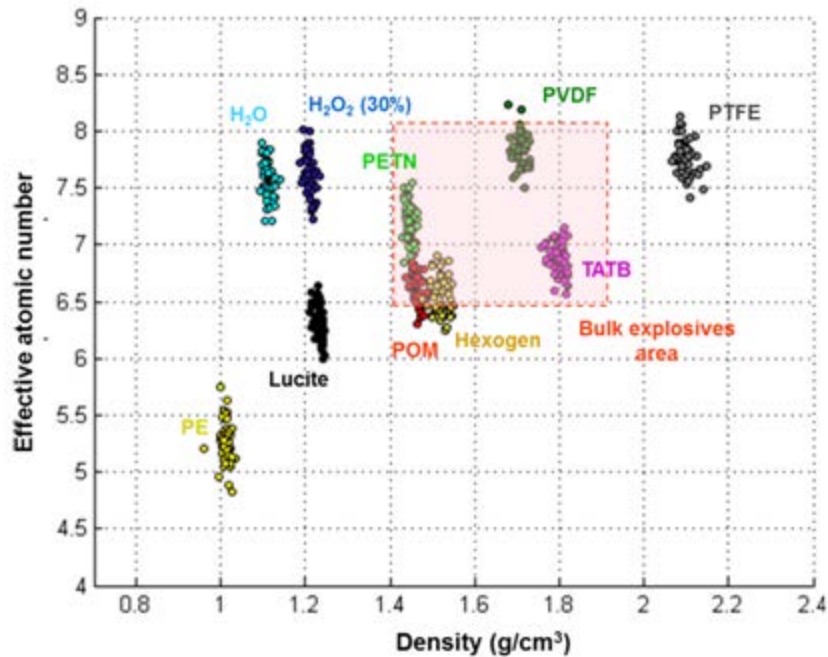


Abbildung 27 Dichte und effektive Ordnungszahl für verschiedenen organischen Materialien(4).

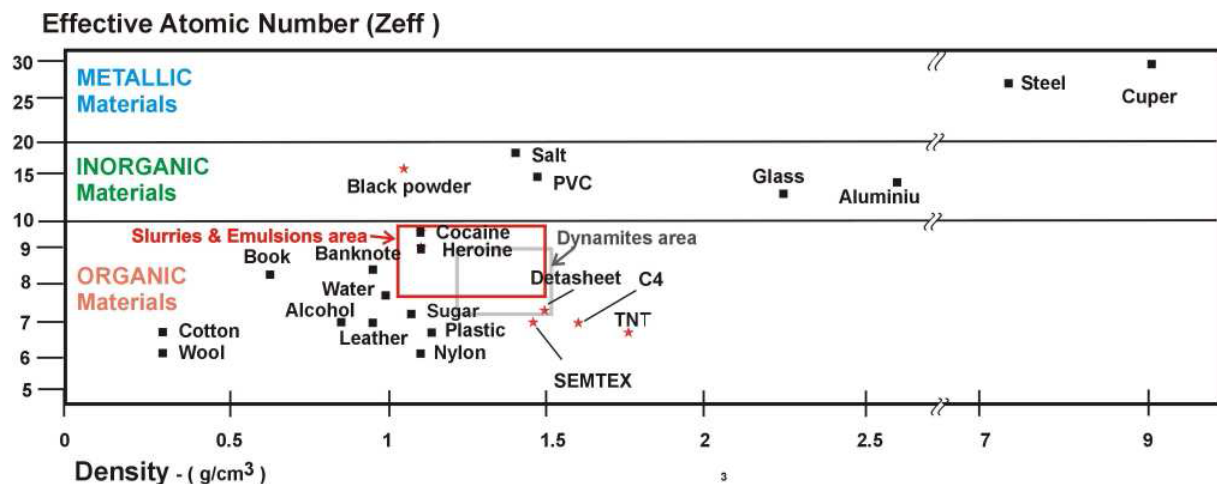
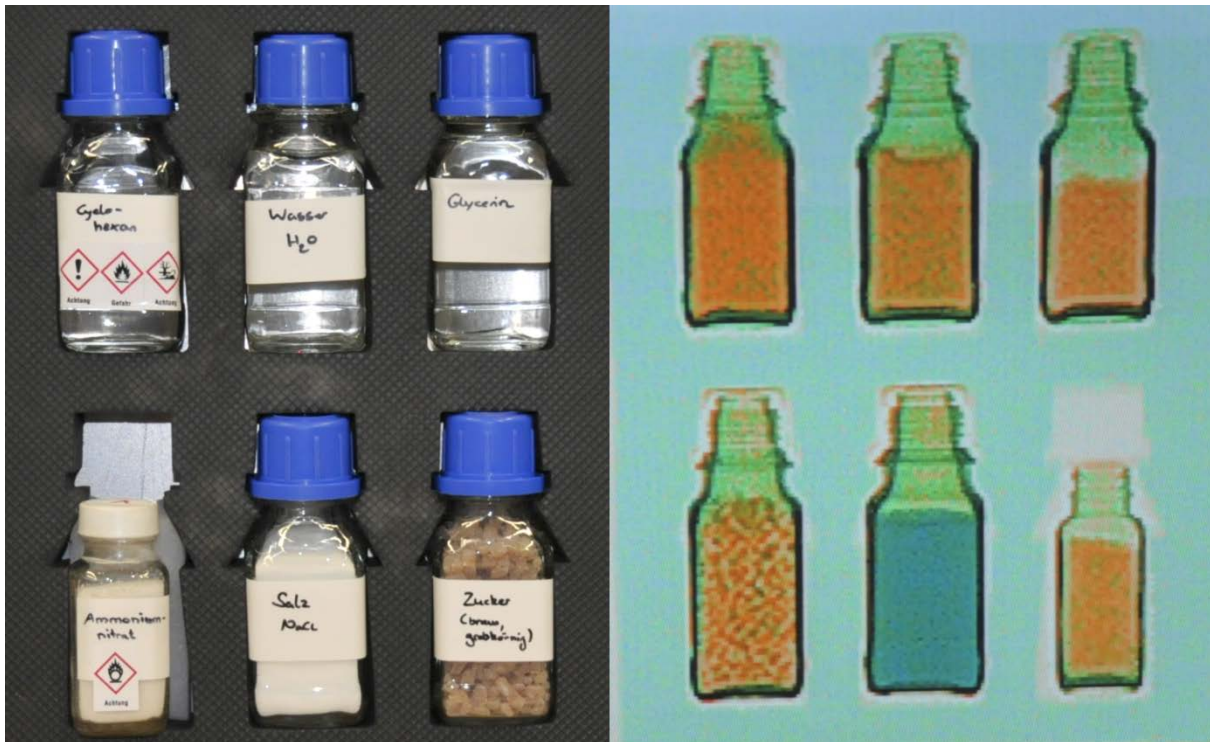


Abbildung 28 Dichte und Ordnungszahl für verschiedene organische, anorganische und metallische Materialien (5).

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“).



**Abbildung 29** Gefahrstofferkennung und Flüssigkeit-Feststoff Diskriminierung. Links Testelement mit den verwendeten Gefahrstoffflaschen, rechts Dual-Energy-Bild..

### 1.5 Konzept eines verbesserten Durchstrahlungsverfahrens

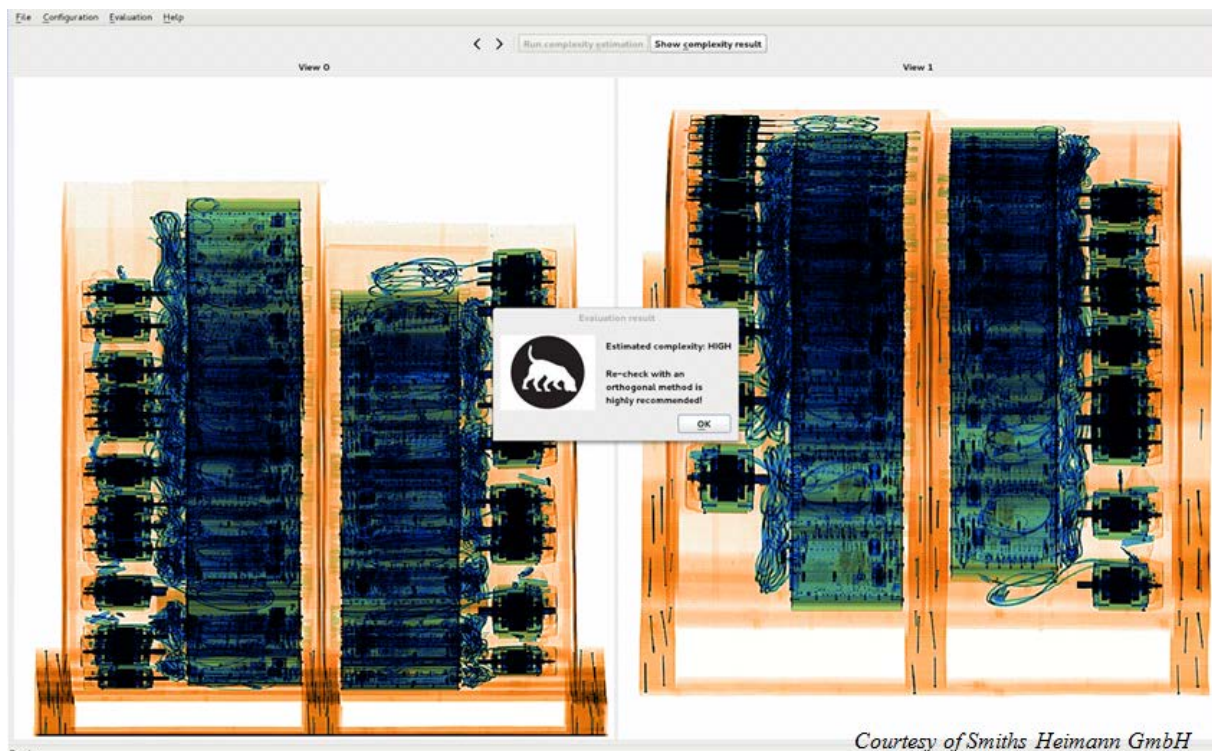
Aufgabe der BAM im AP 8 war es, ein Konzept für die Durchstrahlung von Luftfracht zu entwickeln, welches im AP 9 in einer Demonstration vorgestellt wurde. Dieses neue Konzept sollte die in den vorhergehenden Arbeitspaketen identifizierten Probleme, Anforderungen und Optimierungsmöglichkeiten adressieren, dabei aber unter Wahrung der Integrität der Fracht flexibel und mobil einsetzbar sein.

Zu den in den vorhergehenden Arbeitspaketen identifizierten Hauptproblemen bei der Durchstrahlung von Luftfracht gehörten eine mangelnde Durchdringungsfähigkeit und eine erhöhte Komplexität der Durchstrahlungsbilder im Vergleich zu Aufnahmen von Gepäck. Die mangelnde Durchdringungsfähigkeit resultiert aus den größeren durchstrahlten Materialdicken bei der Untersuchung von Luftfracht. Im Gegensatz zu normalem Gepäck ist bei der Untersuchung von Fracht aber nicht nur das zu untersuchende Frachtvolumen insgesamt grösser, sondern auch die zu durchstrahlenden Materialien unterscheiden sich. So können sich in Fracht massive Maschinenbauteile aus Metall befinden. Dies führt zu dunklen Regionen im Durchstrahlungsbild. Eine problemlose Erkennbarkeit von allen in Durchstrahlungsrichtung hintereinander befindlichen Gegenständen ist nicht mehr gegeben oder die Erkennbarkeit von Details ist erschwert. Die oftmals erhöhte Komplexität der Durchstrahlungsaufnahmen von Fracht, verglichen mit Gepäck, ergibt sich einerseits aus dem größeren Volumen, in welchem sich wesentlich mehr



Gegenstände befinden können, andererseits aus der erschwerten Interpretierbarkeit der Durchstrahlungsaufnahmen durch eine LSKK oder einen Algorithmus. Während sich beispielsweise in Handgepäck hauptsächlich Gegenstände befinden, welche die beurteilende Kontrollkraft aus der täglichen Anschauung kennt („Haarbürste“), weisen die Beschreibungen in den Frachtbegleitpapieren häufig keinen erklärenden oder die Interpretation unterstützenden Charakter auf („Maschinenbauteile“). Beides erschwert deutlich die Erkennung von Gefahrenmomenten.

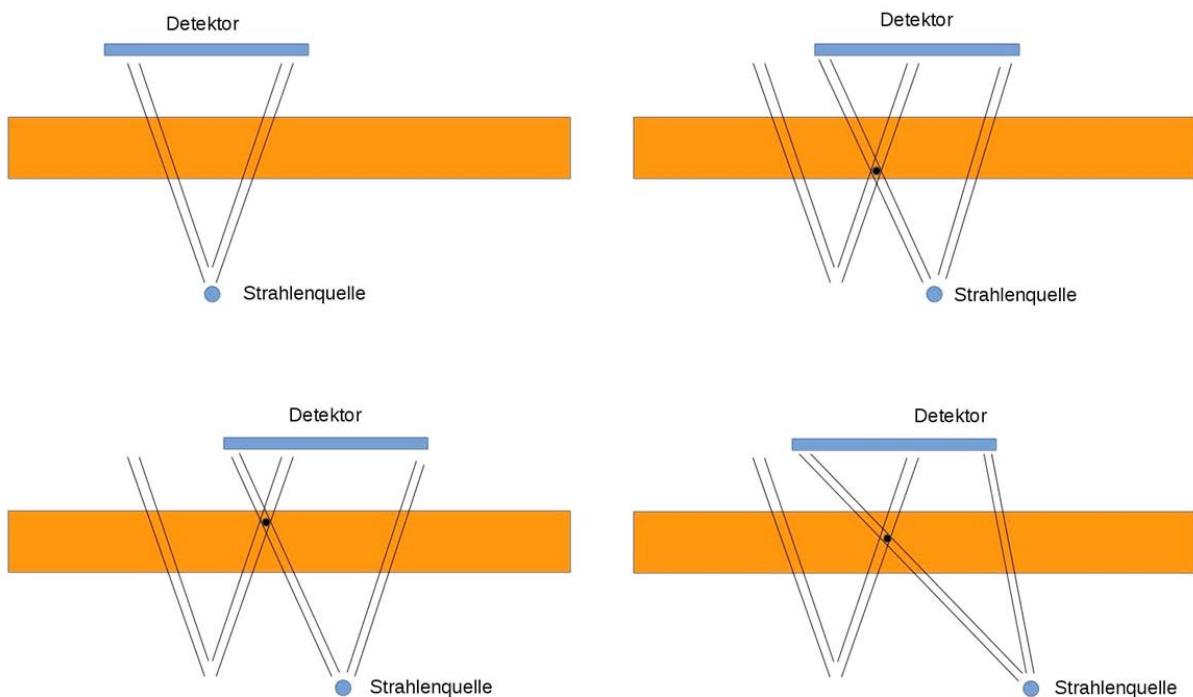
Vom Projektpartner Smith Heimann GmbH wurde ein Algorithmus entwickelt, welcher diese beiden Problemstellungen in Durchstrahlungsbildern erkennt und auf der Anzeige des Röntgenscanners einen entsprechenden Hinweis einblendet (siehe Abbildung 30). Solche Fracht weist also eine erschwerte Erkennung von Gefahrenmomenten auf und müsste manuell inspiziert werden. An dieser Stelle setzt das von der BAM entwickelte mehrstufige Verfahren an.



**Abbildung 30** Der vom Projektpartner Smith Heimann GmbH entwickelte Komplexitätsschätzer. Im Durchstrahlungsbild finden sich sowohl Regionen mit zu geringer Durchdringung, als auch eine erhöhte Komplexität. Diese Fracht sollte also dem von der BAM entwickelten mehrstufigen Verfahren zugeführt werden.

Grundsätzlich lässt sich die Durchdringungsfähigkeit durch eine Erhöhung der verwendeten Röntgenenergie erreichen. Dies wird technisch durch die Anwendung der Hochenergierradiographie realisiert. Statt einer Röntgenröhre wird ein Beschleuniger, im konkreten Fall ein Betatron verwendet. Die Komplexität kann einerseits durch Verwendung eines hochauflösenden Flachdetektors reduziert werden. Dieser führt zwar nicht zu einer tatsächlichen Reduktion der Komplexität, aber durch die bessere Erkennbarkeit von Details zu einer besseren

Unterscheidbarkeit und Interpretierbarkeit der Durchstrahlungsaufnahmen. Andererseits kann die Interpretation von komplexen Bildszenarien deutlich erleichtert werden, wenn der beurteilenden Kontrollkraft dreidimensionale Informationen zur Verfügung stehen. Diese lassen sich durch unterschiedliche Aufnahmeverfahren gewinnen. Eine vollständige 3D-Information erfordert eine Computertomographie. Diese ist im Fall von Frachtgut sehr zeitaufwendig und auch technisch deutlich aufwendiger, besonders für eine mobile Lösung. Sie wurde daher für diesen Anwendungsfall nicht berücksichtigt. Eine technisch leichter umzusetzende und weniger zeitaufwendige Methode bietet die Laminographie. Das Prinzip ist in Abbildung 31 dargestellt. Die Fracht, oder ein bestimmter Teil der Fracht wird mit einem Flachdetektor und einer Strahlenquelle rasterförmig durchstrahlt. In den einzelnen Aufnahmen erscheinen gleiche Positionen innerhalb der durchstrahlten Fracht an jeweils anderen Detektorpositionen. Durch Verrechnung der einzelnen

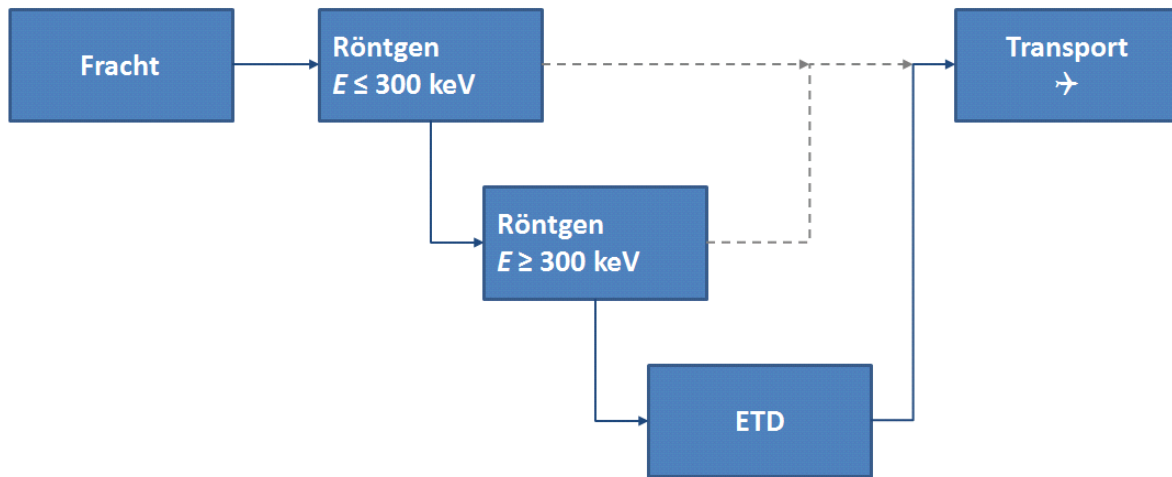


**Abbildung 31 Anschauliche Erklärung des laminographischen Verfahrens. Dasselbe Volumenelement wird mit unterschiedlichen Positionen von Detektor und Strahlenquelle durchstrahlt. Jeweils gleiche Strahlengänge (relativ zu Detektor und Strahler) schneiden sich dadurch in unterschiedlichen Tiefen des untersuchten Objektes (oben rechts und unten links). Dies ermöglicht im Nachhinein eine Rekonstruktion unterschiedlicher Tiefenschichten des Objektes. Die Tiefenauflösung lässt sich durch eine zusätzliche Änderung des Winkels zwischen Detektor und Strahler verbessern (unten rechts).**

Aufnahmen lassen sich einzelne Tiefenschichten rekonstruieren. Im resultierenden Bild erscheinen dann nur Gegenstände scharf, welche sich in dieser Tiefenschicht befinden. Die mathematischen Grundlagen der Laminographie lassen sich in jedem Lehrbuch zur Computertomographie nachlesen. Diese zusätzliche Tiefeninformation erleichtert das beurteilen komplexer Bildszenarien deutlich. Sollten auch nach

Anwendung dieser Methoden Zweifel bestehen bleiben, ob ein Gefahrenmoment vorliegt oder nicht, muss anschließend ein orthogonales Verfahren zum Einsatz kommen. Beim Konzept der BAM handelt es sich hierbei um die Ionenmobilitätsspektrometrie (IMS) als chemisches Detektionsverfahren.

Die drei Lösungsmöglichkeiten Hochenergie zur besseren Durchdringung, hochauflösender Flachdetektor zur besseren Erkennbarkeit von Details und Anwendung der Laminographie wurden nun zu einem mehrstufigen Verfahren kombiniert. Abbildung 32 zeigt dabei das grundsätzliche Vorgehen. Werden bei der herkömmlichen Röntgenuntersuchung mit Niedrigenergie dunkle oder komplexe Regionen im Bild erkannt (Abbildung 30), kommt das hier entwickelte mehrstufige Verfahren zum Einsatz.



**Abbildung 32 Grundsätzliches Schema des von der BAM entwickelten mehrstufigen Konzeptes.** Werden bei der klassischen Röntgenuntersuchung der Fracht ( $E < 300 \text{ keV}$ ) dunkle oder komplexe Regionen erkannt, wird die Fracht der Hochenergierradiographie zugeführt. Können Gefahrenmomente dabei nicht aufgeklärt werden, erfolgt eine chemische Spurendetektion zum Nachweis von Sprengstoffen (ETD).

Lassen sich potentielle Gefahrenmomente weder durch Verwendung der Hochenergierradiographie noch durch Gewinnung von besserer Erkennbarkeit oder Tiefeninformation ausschließen, erfolgt ein chemischer Spurennachweis.

Das detaillierte Schema des mehrstufigen Verfahrens ist in Abbildung 33 dargestellt. Sind in einer Durchstrahlungsaufnahme eines herkömmlichen Röntgenscanners, wie in Abbildung 30 dunkle Regionen mit mangelnder Durchdringung zu finden, so erfolgt erneuter Scan mit Hochenergie-Röntgenquelle (Betatron). Hierbei kann ein schneller und einen großen Flächenbereich abdeckender Zeilendetektor zum Einsatz kommen. Bei kleinen dunklen Regionen oder Regionen mit erhöhter Komplexität kommt ein hochauflösender Flachdetektor zum Einsatz. Mit diesem wird entweder gezielt eine bestimmte Region der Fracht, bzw. des Luftfrachtcontainers angefahren (Lupenfunktion) oder ein Teilbereich bis hin zum gesamten Container wird Bild für Bild mäanderförmig abgerastert. Das genaue Schema der Rasterung hängt dabei



davon ab, ob man nur eine höhere Auflösung und damit eine bessere Erkennbarkeit von Details erreichen will, oder ob man darüber hinaus zusätzliche Tiefeninformation zur Interpretation des Bildinhaltes erhalten will (Laminographie). Lässt sich durch dieses Vorgehen ein Gefahrenmoment nicht aufklären, kommt daran anschließend ein orthogonales Verfahren, im konkreten Fall die Ionenmobilitaetsspektrometrie (IMS) als chemisches Verfahren zum Nachweis von Sprengstoffspuren zum Einsatz.

Sowohl das gezielte Anfahren verdächtiger Regionen mit dem Flachdetektor als auch das Abrastern einer bestimmten Region erfordern eine flexible Positionierung von Strahlenquelle und Detektor. Dies ist in einem herkömmlichen und am Markt erhältlichen Röntgenscanner nicht gegeben. Die Umsetzung erfolgte daher im BAM

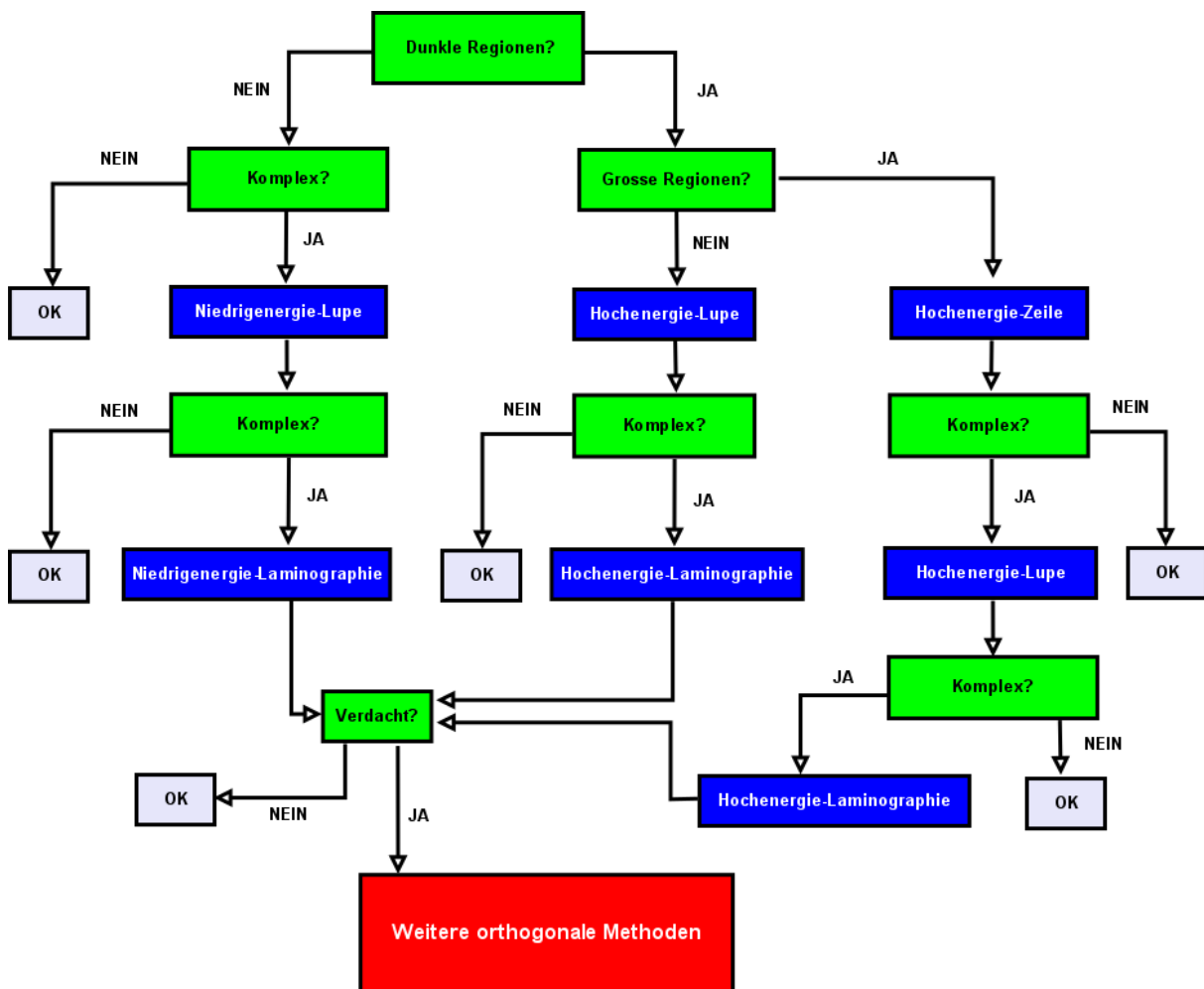
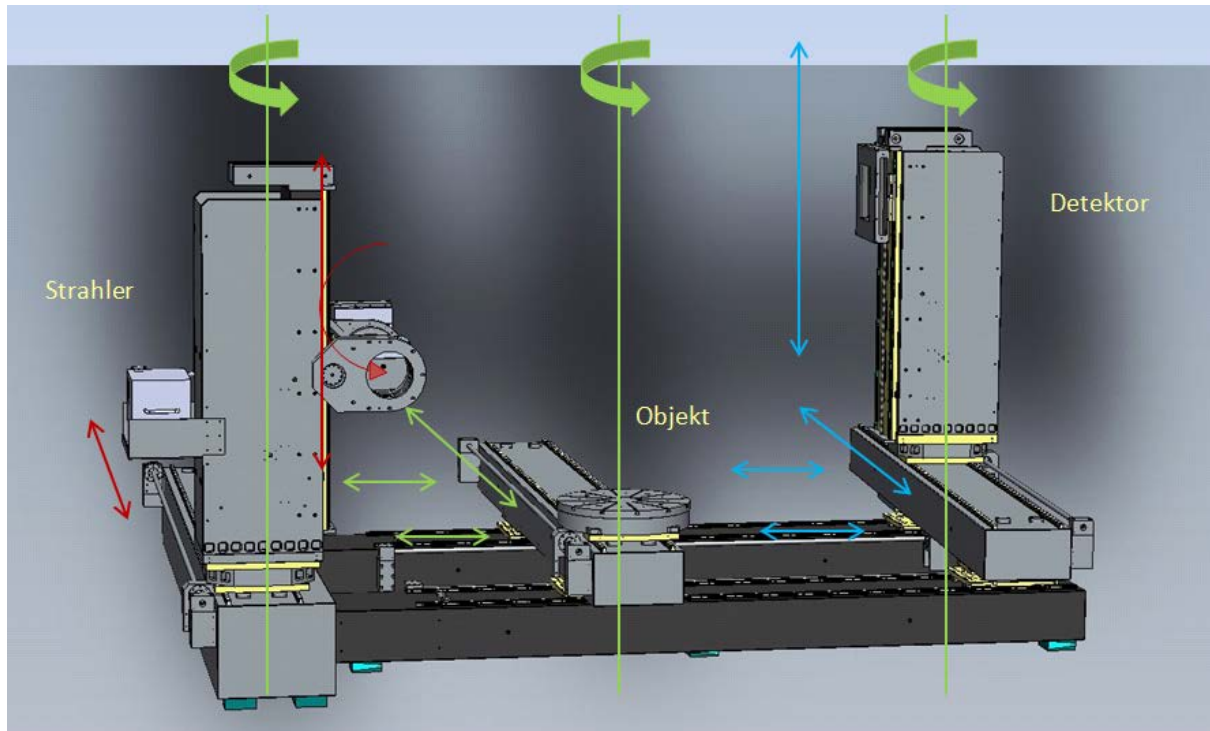


Abbildung 33 Das von der BAM entwickelte mehrstufige Verfahren im Detail. Die genauere Erklärung findet sich im Text.

eigenen Hexytech (High Energy X-ray laboratory). Hier stehen frei positionierbare Manipulatoren für Strahlenquelle, Objekt und Detektor zur Verfügung (siehe Abbildung 34).



**Abbildung 34** Prinzipskizze des BAM eigenen Hexytech. Die Manipulatoren für Strahler, Objekt und Detektor sind in jeder Richtung frei positionierbar.

### 1.5.1 Umsetzung als mobiler Aufbau

Der stationäre Aufbau einer Durchstrahlungsanlage, wie sie zur Anwendung des entwickelten mehrstufigen Konzeptes notwendig ist, bietet nur eine eingeschränkte Flexibilität. Zusätzlich zum stationären Aufbau wurde daher eine mobile Durchstrahlungsanlage entwickelt (siehe Abbildung 35 und Abbildung 36). Diese ist frei beweglich auf Rollen montiert, so dass sie vor Ort für zu untersuchende Fracht flexibel eingesetzt werden kann. Die Anlage besteht aus einem Gerüst aus Leichtmetallprofilen als Trägersystem. Auf diesem Grundgerüst werden die Quelle für die Röntgenstrahlung (Betatron) und der Detektor beweglich befestigt. Beide können mittels mechanischer Verfahrereinheiten rechnergestützt verfahren und positioniert werden. Dadurch lassen sich gezielt bestimmte Bereiche des Luftfrachtcontainers anfahren und durchstrahlen oder der gesamte Container Stück für Stück abrastern. Die genauen Anforderungen und Spezifikationen der mobilen Durchstrahlungsanlage konnten erst im Laufe der Entwicklung der Anlage finalisiert werden, so dass der mobile Aufbau bis zum Projektende den Technology Readiness Level (TRL) 4 (technology validated in lab) erreichte. Eine grundlegende Funktionsweise der mobilen Durchstrahlungsanlage wurde damit erreicht, eine Weiterentwicklung bis zum TRL 5 hätte neue, präzisere Steuereinheiten für die verwendeten Verfahrereinheiten, also Linearachsen und Schrittmotoren, notwendig gemacht, um die Positionierung von Strahlenquelle und Detektor zu optimieren. Für die Demonstration in AP9 wurde daher in Absprache mit den Projektpartnern das Hexytech der BAM genutzt.

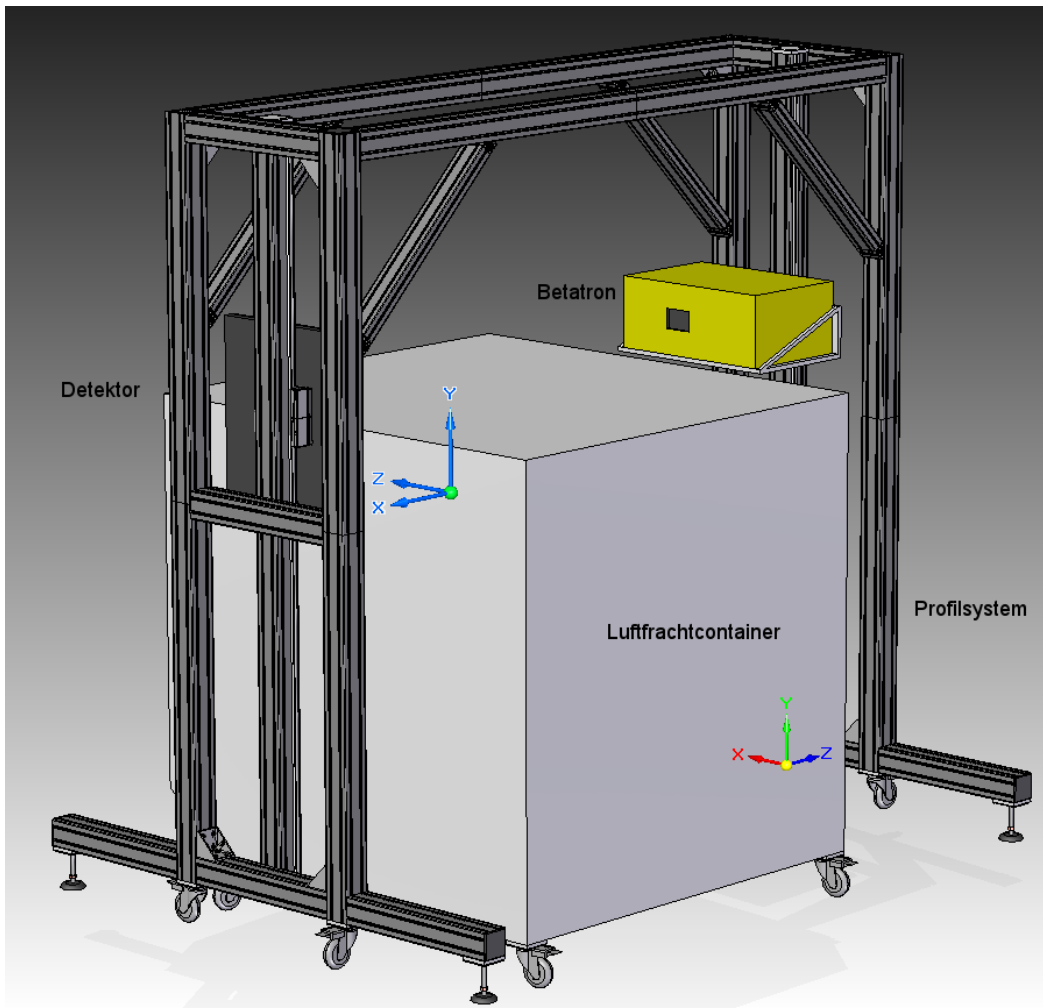


Abbildung 35 Konstruktionsskizze der entwickelten mobilen Durchstrahlungsanlage.



Abbildung 36 Die mobile Anlage im praktischen Einsatz. Linkes Bild: Strahlerseite mit montiertem Betatron. Rechtes Bild: Detektorseite.



## Sichere Luftfracht-Transportkette:

Konzepte, Strategien und Technologien für sichere und effiziente Luftfracht-Transportketten

gefördert von:



### 1.6 Demonstration einer Containerprüfung

Im AP 9 wurde von der BAM das neu entwickelte und im vorhergehenden Abschnitt vorgestellte Durchstrahlungskonzept anhand eines realistischen Szenarios demonstriert. Dazu wurde ein Luftfrachtcontainer so präpariert, dass er jeweils alle identifizierten Gefahrenmomente aufweist. Dies bedeutet im einzelnen, dass einerseits Gegenstände, welche in einem herkömmlichen Frachtscanner einen Dunkelalarm auslösen würden (Transformatoren mit Eisenkern und massiven Kupferwicklungen, Kompressor aus massivem Metall) als Inhalt verwendet wurden, andererseits wurden Gegenstände verwendet, welche in der Durchstrahlungsaufnahme einen hohen Komplexitätsgrad aufweisen (Laserdrucker). Darüber hinaus wurden zwei USBV und kleine Flüssigkeitsbehälter mit Sprengstoffsimulantien im Container platziert, welche mit Spuren von TNT und RDX verunreinigt wurden. Neben selbst hergestellten Sprengstofflösungen wurde auch das NIST-Referenzmaterial SRM 2905 mit definierten Stoffmengen TNT, RDX und HMX dafür verwendet.

In einer ersten Stufe, welche zum Einsatz kommen kann, wenn lediglich große dunkle Bereiche in der herkömmlichen Durchstrahlungsaufnahme auftreten, die Problemstellung also durch Verwendung einer höheren Röntgenenergie gelöst werden kann, wurde eine Durchstrahlung mit Hochenergie (Betatron mit 7.5 MeV) und einem Zeilendetektor durchgeführt. Dieser Zwischenschritt erfordert durch die hohe Empfindlichkeit des Zeilendetektors und durch seine Größe nur eine sehr kurze Messung (Messzeit unter 1 Minute) für die Durchstrahlung des gesamten Containers. Er wurde daher in das eigentlich nur mit einem hochauflösenden Flachdetektor geplante Durchstrahlungskonzept mit aufgenommen. Bei einer mobilen Lösung entfällt dieser Schritt aufgrund des hohen Gewichtes des Detektorgehäuses. Die praktische Durchführung ist in Abbildung 37 zu sehen, das resultierende Durchstrahlungsbild in Abbildung 39 links. Sowohl der Kompressor (in Abbildung 39 mit 1 markiert) kann durchstrahlt werden, als auch ein massives Motorenteil (2), die massiven Transformatorkerne (3) werden ebenfalls durchdrungen, allerdings nur schwach bei der gewählten Belichtungszeit für diesen Übersichtsscan.



*Abbildung 37 Schneller Hochenergie-Zeilenscan des Luftfrachtcontainers im Hexytech. Links im Bild der Zeilendetektor, rechts im Bild das Betatron. In der realen Messung befinden sich Betatron und Detektor dicht am Container.*

Ebenso zu erkennen ist in Abbildung 39, markiert mit einem roten Rechteck, eine Bildregion mit erhöhtem Komplexitätsgehalt (das Innenleben eines Laserdruckers). Für beide Problemstellungen, also Regionen mit erschwerter Durchdringung, welche mit einer erhöhten Belichtungszeit durchstrahlt werden müssen, und für Regionen mit erhöhter Komplexität kommt hier die nächste Stufe des Verfahrens zum Einsatz, die sogenannte Lupenfunktion. Hierbei werden mit einem hochauflösenden Flachdetektor gezielt die näher zu inspizierenden Regionen des Containers angefahren (siehe Abbildung 38).





Abbildung 38 Abrastern des Luftfrachtcontainers mit Betatron (rechts) und hochauflösendem Flachdetektor (links). In der realen Messung befinden sich Betatron und Detektor dicht am Container.

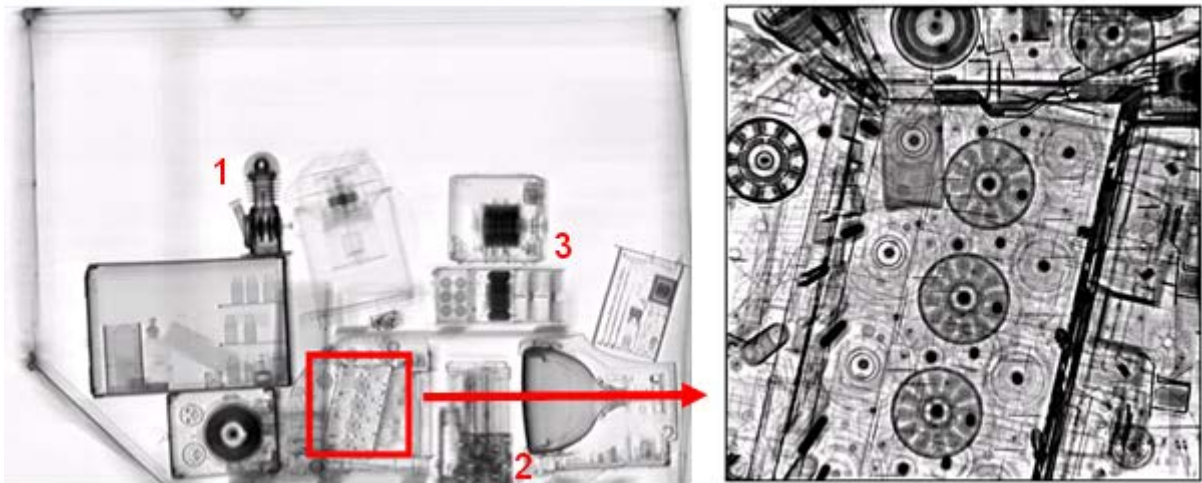


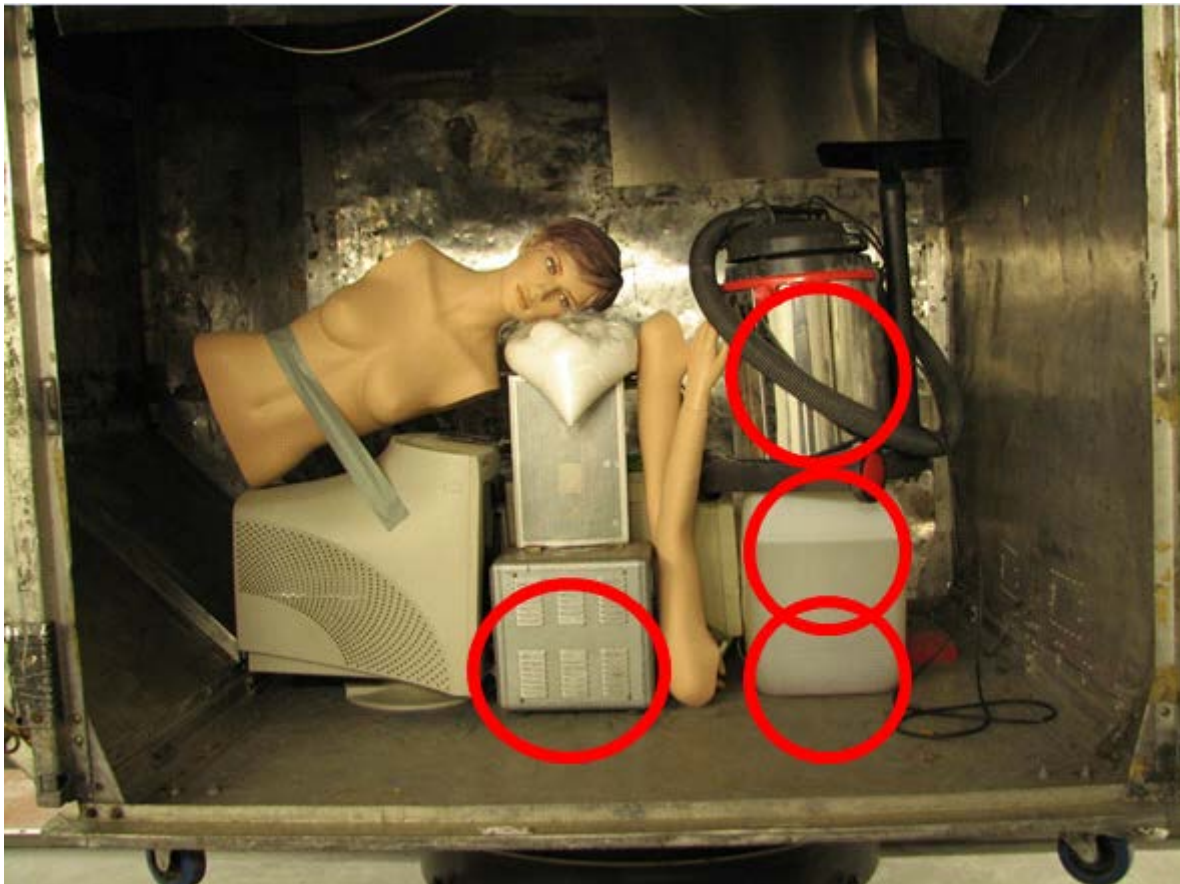
Abbildung 39 Links Gesamtübersicht des Luftfrachtcontainers, erhalten durch einen Scan mit dem Zeilendetektor. Rot markiert: potentielles Gefahrenmoment durch hohe Komplexität. Rechts: Detailaufnahme der rot markierten Region mit hochauflösendem Flachdetektor. Ein im Innern des Druckers verstecktes Fläschchen ist zu erkennen.

Überschreitet die Größe der interessierenden Region dabei nicht die Größe des Detektors (im konkreten Fall 40x40cm), so ist eine einzelne gezielte Durchstrahlungsaufnahme dabei ausreichend. In Abbildung 39 (rechts) ist die Aufnahme für die im linken Bild rot markierte Region mit erhöhter Komplexität zu sehen. Deutlich zu erkennen ist ein im Innern des Druckers verstecktes Fläschchen zu



erkennen. Ist der zu untersuchende Bereich des Containers grösser als die Fläche des Detektors, so muss dieser Bereich mittels mehrerer Einzelaufnahmen abgerastert werden. Die einzelnen Aufnahmen werden dann zu einer Gesamtaufnahme zusammengesetzt.

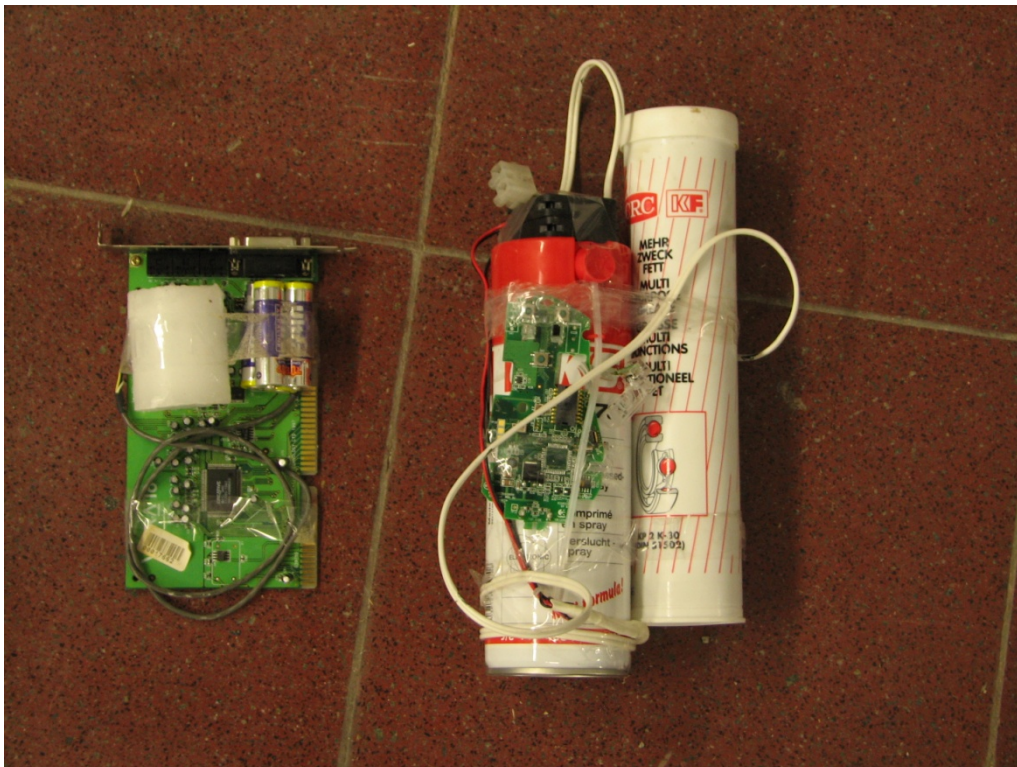
Oftmals können diese hochauflösenden Einzelaufnahmen einen unklaren Sachverhalt jedoch nicht eindeutig aufklären. So können wenig Röntgenstrahlung absorbierende Gegenstände, welche sich – in Durchstrahlungsrichtung – hinter massiven und hoch absorbierenden Gegenständen befinden nur sehr schlecht erkannt werden. Auch ist die Interpretation von komplexen zweidimensionalen Bildern schwierig, weil nicht erkannt werden kann, ob sich bestimmte Gegenstände vor, hinter oder innerhalb eines anderen Gegenstandes befinden. In diesem Fall kommt die nächste Stufe des Verfahrens zum Einsatz, die Gewinnung von Tiefeninformation.



**Abbildung 40** Für die Demonstration präparierter Testcontainer. Rot markiert die potentiellen und zu erkennenden Gefahrenmomente. Links Transformator, unten rechts Flüssigkeitskanister mit USBV, oben rechts Industriesauger mit im Innern versteckter USBV.

Hierbei werden Teile oder der gesamte Container mit einem Flachdetektor abgerastert. Der jeweilige Versatz zwischen den einzelnen Aufnahmen, sowie der Versatz zwischen Strahlenquelle und Detektor richtet sich dabei nach der erforderlichen Tiefenauflösung. Der für dieses Szenario präparierte

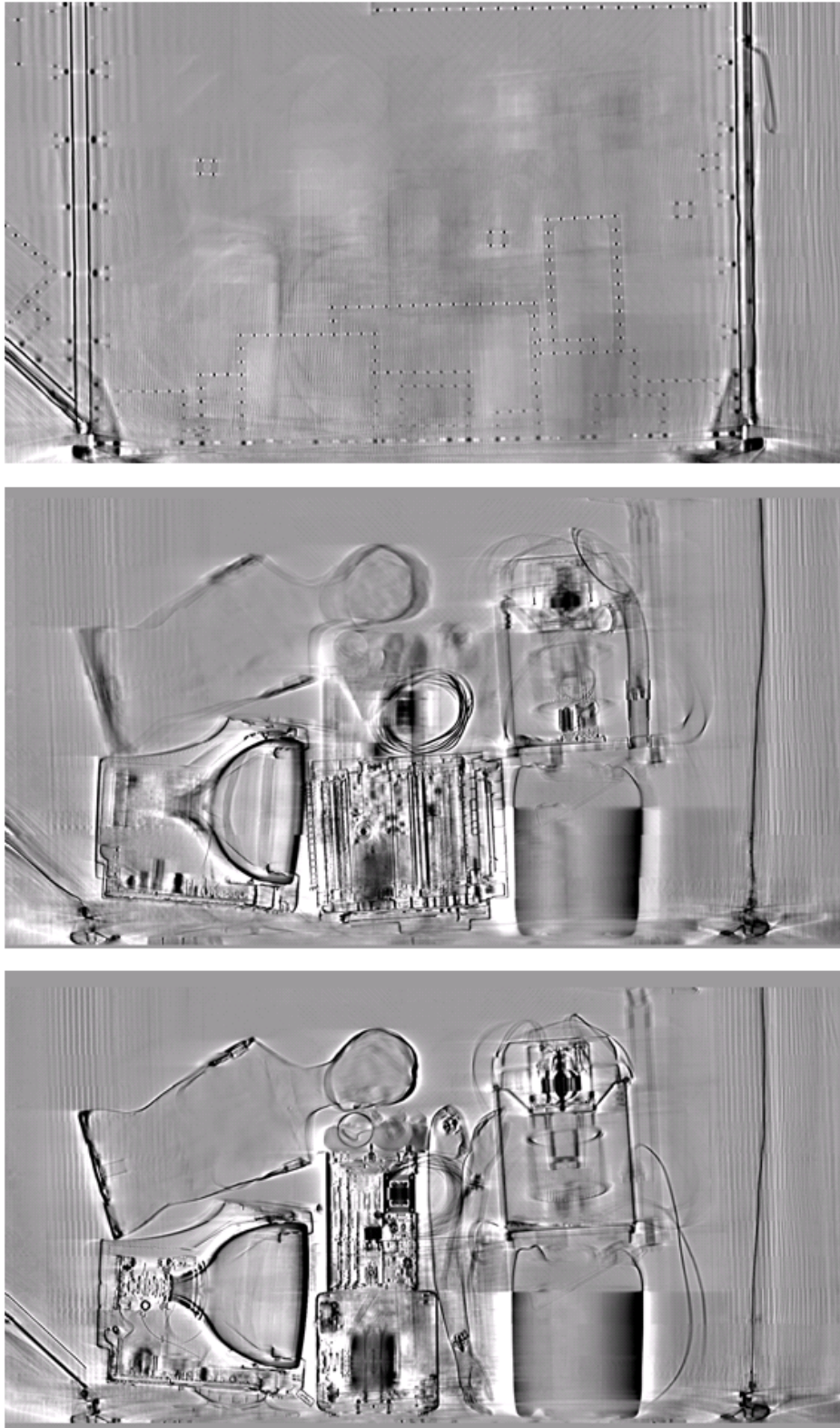
Luftfrachtcontainer ist in Abbildung 40 zu sehen. Es wurden folgende Gefahrenmomente realisiert. Hinter einem Transformator (erschwerter Durchdringung) wurden Gegenstände mit komplexer Struktur positioniert (Leiterplatten, Drucker), in einem Industriesauger wurde eine USBV positioniert (schwierige räumliche Interpretation der Struktur), ebenso wie hinter einem mit Öl (potentieller Brennstoff!) gefülltem Kanister (Durchdringung). Zusätzlich wurde ein Gegenstand mit ähnlicher Absorption innerhalb des Kanisters positioniert (schwierige Erkennbarkeit). Abbildung 41 zeigt die beiden im Container platzierten USBV.



**Abbildung 41** Die beiden im Testcontainer platzierten USBV.

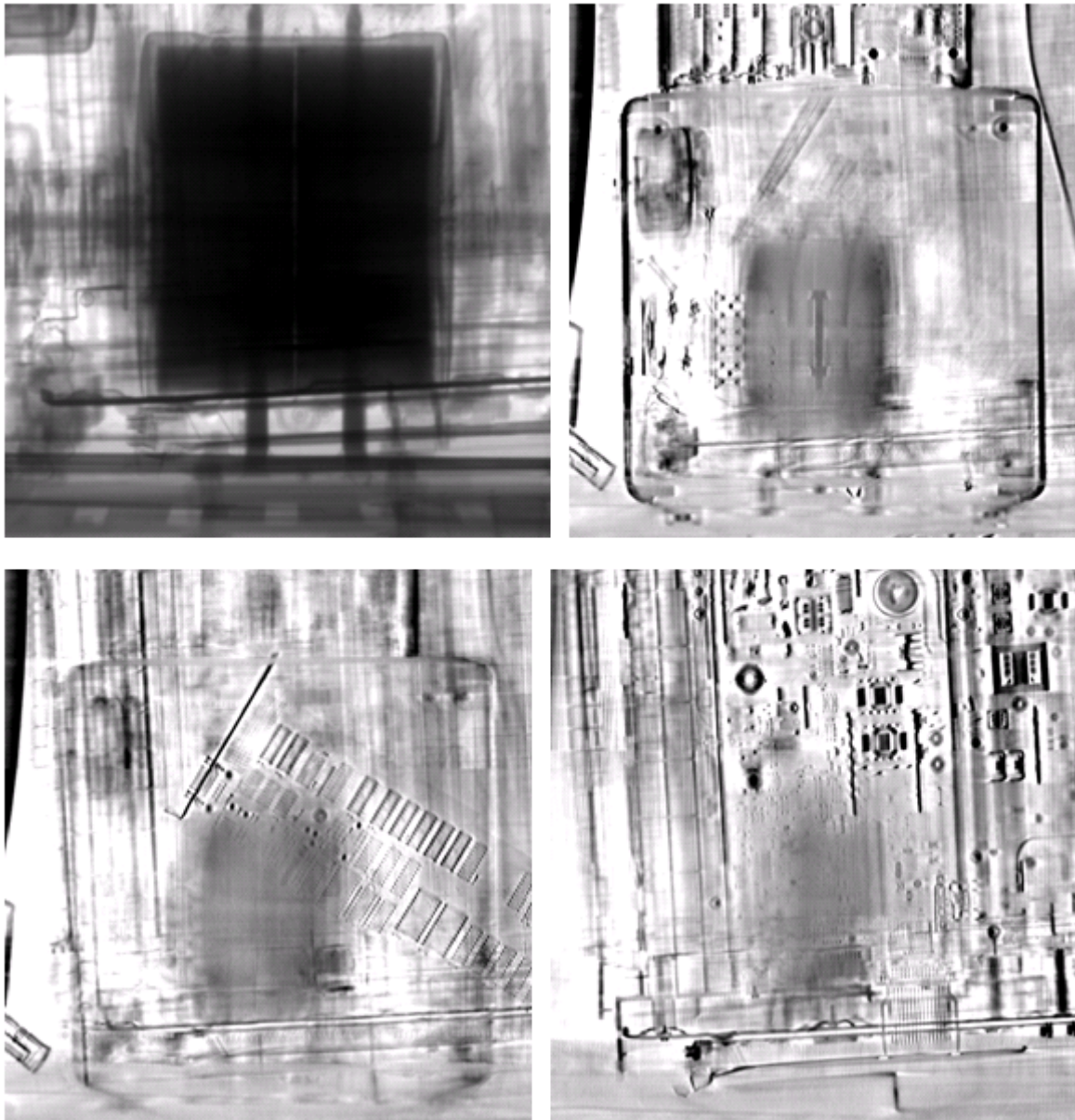
Für die Demonstration wurde eine Laminographie des gesamten Containers durchgeführt. In der Praxis würde man aufgrund des Zeitaufwandes die Laminographie nur für den interessierenden Teilbereich des Containers durchführen. Das Ergebnis ist beispielhaft in Abbildung 42 dargestellt, welche verschiedene rekonstruierte Tiefenschichten zeigt. Das obere Bild zeigt die hintere Wand des Luftfrachtcontainers, die beiden unteren Bilder unterschiedliche Tiefenlagen. So ist im mittleren Bild (mittig) der hinter dem Transformator befindliche Drucker erkennbar, im unteren Bild der vor dem Drucker befindliche Transformator und ein Arm der Schaufensterpuppe. Abbildung 43 bis Abbildung 46 zeigen die interessierenden Teilbereiche des Containers.





*Abbildung 42 Laminographie des gesamten Luftfrachtcontainers. Im oberen Bild ist die hintere Containerwand erkennbar. Mitte und unten: verschiedene Tiefenschichten im Container.*

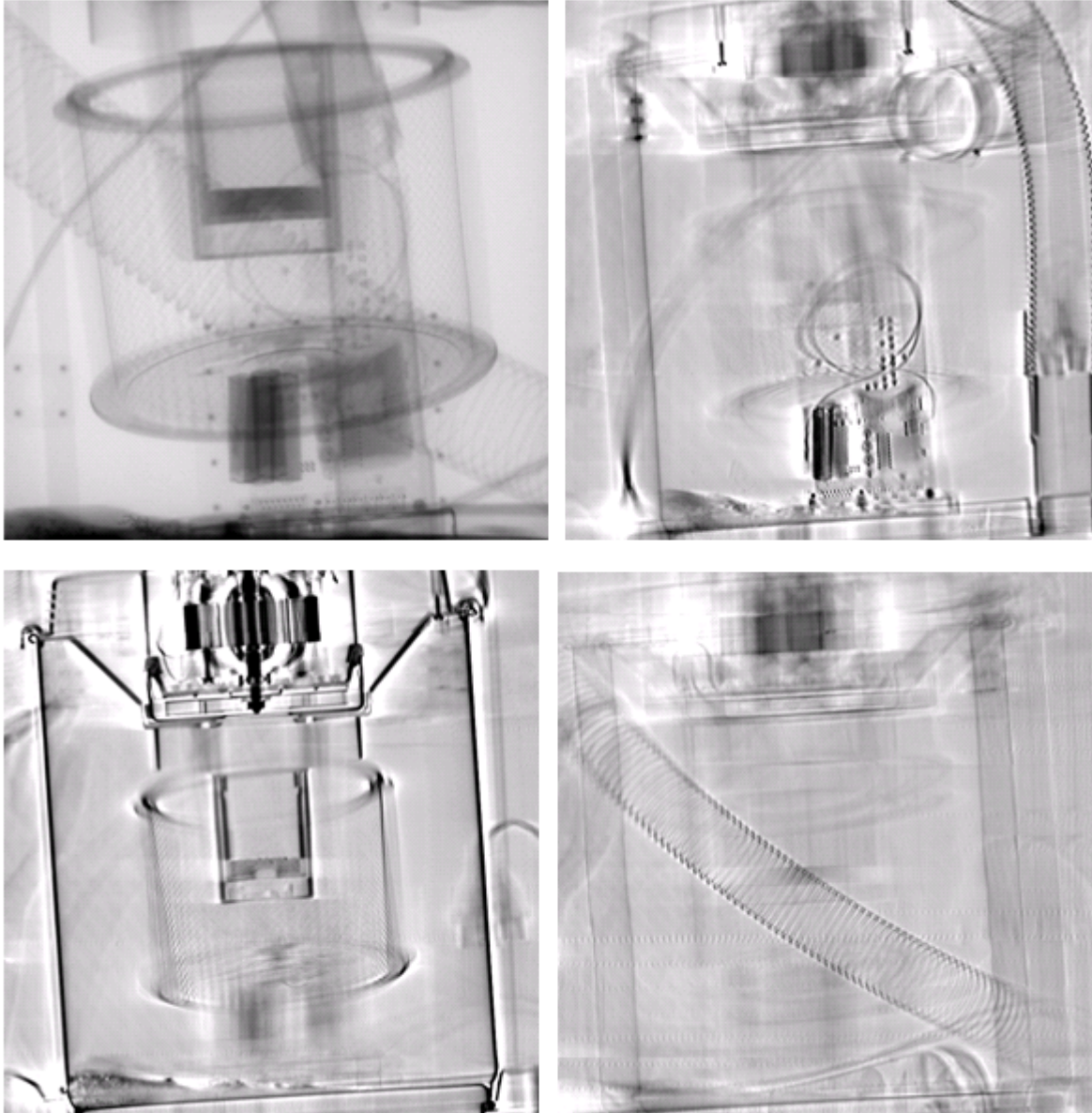
In Abbildung 43 ist der Transformator dargestellt (siehe Abbildung 40). Das obere linke Bild zeigt eine einfache Durchstrahlungsaufnahme. Aufgrund der hohen Absorption des Transformator-kerns sind keine weiteren Details erkennbar. Durch die Gewinnung der Tiefeninformation lässt sich aber hinter den Transformator schauen. Das obere rechte Bild zeigt das Innenleben des Transformators, das untere linke Bild eine direkt hinter dem Transformator platzierte Computerplatine. Das untere rechte Bild zeigt das Innenleben des hinter dem Transformator platzierten Druckers.



**Abbildung 43 Transformator.** Oben links das Durchstrahlungsbild. Die schlechte Durchdringung des Transformator-kerns lässt eine Erkennung von Details nicht zu. Oben rechts rekonstruierte Tiefenebene im Transformatorinneren. Untere Reihe: rekonstruierte Tiefenebenen hinter dem Transformator. Links eine hinter dem Trafo platzierte Platine, rechts das Innenleben eines hinter dem Transformator platzierten Druckers.



Trotz der hohen Absorption des Transformator-kerns lassen sich also auch Details hinter dem Transformator deutlich erkennen.

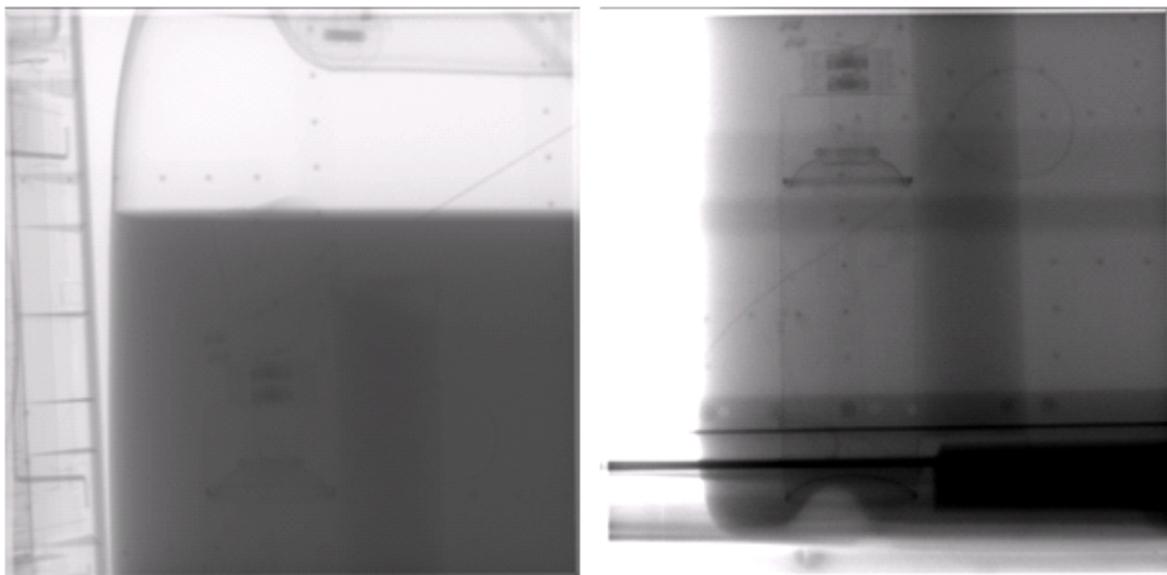


**Abbildung 44 Industriesauger. Oben links die Durchstrahlungsaufnahme. Oben rechts rekonstruierte Tiefenebene im Innern des Saugers. Die USBV ist hier deutlich zu lokalisieren. Unten links Ansaugstutzen in der Mitte des Saugers, unten rechts Ansaugschlauch auf der Rückseite des Saugers.**

Abbildung 44 oben links zeigt die einfache Durchstrahlungsaufnahme des Industriesaugers (siehe Abbildung 40). Da keine Tiefeninformationen vorliegen, ist die Interpretation der Aufnahme erschwert. Die obere rechte Abbildung zeigt die rekonstruierte Tiefenebene in welcher sich die USBV befindet. Sie liegt zwischen Vorderwand des Saugers und dem mittig im Sauger befindlichen Ansaugtrakt (untere linke Abbildung). Das rechte untere Bild zeigt den hinter dem Sauger verlaufenden

Ansaugschlauch. Durch diese Tiefeninformation ist also klar erkennbar, dass sich der verdächtige Gegenstand innerhalb des Saugers befindet, also ein deutliches Verdachtsmoment darstellt.

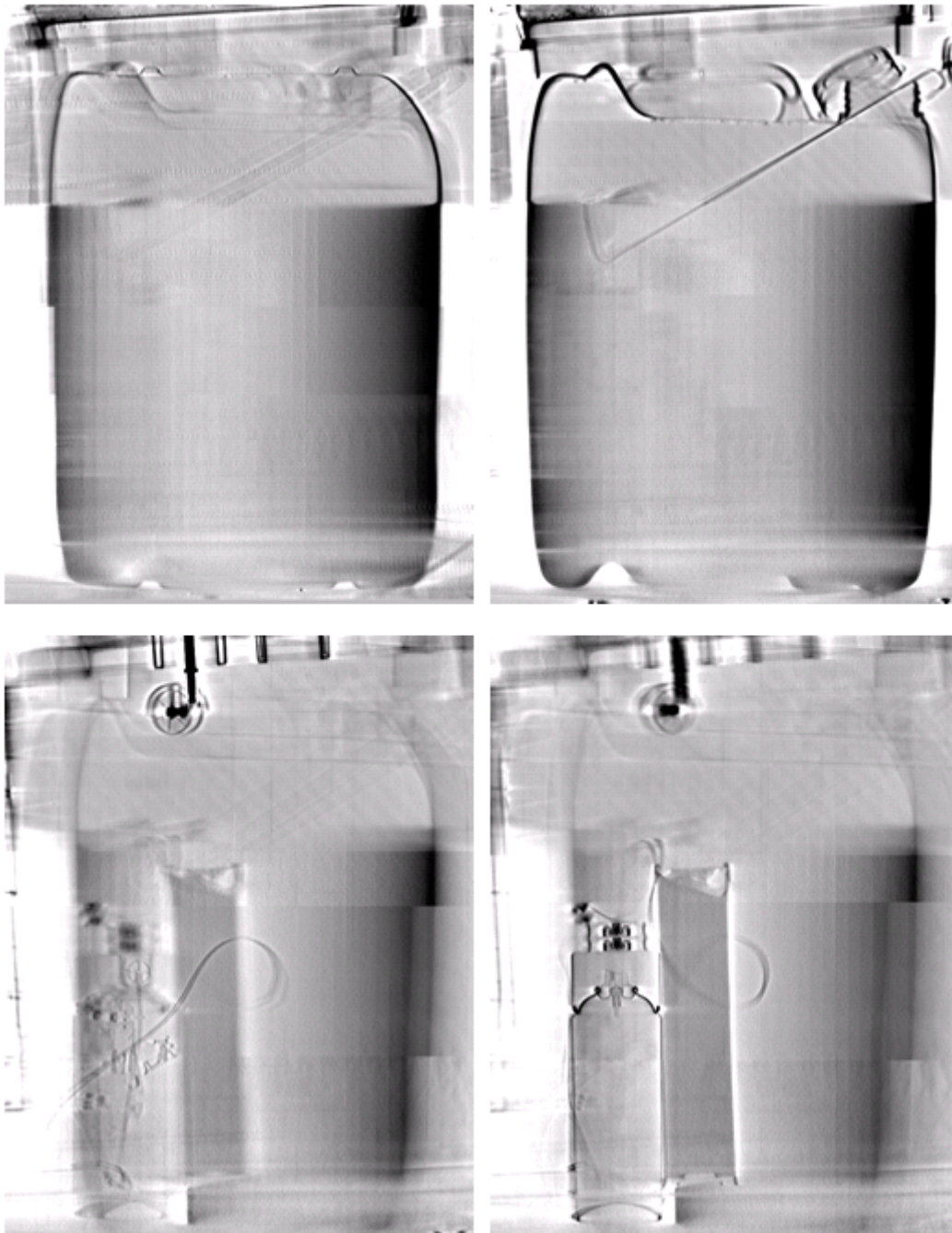
Abbildung 45 zeigt die Durchstrahlungsaufnahme des mit Öl gefüllten Kanisters. Der Gegenstand gleicher Absorption im rechten Bild ist nicht zu erkennen, die hinter dem Fass platzierte USBV (es könnte sich um einen Zünder für das potentielle Brandmittel Öl im Kanister handeln) ist nur sehr schlecht zu erkennen. Auch ist nicht klar, ob sich der verdächtige Gegenstand, also die USBV im, vor oder hinter dem Kanister befindet.



*Abbildung 45 Durchstrahlungsbild des mit Flüssigkeit gefüllten Kanisters. Die USBV (rechts) und der Gegenstand gleicher Absorption (links) sind kaum zu erkennen.*

Die rekonstruierte Tiefeninformation dieser Containerregion ist in Abbildung 46 dargestellt. Der Gegenstand mit ähnlichem Absorptionsvermögen ist in der Tiefenlage mittig im Kanister erkennbar, wenn auch nur schwierig. Er schaut oben etwas über den Flüssigkeitsstand hinaus. Die USBV (potentieller Zünder) ist durch die rekonstruierte Tiefeninformation klar erkennbar am hinteren des Rand des Kanisters zu lokalisieren (untere Bildreihe).





**Abbildung 46** Rekonstruierte Tiefenschichten des Kanisters. Oben rechts ist der Gegenstand gleicher Dichte erkennbar, in der unteren Reihe die USBV.

Das mehrstufige Durchstrahlungsverfahren hat für diesen Luftfrachtcontainer also zwei klare Gefahrenmomente ergeben, so dass an dieser Stelle eine weitere Untersuchung, bzw. Aufklärung der Verdachtsmomente notwendig ist. Als weiterer Schritt kommt hier ein orthogonales Verfahren zum Einsatz, ein chemischer Nachweis von Sprengstoffspuren. Die BAM hat sich hier für die Ionen-Mobilitäts-Spektrometrie (IMS) entschieden, aufgrund der im Abschnitt „Analyse orthogonaler



## Sichere Luftfracht-Transportkette:

Konzepte, Strategien und Technologien für sichere und effiziente Luftfracht-Transportketten

gefördert von:



Methoden“ beschriebenen Vorteile. Zum Einsatz kam das ETD-Gerät QS-B220 von Implant Science Corporation. Hierbei handelt es sich um ein Ionen-Mobilitäts-Spektrometer mit nicht-radioaktiver Fotoionisierung, gepulster UV-Ionenquelle und einer automatischen chemischen Kalibrierung. Mit diesem Gerät lassen sich militärische und industrielle Sprengstoffe sowie Selbstlaborate einschließlich Ammoniumnitrat, ANFO, Schwarzpulver, C-4, Sprengfolie, Sprengschnur, DNT, DMNB, Dynamit, EGDN, HMTD, HMX, Nitroglycerin (NG), o-MNT, p-MNT, Peroxyde, PETN, RDX, Semtex, Schießpulver (rauchschwach), Tetryl, Triacetone Triperoxyd (TATP), TNT, Urea Nitrate, aber auch Drogen wie Kokain, Heroin, Ketamine, L-Amphetamine, LSD, MDA, MDMA, Methamphetamine, Morphin, PCP und andere nachweisen. Die Wischprobennahme erfolgt manuell und ist in Abbildung 47 dargestellt. Am unteren rechten Rand ist jeweils die verstrichene Zeit von der Entnahme des Wischpads bis zur Anzeige des Alarms in Sekunden angegeben. Die zuvor ermittelten Nachweisgrenzen für dieses Gerät sind, in Abhängigkeit von der Beschaffenheit der Oberfläche, in Tabelle 9 angegeben.

Untergrund	Nachweisgrenze (POD $\geq$ 0,90) in Nanogramm [TNT/RDX]
Direktbeaufschlagung	0,3 / 1,0
Pappe	~100
Glas	~1
Kunststoff	~10
Metall	~1

**Tabelle 9 Ermittelte Nachweisgrenzen bei TNT und RDX fuer das ETD-Gerät QS-B220 von Implant Science Corporation.**

Da der verdächtige Gegenstand innerhalb des Industriesaugers lokalisiert wurde, erfolgt die Wischprobennahme an der Oberfläche des Saugers, ohne diesen zu öffnen. Anschließend wird das Wischpad in das Gerät zur Auswertung eingeführt und wenige Sekunden später wird ein Alarm, aufgrund detektierter Spuren von TNT und RDX angezeigt.

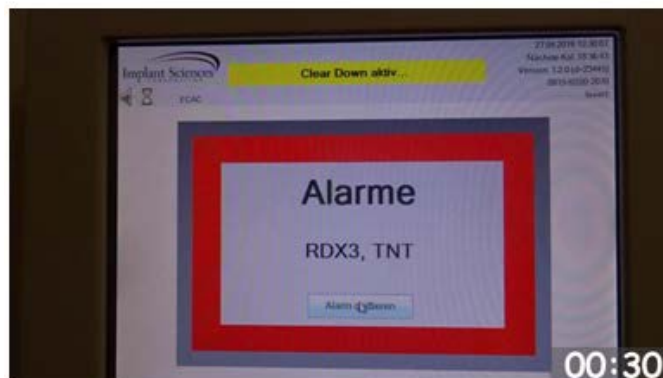


Abbildung 47 Wischprobennahme am Industriesauger



## **Sichere Luftfracht-Transportkette:**

Konzepte, Strategien und Technologien für sichere und effiziente Luftfracht-Transportketten

gefördert von:



Die Demonstration des neu entwickelten mehrstufigen Hochenergie-Durchstrahlungskonzeptes adressiert die im Projekt identifizierten Optimierungsbedarfe. Das gezeigte Verfahren kombiniert die Vorteile eines Totalscans mit denen des detaillierteren Einblicks in ausgewählte Bereiche im Einzelbild, welches in dieser Form auf dem Markt noch nicht zur Verfügung steht. Die Verwendung von Hochenergie und die Gewinnung von zusätzlicher 3D-Information können die hauptsächlichen Probleme bei der Anwendung von herkömmlichen Durchstrahlungsverfahren, wie mangelnde Durchdringungsfähigkeit und die erschwerte Interpretation der Durchstrahlungsaufnahmen bei hoher Komplexität des Bildinhaltes, umgehen. Mit dieser Methode nicht zu klärende Verdachtsmomente werden mit der anschließenden Spurendetektion aufgelöst.

### **2. Darstellung der wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises**

Siehe Anlage.

### **3. Darstellung der Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit**

Das Projekt SiLuFra zielte auf eine Erhöhung der Sicherheit im Luftverkehr bei gleichzeitiger Steigerung oder zumindest dem Erhalt der derzeitigen wirtschaftlichen Effizienz. Die Erstellung eines High-Level-Metamodells der gesamten Luftfrachtkette und darauf aufbauend die Erarbeitung von Lösungsspezifikationen unter Einbeziehung aller an der Luftfracht-Transportkette beteiligten Akteure kann zu einer deutlichen Verbesserung der Sicherheit im Luftverkehr beitragen. Es wurden sowohl Organisation und Ablauf der Frachtkette, als auch Personaleinsatz und verwendete Technologien adressiert und auf Optimierungsmöglichkeiten hin untersucht. Der Schwerpunkt lag dabei auf der Praxistauglichkeit, Prozesseffizienz und Wirtschaftlichkeit der erarbeiteten Lösungen. Erstmals wurde ein Gesamtansatz mit einer dokumentierten Metaebene erarbeitet, welcher Sicherheitsrisiken detailliert beschreibt und die Umsetzbarkeit und Wirksamkeit der Regularien genau untersucht.

Entsprechend der in Abschnitt II.1. beschriebenen, durch die BAM erarbeiteten Projektinhalte wurden einerseits ein neues und innovatives mehrstufiges Durchstrahlungskonzept mit anschließender Gefahrstoffdetektion entworfen, welches die Manipulationssicherheit der Luftfracht deutlich erhöhen, bzw. eine kostenintensive manuelle Inspektion der Luftfracht vermeiden kann. Die identifizierten Bedarfe und Optimierungsmöglichkeiten für Durchstrahlungsverfahren und der dazu orthogonale Methoden wurden identifiziert. Ein im Projekt neu entwickelter Testkörper zur besseren Charakterisierung der Leistungsfähigkeit am Markt erhältlicher Scannersysteme 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.





## **Sichere Luftfracht-Transportkette:**

Konzepte, Strategien und Technologien für sichere und effiziente Luftfracht-Transportketten

gefördert von:



### **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 SiLuFra 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 SiLuFra wird dazu beitragen.

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**

Die im Rahmen des Projektes erfolgten Veröffentlichungen und öffentlichen Darstellungen der Arbeiten und Ergebnisse der Projektarbeiten 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

„Röntgenrückstreu-Radiographie zur Detektion von Gefahrstoffen für die Luftfahrtsicherheit“, N. Wrobel, S. Kolkoori, U. Zscherpel, U. Ewert, Proceedings DACH Jahrestagung 2015





## Sichere Luftfracht-Transportkette:

Konzepte, Strategien und Technologien für sichere und effiziente Luftfracht-Transportketten

gefördert von:



„Dual Energy Hochenergieradiographie für die Materialdiskriminierung in Cargo-Containern: Von der Forschung zur Anwendung“, S. Kolkoori, N. Wrobel, A. Deresch, B. Redmer, U. Ewert, DGZfP-Jahrestagung 2014

“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

Erstellung der Projekt-Webseite und fortlaufende Aktualisierung  
→ <http://www.silufra.de>

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 11. ECNDT (European Conference on Non-Destructive Testing) vom 5.10.2014 – 10.10.2014

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

Teilnahme DACH Jahrestagung (Konferenz der deutschsprachigen Gesellschaften für zerstörungsfreie Prüfung (DGZfP, ÖGZfP, SGZfP) vom 10.5.2015 – 13.5.2015 in Salzburg

Teilnahme an den 8. Luftsicherheitstagen des BDSW, Potsdam, 17.-18.2.2016

SiLuFra-Konferenz am 5.7.2016 in Berlin



## Literaturverzeichnis

1. **Bellon, C. and Jaenisch, G.R.** aRTist –analytical RT inspection simulation tool. *C Bellon, G R Jaenisch, 'aRTist –analytical RT inspectiProceedings of International Symposium on Digital Industrial Radiology and Computed Tomography.* 2007.
2. **Kolkoori, S. and Jaenisch, G.R., Deresch, A.** Influence of Scattered Radiation on the Efficiency of Dual-High Energy X-Ray Imaging for Material Characterization. *19th World Conference on Nondestructive Testing.* 2016.
3. **J. Köhler, R. Meyer.** *Explosivstoffe.* Weinheim : Wiley-VCH Verlag, 1998.
4. **Kolla, P.** Anwendung analytischer Verfahren zur Detektion versteckter Sprengstoffe - das Aufspüren von Sprengvorrichtungen. *ngewandte Chemie.* 1997, 109, p. 828.
5. **Leiber, C.-O.** Sprengstoffe. *RÖMPP Online-Version.* 2014.
6. **Justiz, Bundesministerium der.** *Gesetz über explosionsgefährliche Stoffe - Sprengstoffgesetz - SprengG.* 2013.
7. **Leiber, C.-O.** Initialsprengstoffe. *RÖMPP Online.* 2014.
8. **Corporation, Homeland Security Research.** *Container / Vehicle Screening - Product Comparison Report Homeland Security Product Comparison Service.* 2004. HPC-120505-02, 1-221.
9. **Leiber, C.-O.** Pyrotechnische Erzeugnisse. *RÖMPP Online-Version.* 2014.
10. **U. Krone, R. Lancaster.** *Pyrotechnics Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry.* 2000.
11. **Kolla, P.** Zündmittel. *RÖMPP Online-Version.* 2014.
12. **Leiber, C. O.** Schießstoffe. *RÖMPP Online-Version.* 2014.
13. **Preuß, T.** *Sprengstoffe und Sprengstoffanschläge.* Stuttgart : Richard Boorberg Verlag GmbH & Co KG, 2012.
14. **Akhavan, J.** *The Chemistry of Explosives.* Cambridge, UK : Royal Society of Chemistry, 2004.



## Sichere Luftfracht-Transportkette:

Konzepte, Strategien und Technologien für sichere und effiziente Luftfracht-Transportketten

gefördert von:



15. **R. J. Harper, J. R. Almirall, K. G. Furton.** Identification of dominant odor chemicals emanating from explosives for use in developing optimal training aid combinations and mimics for canine detection. *Talanta*. 67, 2005, pp. 313-327.
16. **Corporation, Homeland Security Research.** *Container / Vehicle Screening - Product Comparison Report Homeland Security Product Comparison Service*. 2004. pp. 1-221. HPC-120505-02.
17. **Moore, D. S.** Instrumentation for trace detection of high explosives. *Review of Scientific Instruments*. 75, 2004, pp. 2499-2512.
18. **G. A. Eiceman, D. Preston, G. Tiano, J. Rodriguez, J. E. Parmeter.** Quantitative calibration of vapor levels of TNT, RDX, and PETN using a diffusion generator with gravimetry and ion mobility spectrometry. *Talanta*. 45, 1997, pp. 57-74.
19. **R. G. Ewing, D. A. Atkinson, G. A. Eiceman, G. J. Ewing.** A critical review of ion mobility spectrometry for the detection of explosives and explosive related compounds. *Talanta*. 54, 2001, pp. 515-529.
20. **G. B. Smith, G. A. Eiceman, M. K. Walsh, S. A. Critz, E. Andazola, E. Ortega, F. Cadena.** Detection of Salmonella typhimurium by hand-held ion mobility spectrometer: A quantitative assessment of response characteristics. *Field Analytical Chemistry and Technology*. 1, 1997, pp. 213-226.
21. **Moore, R. S.** Review of recent tevatron operations. *Ieee Particle Accelerator Conference*. 2007, Vols. 1-11, pp. 2562-2564.
22. **3518-1:2011-05, VDI/VDE.** *Multigassensoren - Begriffe, Aufbau und Arbeitsweise, Klassifizierung*.
23. **S. Ramin, M. G. Weller.** Extremely sensitive and selective antibodies against the explosive 2,4,6-trinitrotoluene by rational design of a structurally optimized hapten. *Journal of Molecular Recognition*. 25, 2012, pp. 89-97.
24. **Kolla, P.** DETECTING HIDDEN EXPLOSIVES. *Analytical Chemistry*. 67, 1995, pp. A184-A189.
25. **Lovelock, J. E.** Electron-Capture Detector - Theory and Practice. *Journal of Chromatography*. 99, 1974, pp. 3-12.
26. [http://www.morpho.com/IMG/pdf/Morpho\\_Hardened\\_MobileTrace\\_Med-2.pdf](http://www.morpho.com/IMG/pdf/Morpho_Hardened_MobileTrace_Med-2.pdf).
27. [http://www.morpho.com/IMG/pdf/Morpho\\_Itemiser\\_DX.pdf](http://www.morpho.com/IMG/pdf/Morpho_Itemiser_DX.pdf).



## Sichere Luftfracht-Transportkette:

Konzepte, Strategien und Technologien für sichere und effiziente Luftfracht-Transportketten

gefördert von:



28. [http://www.morpho.com/IMG/pdf/Morpho\\_Itemiser\\_3\\_Enhanced\\_DAT.pdf](http://www.morpho.com/IMG/pdf/Morpho_Itemiser_3_Enhanced_DAT.pdf).
29. [http://www.morpho.com/IMG/pdf/Morpho\\_MobileTrace.pdf](http://www.morpho.com/IMG/pdf/Morpho_MobileTrace.pdf).
30. [http://www.morpho.com/IMG/pdf/Morpho\\_MobileTrace\\_Explosives.pdf](http://www.morpho.com/IMG/pdf/Morpho_MobileTrace_Explosives.pdf).
31. [http://www.morpho.com/IMG/pdf/Morpho\\_MobileTrace\\_Narcotics.pdf](http://www.morpho.com/IMG/pdf/Morpho_MobileTrace_Narcotics.pdf).
32. Thermo Fisher Scientific Inc., *EGIS Defender Technical Information 2010*.
33. <http://a-clear.com/en/products-page/trace-detection-scintrex/e5000-series-trace-detectors>.
34. <http://a-clear.com/en/products-page/trace-detection-scintrex/n2200-trace-detecto>.
35. <http://a-clear.com/en/products-page/trace-detection-scintrex/en3300-trace-detector>.
36. <http://www.bruker.com/products/cbrne-detection/ims/raid-afm/overview.html>.
37. <http://www.bruker.com/products/cbrne-detection/ims/raid-m100/overview.html>.
38. <http://www.bruker.com/products/cbrne-detection/ims/raid-s2/overview.html>.
39. <http://www.bruker.com/products/cbrne-detection/ims/raid-xp/overview.html>.
40. <http://d-tec-system.de/p/de-appl-explosives-narcotics-trace-detection-3.html>.
41. <http://www.smithdetection.com>.
42. <http://www.airsense.com/de/produkte/gda-explosives>.
43. <http://www.bruker.com/de/products/mobile-detection/elisa.html>.
44. <http://www.chem.agilent.com/en-US/products-services/Instruments-Systems/Gas-Chromatography/Nitrogen-Chemiluminescence-Detector/Pages/default.aspx>.
45. <http://a-clear.com/en/products-page/trace-detection-scintrex/e4500-trace-detector>.



## Sichere Luftfracht-Transportkette:

Konzepte, Strategien und Technologien für sichere und effiziente Luftfracht-Transportketten

gefördert von:



46. <http://www.thermoscientific.com/en/product/egis-iii-explosives-detection-system.html>.
47. <http://a-clear.com/en/products-page/trace-detection-scintrex/e3500-trace-detector>.
48. <http://gs.flir.com/griffin-824>.
49. <http://www.bruker.com/products/cbrne-detection/ft-ir/mobile-ir/overview.html>.
50. <http://www.bruker.com/de/products/cbrne-detection/ft-ir/rapidplus-rapid-vom/overview.html>.
51. <http://www.bruker.com/products/cbrne-detection/ft-ir/sigis-ii/overview.html>.
52. <http://www.rsdynamics.com>.
53. <http://a-clear.com/en/products-page/trace-detection-scintrex/evd-3000-trace-detector>.
54. <http://www.mistralsecurityinc.com/Our-Products/Explosive-Detection-and-Identification-Field-Test-Kits/Expray>.
55. [http://www.morpho.com/IMG/pdf/Morpho\\_StreetLab\\_Mobile\\_DAT.pdf](http://www.morpho.com/IMG/pdf/Morpho_StreetLab_Mobile_DAT.pdf).
56. <http://gs.flir.com/products/icx-detection/explosives/fido-nxt/>.
- 57.
58. <http://gs.flir.com/detection/explosives/fido>.
59. **Danzer, K.** *Analytical Chemistry - Theoretical and Metrological Fundamentals*. Berlin-Heidelberg : Springer-Verlag, 2007.
60. **Rijsbergen, C. J. van.** *Information Retrieval*. London : Butterworths, 1979.
61. **30, ISO Guide.** *Terms and definitions used in connection with reference materials*. 1992.
62. **98-3, ISO/IEC Guide.** *Uncertainty of measurement - Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement*. 2008.
63. **99, ISO/IEC GUIDE.** *International vocabulary of metrology — Basic and general concepts and associated terms (VIM) International vocabulary of metrology — Basic and general concepts and associated terms (VIM)*. 2007.





## Sichere Luftfracht-Transportkette:

Konzepte, Strategien und Technologien für sichere und effiziente Luftfracht-Transportketten

gefördert von:



64. **(PTB), Physikalisch-Technische Bundesanstalt.** Das Internationale Einheitensystem (SI) Amts- und Mitteilungsblatt der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt. 117, 2007, pp. 1-39.

65. **32, ISO Guide.** *Calibration in analytical chemistry and use of certified reference materials.* 1997.

66. <http://www.lac.tu-clausthal.de/arbeitsgruppen/angewandte-photonik-lac/projekte/evaneszenzfeldsensor-fuer-die-detektion-von-explosivstoffen/>.