Hochschule Bonn-Rhein-Sieg
University of Applied Sciences

Institut für Detektionstechnologien

Institut für Sicherheitsforschung

VESPER^{PLUS}

Berichte

Verbesserung der Sicherheit von Personen in der Fährschifffahrt (VESPER^{Plus})

Teilvorhaben: „Detektionstechnologien im Hafen und an Bord" (Förderkennzeichen 13N11924)

Zeitraum: Sep. 2011- Aug. 2014

1. **Berichtsblatt deutsch**
2. **Berichtsblatt englisch**
3. **Abschlussbericht (öffentlich) inkl. Anhänge**

Ansprechpartner
Prof. Dr. Peter Kaul
Hochschule Bonn-Rhein-Sieg
Institut für Detektionstechnologien
Institut für Sicherheitsforschung
Von-Liebig-Str. 20
53359 Rheinbach
Tel: +49 2241 865-515
E-Mail: peter.kaul@h-brs.de

GEFÖRDERT VOM
Bundesministerium für Bildung und Forschung

Autoren: Christopher Becher, Johannes Warmer, Peter Kaul

Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN geplant	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Schlussbericht

3. Titel
Verbesserung der Sicherheit von Personen in der Fährschifffahrt (VESPER^{Plus})

Teilvorhaben: „Detektionstechnologien im Hafen und an Bord"

4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)]
Kaul, Peter
Becher, Christopher
Warmer, Johannes

5. Abschlussdatum des Vorhabens
August 2014

6. Veröffentlichungsdatum
28. Februar 2015

7. Form der Publikation
Schlussbericht

8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse)

Hochschule Bonn-Rhein-Sieg
Grantham Allee 20
53757 Sankt Augustin

Institut für Detektionstechnologien
Institut für Sicherheitsforschung
Von-Liebig-Str. 20
53359 Rheinbach

9. Ber. Nr. Durchführende Institution

10. Förderkennzeichen
13N11924

11. Seitenzahl
291

12. Fördernde Institution (Name, Adresse)

Bundesministerium für
Bildung und Forschung (BMBF)
53170 Bonn

13. Literaturangaben
90

14. Tabellen
26

15. Abbildungen
226

16. Zusätzliche Angaben

17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum)

18. Kurzfassung

Explosivstoffe werden bei terroristischen oder kriminellen Taten häufig in unkonventionellen Spreng- und Brandvorrichtungen (USBV) eingesetzt, um einen möglichst großen Schaden mit vielen Toten und Verletzten oder große Zerstörung von meist öffentlichen Infrastrukturen von gesellschaftlicher, wirtschaftlicher oder symbolischer Bedeutung zu erreichen. Eine frühzeitige Erkennung und eine sichere Einschätzung einer Gefahrenlage ist einer der wesentlichen Schritte bei der Bekämpfung eines USBV und gleichzeitig einer der gefährlichsten für die eingesetzten Sicherheitskräfte.

Die Fährschifffahrt ist mit jährlich rund 16 Millionen Passagieren ein wichtiger Bestandteil des öffentlichen Verkehrssystems. Ziel des Projekts VESPER^{PLUS} war es, Sicherheitsmodelle zu entwerfen, die sich in bestehende Prozesse im Hafen und auf der Fähre integrieren lassen, ohne gravierende Störungen der logistischen Prozesse oder Belästigung der Passagiere hervorzurufen. Der Fokus der Arbeiten lag im Bereich des Fährbetriebs im Seeverkehr auf sogenannten RoRo-Fähren ("Roll-on/Roll-off"), auf denen Fahrzeuge und bewegliche Güter verladen sowie Passagiere transportiert werden.

Eine der Hauptaufgaben von VESPER^{PLUS} war es, eine Harmonisierung und Optimierung der Sicherheitsstrukturen von Schiff, Hafenanlage und Gesamthafen zu erarbeiten, wobei ein Schwerpunkt auf den Kommunikationsprozessen lag. Aufgaben der Hochschule Bonn-Rhein-Sieg in diesem Projekt waren Integration und Einsatztest von Detektionstechnologien in die Sicherheitsarchitektur von Hafen und Schiff. Das Augenmerk lag auf der Nutzung der Systeme im Falle einer Erhöhung der Gefahrstufe aufgrund sicherheitsrelevanter Ereignisse, die den Hafen bzw. das Schiff betreffen können. Der Schlussbericht beinhaltet die Ergebnisse zu den folgenden Arbeitsschwerpunkten:

Im Hafenbereich:
- Verfahren zur Detektion von Explosivstoffspuren im Rahmen von Fahrzeug- und Personenkontrollen
- Verifizierung/Identifizierung von Gefahrgütern
- Detektion von Leckagen
- Untersuchung von Gepäck mittels bildgebender Radartechnologie

Auf der Fähre:
- Frühzeitige Erkennung und Lokalisierung von Bränden und austretender flüchtiger Gefahrstoffe auf Fährdecks
- Entwicklung und Evaluation eines linearen Brandmelders zum Einsatz auf Fährdecks
- Unterstützung des Personals bei der Gefahrenabwehr bei Leckage von Transportgütern
- Entwicklung und Evaluation eines Verfahrens zur Detektion von Raum-untypischen Emissionen

19. Schlagwörter

Roll-on-Roll-off-Schiffe (RoRo), zivile Schifffahrt, Zugangskontrollen, International Ship and Port Facility Security Code (ISPS, Verordnung (EG) Nr. 725/2004), Maritime Security, Sensorik, terroristische Bedrohung, Gefahrstoffe, Detektionssysteme, Explosivstoffe, USBV, Multisensorsysteme, linearer Brandmelder, bildgebendes Radarsystem, Gepäckkontrolle, TATP, Hafenkontrolle

20. Verlag	21. Preis

Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN Planed	2. type of document (e.g. report, publication) Final report
3. title Verbesserung der Sicherheit von Personen in der Fährschifffahrt (VESPER^{Plus}) Improvement of Security for the passenger transport on ships (VESPER^{Plus}) Teilvorhaben: „Detektionstechnologien im Hafen und an Bord" General proposal part „Detection Technologies in Harbors and on Ships”	
4. author(s) (family name, first name(s)) Kaul, Peter Becher, Christopher Warmer, Johannes	5. end of project August 2014 6. publication date 28th of February 2015 7. form of publication Final report
8. performing organization(s) (name, address) Bonn-Rhein-Sieg University of Applied Sciences Grantham Allee 20 53757 Sankt Augustin Institute for Detection Technologies Institute for Safety and Security Research Von-Liebig-Str. 20 53359 Rheinbach	9. originator’s report no. 10. reference no. 13N11924 11. no. of pages 291
12. sponsoring agency (name, address) Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn	13. no. of references 90 14. no. of tables 26 15. no. of figures 226
16. supplementary notes	
17. presented at (title, place, date)	

18. abstract

If Explosives used within terroristic attacks they are most often realized as Improvised Explosive Devices (IED's). Terrorists try to try to gain a huge damage including a large number of injured or dead people as well as destruction of public - infrastructures of societal, economic or symbolic importance. An early detection and a sure situational awareness are the most important steps toward countering the IED and at the same time the most dangerous for the security personnel.

Ferries are one major element in the public transport sector having around 16 million passengers per year. Aim of the project VESPER^{PLUS} was the development of safety models which can be adapted into security processes of harbors and ferries without creating a severe obstruction of the logistic processes and annoyance of the customers. Especially RoRo ("Roll-on/Roll-off") ferries were in the focus of the project because they transport vehicles, movables, and passengers.

The overall goal in VESPER^{PLUS} was the harmonization and optimization of security structures of ships and harbor areas concerning communication processes. The Bonn-Rhein-Sieg University worked on the integration and evaluation of detection technologies in the security structure and processes of harbors and ships. One important question was the impact of those technologies in case of incrementing the security level due to a possible (terroristic) threat. The final report contains the results according to the following items:

For the harbor:

- Procedures for the detection of explosive traces during vehicle and passenger controls,
- Verification and identification of dangerous goods
- Detection of leakages
- RADAR based imaging for luggage inspection

For the ferries

- Early detection and localization of fires and leaks of volatile dangerous goods on ferry decks
- Development and evaluation of a linear fire detector for ferry decks
- Support of ship's crew averting a danger coming from leakages of transport goods
- Development and evaluation of a system for the detection of untypical fumes in closed ship rooms

19. keywords
Roll-on-Roll-off ships (RoRo), civil shipping, access control, International Ship and Port Facility Security Code (ISPS, regulation (EG) Nr. 725/2004), Maritime Security, sensor systems, terroristic threat, dangerous goods, detection systems, explosives, IED, multi-sensor systems, linear fire detector, imaging RADAR system, luggage control, TATP, harbor control

20. publisher	21. price

Hochschule Bonn-Rhein-Sieg
University of Applied Sciences

Institut für Detektionstechnologien

Institut für Sicherheitsforschung

Abschlussbericht

zum Verbundprojekt

Verbesserung der Sicherheit von Personen in der Fährschifffahrt (VESPER^{Plus})

Teilvorhaben: „Detektionstechnologien im Hafen und an Bord" (Förderkennzeichen 13N11924)

Zeitraum: Sep. 2011- Aug. 2014

Ansprechpartner
Prof. Dr. Peter Kaul
Hochschule Bonn-Rhein-Sieg
Institut für Detektionstechnologien
Institut für Sicherheitsforschung
Von-Liebig-Str. 20
53359 Rheinbach
Tel: +49 2241 865-515
E-Mail: peter.kaul@h-brs.de

Inhaltsverzeichnis

I. Aufgabenstellung und Projektdurchführung 3
I.1 Aufgabenstellung 3
I.1.1 Ziele 3
I.1.2 Ziele des Teilprojektes DeHaBo 5
I.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde 6
I.2.1 Motivation 6
I.2.2 Institut für Detektionstechnologien, Institut für Sicherheitsforschung 7
I.3 Planung und Ablauf des Vorhabens 7
I.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand 8
I.4.1 Detektoren zur Explosivstoffsensorik 9
I.4.2 Detektion von Gefahrstoffleckagen und Identifizierung von Gefahrgütern 14
I.4.3 Sensorsysteme zum Nachweis von TATP und Präkursorsubstanzen 16
I.4.4 Bildgebende Radarverfahren und Materialklassifizierungen 21
I.4.5 Lineare Brandmeldesysteme 22
I.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen 25
II. Projektergebnisse und Verwertung 26
II.1 Ergebnisse im Projekt DeHaBo 26
II.2 Die wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises 46
II.3 Verwertung 46
II.4 Notwendigkeit der Förderung 47
II.5 Fortschritte auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen 47
II.6 Veröffentlichungen im Rahmen des Projektes 48
II.7 Literatur 49

I. Aufgabenstellung und Projektdurchführung

I.1 Aufgabenstellung

Aufgrund der signifikant veränderten Sicherheitslage in der Bundesrepublik Deutschland ist es von besonderer Bedeutung, die bestehende Sicherheitsarchitektur des maritimen Verkehrssystems von Schiff und Hafen so zu optimieren, dass die Funktions- und Leistungsfähigkeit sowie die Wirtschaftlichkeit aller an der Fährschifffahrt beteiligten Unternehmen jederzeit, unter möglichst allen Umgebungsbedingungen langfristig gewährleistet ist.

Mit den Bearbeitungsschwerpunkten hat das Projekt VESPER^{Plus} substantielle Beiträge zur Optimierung der bestehenden Sicherheitsarchitektur geliefert, die auch in Zeiten erhöhter Gefährdung adäquate Sicherheitsstandards im Fährverkehr gewährleisten kann.

I.1.1 Ziele

Ziel des Gesamtprojekts VESPER^{Plus} ist es, Sicherheitsmodelle zu entwerfen, die sich in bestehende Prozesse im Hafen und auf der Fähre integrieren lassen, ohne gravierende Störungen in den Alltagsabläufen hervorzurufen. Der Fokus der Arbeiten liegt im Bereich des Fährbetriebs im Seeverkehr und betrifft sogenannte RoRo-Fähren ("Roll-on/Roll-off"), auf denen Fahrzeuge und bewegliche Güter verladen sowie Passagiere transportiert werden. Eine der Hauptaufgaben von VESPER^{Plus} ist es, eine Harmonisierung und Optimierung der Sicherheitsstrukturen von Schiff, Hafenanlage und Gesamthafen zu erarbeiten, wobei ein Schwerpunkt auf den Kommunikationsprozessen liegt.

Die Hauptarbeitspakete der Hochschule Bonn-Rhein-Sieg lagen in diesem Projekt auf der Technologieintegration. Zu den anderen Zielen wurden in der Projektphase Beiträge erarbeitet und an die verschiedenen Projektpartner weiter geleitet. Detaillierte Informationen finden sich im Anhang in der Gesamtbeschreibung der Projektergebnisse.

Harmonisierung und Optimierung der Sicherheitsstrukturen

Das vorhandene Kooperationsnetzwerk im Bereich "Maritime Security" soll hinsichtlich seiner Aufbau- und Ablaufstruktur mit all seinen Komponenten (behördliche Einrichtungen, Hafenbetreiber, Reedereien usw.) untersucht und optimiert werden, so dass eine effiziente Kooperation und schnittstellenübergreifende Kommunikation in-

volvierter Stellen gewährleistet werden kann und damit auch ein Höchstmaß an Sicherheit in zeitkritischen Situationen. Damit verbunden ist die Möglichkeit, verschärfte Sicherheitsmaßnahmen über einen längeren Zeitraum aufrechterhalten zu können.

Technologieintegration zur Gefahrstoffkontrolle

Landseitig soll die Wirkung und Zuverlässigkeit von bisher stichprobenartigen Kontrollen von Fahrzeugen erhöht werden, indem neben der Integration von Technologien zur Gefahrstoffkontrolle (z.B. zur Detektion von Explosivstoffen oder anderen Gefahrstoffen, Machbarkeitsuntersuchungen für undeklariertes Gefahrgut) Merkmale identifiziert werden, welche auf verdächtige Fahrzeuge schließen lassen. Bordseitig soll ein Erkennen des Vorkommens gefährlicher Gase und Dämpfe auf Fahrzeugdecks und von untypischen Gasen in geschlossenen Räumen (z.B. von Präkursorsubstanzen, die beim Bau von Sprengsätzen verwendet werden) über entsprechende Überwachungseinrichtungen beschleunigt bzw. ermöglicht werden. Zudem soll die Sicherheit an Bord über Untersuchungen des Umgangs mit bordeigenen gefährlichen Betriebsstoffen erhöht werden. Es sind Wirksamkeitsanalysen vorhandener Brandmeldesysteme durchzuführen und die Integration ortsaufgelöster Brandmeldesysteme ist zu prüfen.

Entscheidungsunterstützung an Bord

Der im Vorläuferprojekt VESPER (Verbesserung der Sicherheit von Personen in der Fährschifffahrt) erarbeitete Demonstrator eines Entscheidungsunterstützungssystems für Fährschiffe soll für einen Einsatz zu Trainingszwecken (z.B. über Szenarien-Simulationen) angepasst bzw. erweitert werden.

Begleitforschung

Die Ziele der begleitenden Forschung werden drei Schwerpunkten zugeordnet:

- Menschliches Verhalten: Untersuchungen bezüglich des Verhaltens von Angreifern und Angegriffenen sollen zur Identifizierung deeskalierender Verhaltensstrategien für Gefahrensituationen führen.
- Aus- und Weiterbildung sowie Schulung und Training: Ein zu erarbeitendes Konzept für die Bereiche „Aus- und Weiterbildung“ sowie „Schulung und Training“, modular und den IMO-Anforderungen (IMO International Maritime Organisation) entsprechend gestaltet, soll eine den vorhandenen Kompetenzen gerecht werdende Kooperation von Akteuren in Krisensituationen ermögli-

chen.

- Gesellschaftliche und wirtschaftliche Auswirkungen: Szenarien-orientiert sollen auch gesellschaftliche und wirtschaftliche Auswirkungen untersucht werden, wobei der Fokus auf Auswirkungen derzeit vorhandener Konzepte und Maßnahmen, basierend auf Ergebnissen anderer Arbeitsdomänen und bisheriger Arbeiten, liegt.

I.1.2 Ziele des Teilprojektes DeHaBo

Die Verwendung von Explosivstoffen bei terroristischen oder kriminellen Taten birgt ein hohes Risiko für Mensch und Umwelt. Häufig werden sie in unkonventionellen Spreng- und Brandvorrichtungen (USBV) eingesetzt, um einen möglichst großen Schaden mit vielen Toten und Verletzten oder große Zerstörung von meist öffentlichen bzw. schützenswerten Infrastrukturen zu erreichen. Eine frühzeitige Erkennung und eine sichere Einschätzung einer Gefahrenlage ist einer der wesentlichen Schritte bei der Bekämpfung eines USBV und gleichzeitig einer der gefährlichsten für die eingesetzten Sicherheitskräfte.

Vor diesem Hintergrund ist die Hochschule Bonn Rhein Sieg mit den beiden Instituten Institut für Sicherheitsforschung (ISF) und Institut für Detektionstechnologien (IDT) mit dem Teilvorhaben „Detektionstechnologien im Hafen und an Bord - DeHaBo" in das das Projekt VESPER^{Plus} eingebunden.

Aufgabe der Hochschule Bonn-Rhein-Sieg in diesem Projekt ist die Integration und der Einsatztest von Detektionstechnologien in die Sicherheitsarchitektur von Hafen und Schiff. Dies umfasst im Einzelnen:

- Detektion von Explosivstoffspuren im Rahmen von Fahrzeug- und Personenkontrollen,
- Verifizierung/Identifizierung von Gefahrgütern,
- Detektion von Leckagen,
- Untersuchung von Gepäckstücken mittels Radartechnologie,
- Multisensorsysteme zur frühzeitigen Erkennung und Lokalisierung von Bränden,
- Unterstützung des Personals bei der Gefahrenabwehr bei Leckage von Transportgütern,
- Entwicklung eines miniaturisierten Sensorsystems zur Detektion von ortsuntypischen Gasen, die bei der Herstellung von Selbstlaboraten auftret.

Detaillierte Informationen zu diesen Arbeiten und zu den Ergebnissen können dem Anhang mit den technischen und wissenschaftlichen Ergebnissen entnommen werden.

I.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

I.2.1 Motivation

Seit Inkrafttreten des ISPS-Codes (International Ship and Port Facility Security Code) [ISPS2004] im Jahr 2004 hat sich die Sicherheitslage sowohl im internationalen als auch im nationalen Rahmen verändert. Auf Grundlage aktueller Sicherheitsbewertungen gehen die zuständigen Behörden von einer hohen abstrakten Gefährdungslage für Deutschland und Europa aus. Aus diesem Grund muss mit Erhöhungen der ISPS-Gefahrenstufe für Hafenanlagen und Schiffe gerechnet werden. Die Behörden gehen weiterhin davon aus, dass es sich hierbei nicht mehr, wie ursprünglich angenommen, nur um kurze Zeiträume handeln wird, sondern verschärfte Maßnahmen auch über längere Zeiträume aufrecht erhalten werden müssen. Dies wird durch die Stellungnahme des Bundesinnenministers zur aktuellen Gefährdungslage vom 17.11.2010 belegt [BMI2010]. Diese veränderte Ausgangssituation verlangt eine Sicherheitsarchitektur, welche eine effiziente und effektive Funktions- und Leistungsfähigkeit des Fährverkehrs auch bei erhöhten Sicherheitsmaßnahmen gewährleistet.

Die Fährschifffahrt auf der Ostsee nimmt eine Sonderstellung in Bezug auf die Umsetzung von Vorgaben des ISPS-Codes ein, da die meisten Fährlinien im Sinne eines Brückenersatzverkehrs in Konkurrenz zum Landweg stehen. Herausforderungen betreffen hauptsächlich sowohl erhöhte Kosten als auch Verzögerungen in der Abfertigung aufgrund erhöhter Sicherheitserfordernisse. Dabei ist offensichtlich, dass die Einführung von Maßnahmen, wie sie im Personenflugverkehr oder der Kreuzschifffahrt vorhanden sind, für die Fährschifffahrt und die damit verbundenen Wirtschafts- und Industriezweigen zu einer immensen Störung und Schädigung führen würden.

Das Vorläuferprojekt VESPER hat sich während seiner dreijährigen Laufzeit (01.03.08 - 28.02.11) der Verbesserung der Sicherheit des internationalen Fährverkehrs zum Schutz vor terroristischen Bedrohungen gewidmet. Der Schwerpunkt lag dabei auf den Vorgaben des ISPS-Codes und somit einzelnen Hafenanlagen und Fährschiffen.

Das VESPER-Konsortium hat sich im laufenden Projekt unter anderem durch eine

enge Zusammenarbeit insbesondere mit den Bedarfsträgern (Reeder, Hafenbetreiber und Behörden) ausgezeichnet.

Aus der im Projekt VESPER erworbenen Expertise baut das Projekt VESPER^{Plus} auf, um vor allem auf organisatorisch höher geordneter Ebene zur Verbesserung der Sicherheitssituation in der Fährschifffahrt beizutragen.

I.2.2 Institut für Detektionstechnologien, Institut für Sicherheitsforschung

Die Hochschule Bonn-Rhein-Sieg betreibt bereits seit Jahren enge Kooperationen mit Partnern aus der Wirtschaft und Forschungseinrichtungen zur Verbesserung der Fachkompetenz und zur Gewährleistung einer modernen und bedarfsgerechten Ausbildung. Der Hochschule gelang es über die vergangenen Jahre exzellente Forschung insbesondere im Bereich der Sensorik, Analytik und Detektion von Explosivstoffen – hier besonders im Themenbereich der Erkennung von behelfsmäßigen Sprengvorrichtungen (Improvised Explosive Devices - IED) - zu betreiben; der Fokus richtete sich hierbei auf den Bereich chemischer Detektionstechnologien. Besonderes bei der Bewertung neuer Sensoren sowie der Entwicklung und Anwendung von Verfahren im Bereich der Spurenanalytik konnten spezifische Kernkompetenzen aufgebaut werden.

2010 hat die Hochschule die Einrichtung von Hochschulforschungsschwerpunkten (HFSP) beschlossen, die die Aktivitäten interdisziplinärer Forschungsgruppen in zukunftsweisenden Schwerpunktthemen mit hohem Innovationspotential und großer gesellschaftlicher und wissenschaftlicher Relevanz bündeln. Unter dem Dach des HFSP wurden die Institute für Sicherheitsforschung (ISF) mit den Schwerpunkten zivile Sicherheit, IT-Sicherheit, Maschinensicherheit und Lebensmittelsicherheit sowie das Institut für Detektionstechnologien (IDT) gegründet. Das IDT konnte zusätzlich mit einer forschungsorientierten EADS-Stiftungsprofessur ausgestattet werden.

Besonderes Potenzial hat sich das IDT im Bereich der Sensorik sowie der Spurenanalytik (Gasphase, Wischprobeneffizienz, Feststoffphase) aneignen können – Bereiche, die für die erfolgreiche Umsetzung des Vorhabens VESPER^{Plus} von entscheidender Bedeutung sind.

I.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Projekt konnte im Wesentlichen wie im Projektantrag geplant durchgeführt werden. Es kam zu einzelnen Verzögerungen in den Arbeitspaketen, die aber während

der Projektlaufzeit kompensiert werden konnten.

Zweimal jährlich fanden Workshops zur Vorstellung und Diskussion des Arbeitsstands der einzelnen Verbundpartner statt, an denen auch die assoziierten Partner teilnahmen. Darüber hinaus fanden Arbeitstreffen sowohl mit Verbund- als auch mit assoziierten Partnern statt.

Die unmittelbare Einbindung von Endnutzern (Hafenbetreiber, Reeder, Polizei, beauftragte Sicherheitsfirmen) und deren Beteiligung an Systementwicklung und -erprobung konnte durch gemeinsame Testmessungen an Bord und im Hafen sowie durch die Teilnahme an den Hafensicherheitsübungen erzielt werden. Tabelle 1 gibt einen Überblick über diese Aktivitäten. In allen Aktivitäten wurden die im Bericht genannten Detektionstechnologien eingesetzt und vorgeführt und unter Realbedingungen genutzt und bewertet. Auf den Hafensicherheitsübungen wurde darüber hinaus das Sicherheitspersonal der durch den Hafenbetreiber beauftragten Sicherheitsdienstleister geschult und mit der Handhabung der Geräte vertraut gemacht.

Tabelle 1: Auflistung der Hafensicherheitsübungen sowie Messkampagnen auf den Fähren zum Test der Detektionstechnologien unter Realbedingungen

Termin	**Art der Veranstaltung**
Mai 2012	Messkampagne 1 im Hafen Rostock
Juli 2012	Technikdemonstration bei VESPER^{Plus} Jahrestreffen
Aug. 2012	Messkampagne 2 im Hafen Rostock
Aug. 2012	Messkampagne auf der Fähre Mecklenburg-Vorpommern
Okt. 2012	Hafenübung Puttgarden
Juni 2013	Hafenübung Rostock
Juni 2013	Messkampagne auf der Fähre Transrussia
Mai 2014	Messkampagne auf der Fähre Nils-Holgersson

I.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand

Im Bereich der Fährschifffahrt werden bisher allenfalls im geringen Umfang technischen Detektionssysteme zur Detektion von Explosivstoffen, Gefahrstoffleckagen, verborgenen Gegenständen und zur Identifizierung von Gefahrgütern eingesetzt. Zur Detektion von Gefahrstoffen und explosionsgefährlichen Luft-Gasgemischen sind dies im Wesentlichen Gasmessröhrchen (z.B. Drägerröhrchen) oder mit elektrochemischen Zellen und Pellistoren bestückte mobile Gaswarnsysteme (z.B. X-AM 7000, Dräger). Im Bereich der Hafen-Zugangskontrolle sind Rollspiegel als einfachste optische Inspektionshilfe zur Kontrolle von Fahrzeugen auf versteckte Objekte im Ein-

satz. Zur Detektion von Bränden auf den Fähren werden überwiegend Punktmelder (Streumelder, Wärmemelder) und Flammenmelder (z.B. im Maschinenräumen) genutzt. Im Nachfolgenden wird mit Blick auf die im Projekt VESPER^{Plus} schwerpunktmäßig bearbeiteten Themen ein Überblick über bestehende Detektionsverfahren für Explosivstoffe, Gefahrstoffe und Brände gegeben.

I.4.1 Detektoren zur Explosivstoffsensorik

Bei der Detektion von Explosivstoffen ist das eigentliche Ziel festzustellen, ob sich eine gefährliche Menge Explosivstoff in einem Objekt (Gepäck, Frachtstück, Fahrzeug) oder an einer Person vorhanden ist bzw. Sicherheit bezüglich des Fehlens dieser Stoffe herzustellen. Es wird also nach einer nennenswerten Substanzmenge (Bulk) gesucht. Hierfür existiert eine Reihe von Verfahren, von denen die bekanntesten die auf Röntgenstrahlen basierenden, stationären Systeme z.B. an den Flughäfen sind. Weitere Verfahren nutzen die Neutronenaktivierungsspektroskopie oder die Kernspinresonanzspektroskopie [Manee2003, Lockw2003, Womble2001]. Diese Verfahren, die zur Detektion von Sprengstoffmassen („bulk-detection“) eingesetzt werden, weisen eine Reihe von Nachteilen auf. So ist keine chemische Identifizierung des Explosivstoffes möglich. Es können allenfalls Stoffeigenschaften wie z.B. die Unterscheidung zwischen metallisch/nichtmetallisch, der effektiven Kernladungszahl oder die elementare Zusammensetzung eines Stoffes festgestellt werden. Metallische Verpackungen verhindern bei den meisten Verfahren die Untersuchung des Inhaltes. Insgesamt ist die Rate an falsch-positiven Alarmen bei zumindest teilweise abgeschirmten Objekten hoch und macht eine weitere, zweitaufwändige Untersuchung per Hand notwendig. Darüber hinaus sind die dafür nötigen Systeme teuer, groß, stellen hohe Anforderungen an die Infrastruktur und verwenden häufig gesundheitsgefährliche Strahlungsarten (Röntgenstrahlung). Die Systeme sind jedoch dafür ausgelegt über eine lange Zeit eine große Zahl von Objekten zu untersuchen und es existiert ein Zertifizierungsverfahren mit entsprechenden Vorgaben.

Alternativ werden – insbesondere zur Untersuchung von Verdachtsfällen, oder Objekten die sich nicht durchleuchten lassen – Sprengstoffspurendetektoren eingesetzt. Auch hier existieren eine Vielzahl unterschiedlicher Systeme (Abbildung 1) [NIAG2005, Moore2005, Kolla1997, Gardn2004].

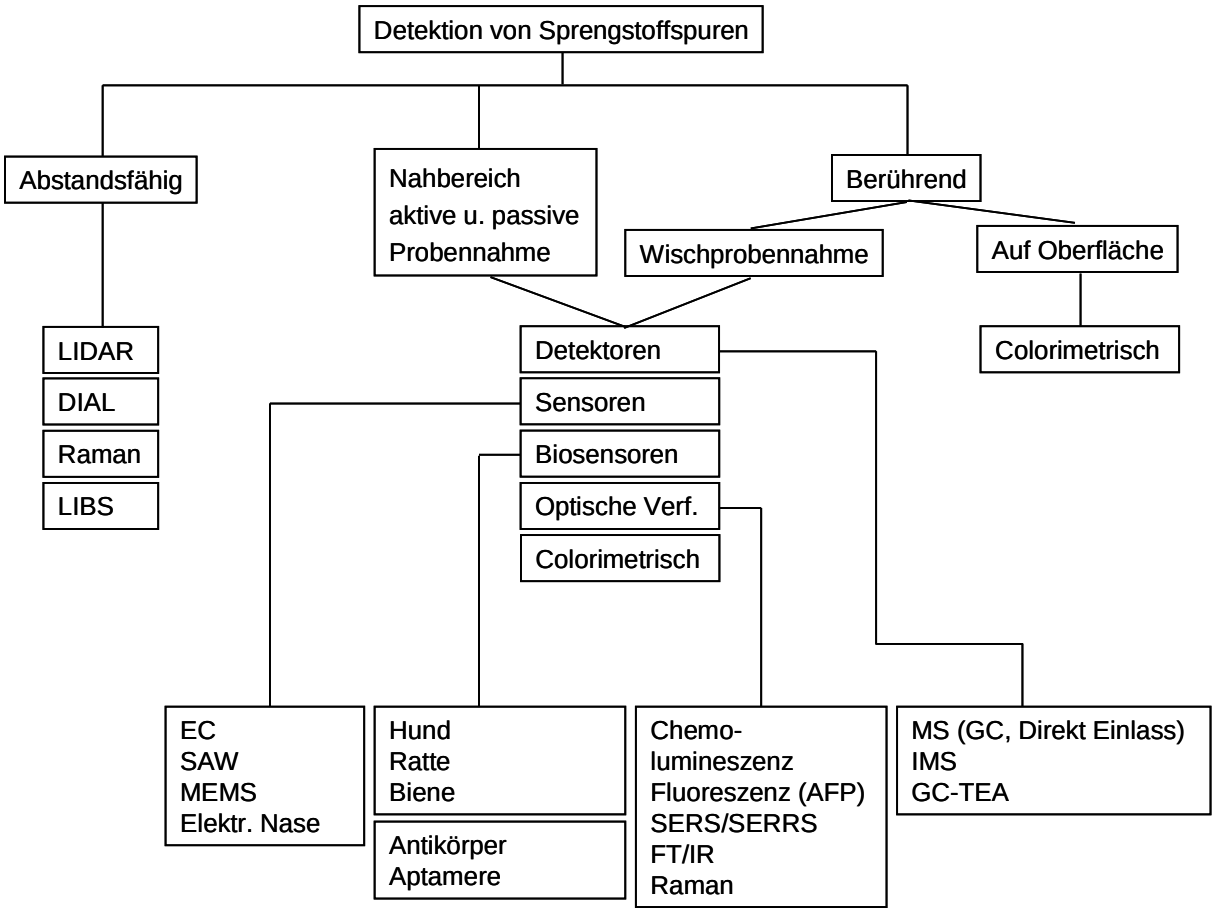


Abbildung 1: Übersicht über Verfahren zur Detektion von Explosivstoffspuren. LIDAR – light detection and ranging, DIAL – Differential absorption LIDAR, LIBS – Laser-induced breakdown spectroscopy, EC – Electrical conductivity, SAW – Surface acoustic wave, MEMS – Microelectromechanical sensors, SERS/SERRS – Surface enhanced (resonance) Raman spectroscopy, FT/IR – Fouriertransformierte Infrarotspektrometrie, MS – Massenspektrometrie, GC – Gaschromatografie, IMS – Ionenmobilitätsspektrometrie, TEA – Thermal energy analyser (Abbildung: © C. Becher, Hochschule Bonn-Rhein-Sieg).

Die Palette reicht von miniaturisierten und adaptieren Verfahren der instrumentellen Analytik und der klassischen Nasschemie (GC-TEA, GC-CLD, Farbtests) über neueren Entwicklungen auf Basis der IMS oder elektronischer Nasen bis hin zu biologischen bzw. biochemischen Sensoren wie dem Spürhund und antikörperbasierten Schnelltests. Die Detektion kann aus der Gasphase über den Nachweis ausgasender sprengstofftypischer Bestandteile und abgeblasener Partikel sowie über am Objekt anhaftende Partikel erfolgen, die dem Detektor mittels Wischprobennahme zugänglich gemacht werden. Eine Probennahme über die Gasphase hat den Vorteil, dass berührungslos untersucht werden kann und im Prinzip ein schnelles Absuchen ermöglicht werden könnte, jedoch zeigten eigene Erfahrungen, dass diese Art der Probennahme in der Realität zeitaufwendig und fehleranfällig ist. Dies liegt nicht zuletzt an den außerordentlich geringen Dampfdrücken der meisten Explosivstoffen (siehe

hierzu auch Abbildung 2). Tatsächlich haben sich im Bereich der Flughafensicherheit überwiegend Geräte mit Wischprobennahme durchgesetzt.

Die Verfahren weisen im Vergleich zu den Methoden der Detektion loser Massen eine deutlich höhere Spezifität und damit eine erheblich geringere Rate falsch-positiver Alarme auf. Viele der markverfügbaren Systeme sind mobil einsetzbar. Ein wesentlicher Nachteil der Spurendetektion ist aber, dass eine detektierte Spur z.B. an einem Koffer nicht zwangsläufig das Vorhandensein einer größeren, gefährlichen Explosivstoffmenge beweist. Sprengstoffspuren können auch aus legalen Aktivitäten stammen (z.B. Schießsport, Herzmedikamente, beruflich bedingt) und zu einer Kontamination eines Objektes oder einer Person geführt haben.

Eine aufwändige Überprüfung aller Passagiere, der mitgeführten Fahrzeuge und des Gepäcks ist im Hafenumfeld kaum durchführbar. Im Rahmen des Projektes werden sich die Untersuchungen daher im Wesentlichen auf Verdachtsfälle und auf Stichproben beschränken. Für diese Art der Aufgabe in einem Hafen-Umfeld sind am ehesten mobile und robuste Detektionsverfahren geeignet. Exemplarisch für die Untersuchung des Einsatzes eines Sprengstoffspurendetektors wurde der Itemiser DX® ausgewählt [ELP2011]. Bei dem Gerät handelt es sich um ein transportables Tischgerät, welches leicht zu bedienen und sensitiv auf eine Vielzahl unterschiedlicher Explosivstoffe ist. Die Untersuchung eines Objektes erfolgt über Wischprobennahme. Ein Bautyp wurde von der Transportation Security Administration (USA) für den Einsatz auf Flughäfen zertifiziert. Das Gerät wird daher als ein aussagekräftiges Beispiel für den Einsatz von Sprengstoffspurendetektoren in einem Zugangsbereich angesehen.

Im Rahmen des Projektes wurden zudem einige weitere, nachfolgend kurz beschriebene Systeme in Hinblick auf Ihre Nutzbarkeit im Rahmen einer Hafenzugangskontrolle betrachtet:

Explonix (Sprengstoffspurendetektion)

Die Zugangskontrollstelle zum Hafen wird üblicherweise nur bei Bedarf (z.B. für Stichprobenkontrolle, Erhöhung der Gefahrenstufe) aufgebaut. Die zur Verfügung stehende Infrastruktur (verfügbare Fläche, Stromversorgung, Schutz vor Witterung) variiert von Anlage zu Anlage. Die Verwendung mobiler, handgetragener und akkubetriebener Geräte wäre daher wünschenswert.

Im Rahmen des Projektes wurde der Explonix (RS Dynamics, Tschechische Repub-

lik) auf Nutzbarkeit im Fährhafen untersucht. Das Gerät kann sowohl als Tischgerät als auch als akkubetriebenes, handgetragenes Gerät zur Detektion von Sprengstoffspuren und Gammastrahlung eingesetzt werden. Verdächtige Oberflächen können direkt oder über zwei unterschiedliche Probennahmeverfahren untersucht werden. Im Gerät werden Sprengstoffspuren bei 700 °C zersetzt Die dabei entstehenden reaktiven Gase werden dann mittels Chemolumineszenz detektiert. Das Gerät ist in der Lage alle herkömmlichen Explosivstoffe (PETN, RDX, HMX, TNT, etc.), sowie die peroxidischen Selbstlaborate TATP und HMTD anzuzeigen.

Ionenmobilitätsspektrometer (IMS) zur Detektion von Drogen und Sprengstoffspuren Itemiser DX

Als exemplarischer Vertreter für mobile IMS-Sprengstoffspurendetektoren wurde im Projekt überwiegend der für den Einsatz auf Flughafen zugelassene Itemiser DX (Fa. ELP, Deutschland) genutzt. Das Gerät dient der Detektion von Sprengstoff- und Drogenspuren durch Wischprobenahme, gefolgt von einer Thermodesorption des Wischers im Thermodesorber des Gerätes und der Analyse der abgedampften Bestandteile mittels „ion-trap-ion-mobility spectrometer“ (ITMS).

Ionisierte Analyten werden anhand ihrer Driftzeit unterschieden und identifiziert. Durch die Gegenwart eines geeigneten Dotiermittels bei der Ionisierung wird die Selektivität weiter erhöht. Das Gerät verfügt über zwei Kanäle und detektiert sowohl positive als auch negative Ionen. Für das Gerät existieren verschiedene Betriebsmodi: „explosives“ (nur Explosivstoffe), „drugs“ (nur Drogenstoffe), „dual“ (Explosivstoffe und Drogen). Sofern nicht anders erwähnt, wurden alle Untersuchungen im Explosivstoffmodus durchgeführt.

RASCO™ oder RASCargO™ (Sprengstoffdetektion)

Die Detektion von Explosivstoffen mittels Wischprobennahme stößt auf ihre Grenzen, wenn im zugänglichen Bereich keine oberflächlichen Anhaftungen vorhanden sind. Die Kontrolle von Fracht stellt hier eine besondere Herausforderung dar. Zum einen könnten hier besonders große Mengen Sprengstoff versteckt und transportiert werden, zum anderen ist eine gründliche Untersuchung von Fracht mit Beprobung aller einzelnen Frachtstücke vom Aufwand her kaum zu rechtfertigen. Verplombungen können den Zugang weiter erschweren.

Im Luftcargobereich werden zur Kontrolle von Luftfracht auf verborgene Explosivstoffe unter anderem auch Hunde eingesetzt. Zur Erhöhung des Durchsatzes werden

hierfür Luftproben aus dem Inneren des Containers, Frachtstücks oder Fahrzeugs durch Filter gesaugt, von denen dann mehrere einem Hundeteam in einem separaten Raum zur Überprüfung präsentiert werden. Spürhunde sind in der Lage eine größere Zahl an Stoffen zu erlernen und auch in Gegenwart hoher Konzentrationen anderer flüchtiger Stoffe verlässlich und empfindlich zu detektieren [Kaul2011]. Mit dem RASCO™-Verfahren können mit zwei Hundeteams mehr als 40 Filter/h untersucht werden, wobei jedoch die Zeit für die Probennahme noch nicht berücksichtigt ist. Diese kann bis zu 10 Minuten dauern. Zur Aufrechterhaltung einer rund-um-die-Uhr Kontrolle werden 8 Hundeteams, sowie mehrere Probennehmer benötigt [ICTS2012]. Das Verfahren wurde in verschiedenen Ländern z.B. durch DSTL in Großbritannien (Defense Science & Technologie Laboratory) behördlich zur Kontrolle von Luftfracht zugelassen und wird unter anderem von der Firma FIS (Deutschland) als Dienstleistung angeboten.

Aufgrund der behördlichen Zertifizierungen für den Luftsicherheitsbereich konnte von einer guten Leistungsfähigkeit des Verfahrens ausgegangen werden. Allerdings wurde der Einsatz des Verfahrens zur Kontrolle von Luftfracht 2014 in England unerwartet verboten [Cargo2014]. In der zuvor genannten Quelle wird darauf hingewiesen, dass das Verfahren einer Evaluierung durch die EU unterzogen werden sollte.

Der tatsächliche Zeitaufwand für eine Kontrolle, die neben der Überprüfung der Proben durch die Hunde auch die Zeit für Probennahme, Transport der Probe zum Untersuchungsraum und Einbringung der Probe in die Teststrecke enthalten müsste, ist nicht bekannt. Der Zeitaufwand dürfte aber bei deutlich über 10 Minuten liegen. Das Verfahren ist nur dann effektiv, wenn blockweise mehrere Container oder Fahrzeuge beprobt und überprüft werden. Dies bedingt gewisse Ansprüche an den Platzbedarf und die Organisation der Kontrollstelle. Die zur Durchführung einer kontinuierlichen Kontrolle benötigten 8 Hundeteams und zusätzlichen Probenehmer stellen – verglichen zu den bisher üblichen Kontrollstellen in Rostock und Puttgarden - einen erheblichen zusätzlichen Personalbedarf dar.

Teleskopkamera Wolfpack™ und Videoskop VIPAQ™

Im Rahmen des Projektes wurde untersucht ob in Fracht nicht-deklarierte Gefahrgüter mittels Gasphasendetektoren detektiert werden können. Dieses setzt aber voraus, dass hinreichend flüchtige Stoffe vorliegen und aus der Verpackung austreten können.

Im Sicherheitsbereich werden zur Kontrolle von Fahrzeugen und Fracht auch Spiegel, Teleskopkamerasysteme und Endoskope genutzt, um sonst schwer zugängliche Bereich in Augenschein nehmen zu können. Teleskopkamera Wolfpack™ (EOMAX, Canada) und Videoskop VIPAQ™ (Endoskop, Fa. Richard Wolf, Deutschland) wurden im Rahmen einer Versuchskontrollstelle im Hafen Rostock getestet. Die Geräte verfügen über starke, teilweise externe Beleuchtungsquellen (wahlweise auch im Infrarotbereich) und empfindliche Videosysteme.

I.4.2 Detektion von Gefahrstoffleckagen und Identifizierung von Gefahrgütern

Die Detektion von Gefahrstoffen zielt darauf ab Leckagen frühzeitig zu erkennen und im Falle einer Havarie die Ausdehnung einer Gefahrstoffwolke feststellen zu können. Die Identifizierung eines Gefahrstoffes hingegen ist notwendig, um im Schadensfall angemessene Gegenmaßnahmen ergreifen zu können bzw. unerwartete Gefahren durch falsch deklarierte Güter (gegebenenfalls mit terroristischem Hintergrund) zu vermeiden.

Zum Auffinden einer Leckage können neben der direkten Inaugenscheinnahme der Ladung oder eines Transportgebindes im Falle von flüchtigen Stoffen Gasphasendetektoren eingesetzt werden. Beim Arbeitsschutz und bei Einsatzkräften werden bereits eine Reihe stationärer und mobiler Detektionssysteme eingesetzt. Weit verbreitet sind Photoionisationsdetektoren, elektrochemische Zellen und Ionenmobilitätsspektrometer [Arb2011, BBK2011].

Elektrochemische Zellen eigenen sich vor allem für die Detektion einer Gasspezies und sind nicht in der Lage andere Gase zu detektieren. Ionenmobilitätsspektrometer sind empfindlich, schnell-anzeigend und einigermaßen selektiv bei gleichzeitig großer Bandbreite bei den detektierbaren Stoffen. Sie spielen eine große Rolle bei der Detektion von toxischen Industriechemikalien (TIC’s Toxic Industrial Chemicals) und Kampfstoffen.

Alternativen bieten auch Multisensorsysteme wie der X-AM-7000 (Dräger, Deutschland) bei dem eine begrenzte Anzahl unterschiedlicher Sensoren (z.B. elektrochemischer Zellen) verbaut werden können.

Übliche Verfahren in der instrumentellen Analytik zur Identifizierung unbekannter Substanzen sind Raman-, FT-IR- und Massenspektroskopie. In der Regel werden dabei Messspektren mit Spektren aus einer Datenbank verglichen. Während die Massenspektroskopie mit einem nicht unerheblichen technischen Aufwand versehen

ist, welcher sich in Größe und Wartungsaufwand entsprechender Systeme niederschlägt, sind robuste, tragbare Raman- und FT-IR-Spektrometern einschließlich umfangreicher Stoffdatenbanken marktverfügbar. Für den Einsatz dieser Geräte ist aber ein direkter Zugang zum Stoff oder zumindest eine transparente Verpackung notwendig. Mittels durchleuchtender Verfahren lassen sich viele abschirmende Verpackungen umgehen, jedoch lassen diese Systeme keine Stoffidentifizierung zu.

Gasphasendetektor MiniRAE3000

Im Projekt wurde das handgetragene, akkubetriebene PID MiniRAE3000 mit einer 10,6 eV Ionisierungslampe eingesetzt. PIDs sind z.B. im Arbeitsschutz etabliert. Die Geräte sind robust und empfindlich jedoch unspezifisch bei den angezeigten Stoffen. Stoffe mit Ionisierungsenergien > 11,7 eV (im Falle des im Projekt genutzten Gerätes >10,6 eV) können nicht mehr bzw. bei geringfügig höheren Ionisierungsenergien nur noch schlecht detektieren werden.

Multisensorgasphasendetektor GDA 2

Seit Jahren wird unter dem Stichwort der elektronischen Nase an der Kombination mehrerer Sensorprinzipien in einem Gerät gearbeitet. Ziel ist es die Nachteile einzelner Sensoren (z.B. mangelnde Selektivität, geringes Substanzspektrum) zu kompensieren und verlässliche Messungen auch in chemisch komplexen Umgebungen durchführen zu können [Wils09]. Im Hafenumfeld kann von einer komplexen Zusammensetzung der Gasphase mit entsprechend hohen Anforderungen an das Messsystem ausgegangen werden.

Im Projekt wurde das Multisensorsystem GDA 2 (Airsense, Deutschland). Letzteres enthält neben einem IMS (für positive und negative Ionen), ein PID, zwei Metalloxidsensoren (MOX, für oxidierende und reduzierende Gase) sowie eine elektrochemische Zelle (EC) für dissoziierbare Stoffe. Die Signale der Sensoren werden dem Gerätenutzer stark vereinfacht in Balkendarstellung angezeigt. Der GDA wird vom Hamburger Zoll zum Eigenschutz bei der Kontrolle von Importcontainer auf flüchtige toxische Stoffe genutzt.

Infrarot/Raman - Handspektrometer TrueDefender FT und FirstDefender RM

Zur Identifizierung unbekannter Stoffe bieten sich Infrarot/IR- und Raman-Handspektrometer an. Im Projekt genutzt wurden der TrueDefender FT (IR-Spektrometer) der FirstDefender RM (Ramanspektrometer) (beide Systeme Thermo

Scientific, US). Die Identifikation erfolgt über den Abgleich des Messspektrums mit einer im Gerät hinterlegten Spektren-Datenbank erfolgt. Die Datenbanken umfassen bei den im Projekt genutzten Geräten mehrere tausend Substanzen und decken Explosivstoffe, Drogen und viele Industriechemikalien ab. Zu dem identifizierten Stoff stehen dem Nutzer weitere Information z.B. zur Gefahrstoffeinstufung zur Verfügung.

Bei der IR- und Ramanspektroskopie werden Molekülschwingungs- und Rotationsenergien gemessenen. Die Spektren sind abhängig von Bindungsstärke und Masse der beteiligten Bindungen bzw. Atome. Die erzeugten Spektren sind substanzspezifisch. Dabei verhalten sich Raman- und IR-Spektroskopie oftmals komplementär zueinander: Raman-aktiv sind Schwingungen, die zu einer Änderung der Polarisierbarkeit, nicht aber des Dipolmomentes führen. Bei der IR-Spektroskopie werden hingegen Schwingungen angeregt, welche zu einer Änderung des Dipolmomentes führen. Fluoreszierende Stoffe lassen sich schlecht mittels Ramanspektroskopie vermessen, da das Fluoreszenzsignal die Raman-Emissionslinien überdecken können. Wasserfeuchte Stoffe sind dagegen problematisch für eine Analyse mittels IR-Spektroskopie, da Wasser in weiten Bereichen des IR Spektrums starke Absorptionslinien aufweist.

Im Anhang beschrieben sind die Ergebnisse zu den folgenden Geräten:

- TrueDefender FT (Analyticon, Deutschland)
- FirstDefender RM (Analyticon, Deutschland)
- GDA 2 (Airsense Analytics, Deutschland)
- MiniRAE3000 (RAE SYSTEMS ,Dänemark)
- Itemiser DX (ELP, Deutschland)
- Explonix (RS Dynamics, Tschechische Republik)
- Wolfpack™ (EOMAX, Canada)
- Videoskop VIPAQ™ (Richard Wolf, Deutschland)

I.4.3 Sensorsysteme zum Nachweis von TATP und Präkursorsubstanzen

Triacetontriperoxid ist ein sogenannter „homemade explosive“, welcher bereits bei Attentaten in London und Madrid sowie beim gescheiterten Attentat auf einen American Airlines Flug im Jahr 2001 Verwendung fand [Bhattacharjee2008, Oxley2006]. Die Detektion von TATP ($C_9H_{18}O_6$) ist immer noch ein Problem, da gängige Detektoren für einen Nachweis auf Nitrogruppen (wie z.B. in TNT oder PETN) innerhalb des Moleküls, oder auf metallische Komponenten im Sprengsatz angewiesen sind [Ama-

ni2012]. In den letzten Jahren wurden verschiedene Sensor- und instrumentell-analytische Techniken für den Spurennachweis von TATP entwickelt. Hierzu zählen z.B. die Ionenmobilitätsspektrometrie [Räsänen2007, Buttigieg2003] sowie die Massenspektrometrie/ Time of flight Massenspektrometrie (TOF-MS) [Rowell2012, Aschenbruck2012]. Beide Technologien zeichnen sich durch hohe Empfindlichkeiten sowie einen sehr selektiven Nachweis aus, sind allerdings für den Einsatz und die Überwachung von größeren Anlagen und Einrichtungen wie Fähren oder Häfen ungeeignet, da die Bedienung kompliziert und die Auswertung der erhaltenen Daten nur durch Fachpersonal erfolgen kann. Weiter erscheint ein großflächiger Einsatz durch den hohen Preis der Geräte nicht durchführbar. Im Bereich der portablen und billigeren Sensoren sind in der Literatur mehrere Ansätze beschrieben. Einige Nachweismethoden sind allerdings auf die Detektion in Flüssigkeiten beschränkt, wie die elektrochemische Detektion [Laine2008], Fluoreszenz [Malashikhin2008], Chemolumineszenz [Maiolini2009] sowie Biosensoren [Walter2011] und biologisch inserierte Techniken [Smith2008].

Im Gegensatz zu anderen Sprengstoffen besitzt TATP einen relativ hohen Dampfdruck (6,39 Pa bei 25 °C entsprechend einer Konzentration von ca. 63 ppm). Zum Vergleich TNT besitzt einen Dampfdruck von $9{,}27 \cdot 10^{-4}$ Pa bei 25 °C (entsprechend einer Konzentration von 9 ppb) und ist innerhalb der Sprengstoffe ein Vertreter mit einem relativ hohem Dampfdruck [Ewing2013] (vgl. Abbildung 2).

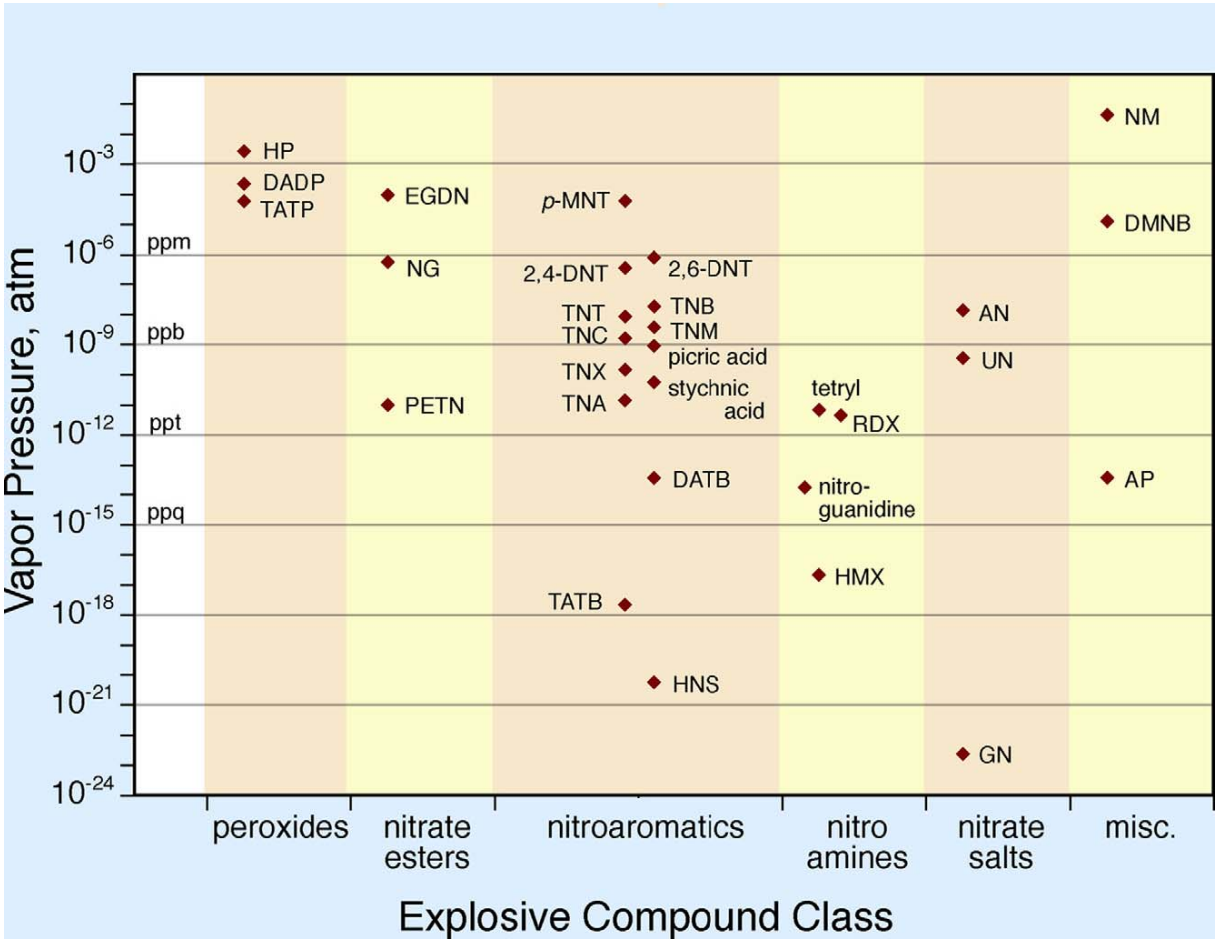


Abbildung 2: Übersicht über die Dampfdrücke ausgewählter Sprengstoffe [Ewing2013] HP: Wasserstoffperoxid, DADP: Diacetonperoxid, TATP: Triacetonperoxid, EGDN: Ethylenglycoldinitrat, NG:Nitroglycerin, PETN: Pentaerythrityltetranitrat, p-MNT: 4-Nitrotoluol, 2,6-DNT: 2,6-Dinitrotoluol, 2,4-DNT: 2,4-Dinitrotoluol, TNB: 1,3,5-Trinitrobenzol, TNT: 2,4,6-Trinitrotoluol, TNM: 2,4,6-Trinitromesitylene, TNC: 2,4,6-Trinitro-m-cresol, picric acid: 2,4,6-Trinitrophenol, TNX: 2,4,6-Trinitro-m-xylene, stychnic acid: 2,4,6-Trinitroresorcinol, TNA: 2,4,6-Trinitroaniline, DATB: 1,3-Diamino-2,4,6-trinitrobenzene, TATB: 1,3-Diamino-2,4,6-trinitrobenzene, HNS: Hexanitrostilbene, tetryl: N-Methyl-n,2,4,6-tetranitroaniline, RDX: Cyclotrimethylene trinitramine, nitro guanidine: Nitroguanidin, HMX: Cyclotetramethylene tetranitramine, AN: Ammoniumnitrat, UN: Harnstoffnitrat, GN: Guanidiniumnitrat, NM: Nitromethan, DMNB: 2,3-dimethyl-2,3- dinitrobutane, AP: Ammoniumperchlorat

Auf Grund des hohen Dampfdrucks bietet sich eine Detektion von TATP in der Gasphase an wobei zu beachten ist, dass unter realen Bedingungen die Konzentration durch Verpackung und Verdünnung durch Umgebungsluft nochmals drastisch abnehmen kann [Becher2010]. So wird in der weiteren Betrachtung der in der Literatur beschriebenen Sensoren neben dem selektiven Nachweis von TATP auch auf eine hohe Nachweisempfindlichkeit geachtet.

Im Bereich der Gassensorik werden in der Literatur mehrere unterschiedliche Sensortechnologien beschrieben. Capua et al. nutzen einen Sensorarray aus Feldeffekttransistoren bei denen die Gate-Elektrode durch Rezeptorschichten aus organischen

Halbleitern aufgebaut ist. Mit dieser Anordnung können Nachweisgrenzen von ca. 100 ppb erreicht werden und es konnte gezeigt werden, dass mit dem Array ein selektiver Nachweis von TATP besonders gegenüber Wasserstoffperoxid möglich ist [Capua2009]. Lubcyk et al. nutzen einen Array aus sechs Quarzmikrowaagen mit unterschiedlicher Beschichtung. Das System zeigt eine schnelle Sensorreaktion und diskriminiert zwischen TATP, Di-tert-butylperoxyd, H_2O_2, Aceton und Wasser bei einer Nachweisgrenze von 1 ppm [Lubczyk2009]. Lin et al. entwickelten einen kolorimetrischen Sensor der semiquantitativ eine Detektion von TATP bis zu einer Nachweisgrenze von 2 ppb erlaubt und dabei unbeeinflusst von typischen Störgrößen wie Luftfeuchtigkeit, Parfüm oder anderen flüchtigen organischen Verbindungen (VOC) bleibt [Lin2010]. Amini et al. beschreiben einen Sensor basierend auf der katalytischen Zersetzung von TATP an Metalloxidoberflächen, wobei die Temperaturänderung des Sensors als Signal genutzt wird. Unterschiedliche Reduktions- und Oxidationsprozesse (RedOx-Prozesse) an den verschiedenen Oxidoberflächen, die zu einem Sensorarray zusammengeschaltet werden, erlauben dabei eine Unterscheidung von TATP sowie der für dessen Synthese benötigten Präkursoren Aceton und H_2O_2. Mit diesem System zeigen die Autoren einen Nachweis von TATP unter realitätsnahen Umgebungen bis in den ppm- Bereich [Amani2012]. Zwei weitere Verfahren für die Detektion werden in der Literatur vorgestellt, wobei das erste auf mit Zink funktionalisierten Titanoxid Nanotubes beruht und das zweite auf organischen Dünnschichttransistoren [Banerjee2009, Royer2012]. Beide Autorengruppen geben in ihren Arbeiten keine Angaben zu Detektionslimits und Querempfindlichkeiten sondern beschreiben nur das grundsätzliche Sensorprinzip und Verweisen auf zukünftige Arbeiten.

Die Detektion von TATP mittels Metalloxid- Halbleitergassensoren (MOX) sind in der Literatur zwei Arbeiten zu finden. In beiden werden Metalloxid-Nanostrukturen verwendet, um TATP bis in den Bereich weniger ppb nachzuweisen. Zhang et al. nutzen dazu einen Sensor basierend auf Indiumoxid-Nanopartikel (ca. 16nm) welche eine stark verstärkten Reaktion bei TATP gegenüber anderen Substanzen wie Aceton und H_2O_2 zeigen [Zhang2010]. Dobrokhotov et al. nutzen für führ ihre Sensoren als Basismaterial Silikananofedern, welche mit Zinkoxid (ZnO) beschichtet werden. Durch unterschiedliche Dotierung des ZnO mit Metallen (Pt, Pd, Au, Ni, Cu) fertigen die Autoren unterschiedliche Sensoren an, die in einem Array zusammengefasst werden. Durch die Nutzung multivariater statistischer Verfahren (LDA) gelingt Ihnen die Dis-

kriminierung von unterschiedlichen brennbaren Lösemitteln. Weiter wird in der Arbeit gezeigt, dass TATP und TNT mit diesen Sensoren nachweisbar sind und es wird darauf hingewiesen, dass in zukünftigen Arbeiten auch diese beiden Stoffe mit Hilfe der verwendeten Auswertemethodik diskriminierbar werden [Dobrokhotov2012].

Funktionsweise von Metalloxid Halbleitergassensoren:

Metalloxid Halbleitergassensoren (MOX) beruhen auf dem Prinzip der Interaktion zwischen Gasen und polykristallinen Halbleitermaterialien. Gemessen wird hierbei der Widerstand einer Schicht halbleitender Metalloxide z.B. SnO_2, ZnO_2, WO_3, In_2O_3, Am weitesten verbreitet ist hierbei das SnO_2, welches je nach Gasangebot mit einem Abfall oder einem Anstieg des Widerstandes reagiert der nahezu proportional zur Gaskonzentration ist. Hierbei wird das eigentliche Sensorelement je nach Metalloxid auf Temperaturen zwischen 200-600 C° beheizt.

Im Fall von SnO_2 liegen dabei die einzelnen Kristalle in einem unterstöchiometrischen Verhältnis von Zinn zu Sauerstoff vor, so dass sich ein realer Kristall der Form SnO_{2-n} ausbildet. Diese Sauerstofffehlstellen im Kristall sind abhängig vom Sauerstoffpartialdruck der Umgebung und liegen im stationären Zustand im Gleichgewicht vor. Dabei kommt es in Abhängigkeit des Sauerstoffangebotes an den Kristalloberflächen zur Ausbildung von Sauerstoffionen des Typs O_2^-, wodurch dem Kernmaterial Ladungsträger entzogen werden und sich an den Korngrenzen erhöhte Potentialbarrieren aufbauen. Dieser Vorgang limitiert den Grundwiderstand des Sensors.

Tritt ein weiteres Gas mit der Sensoroberfläche in Kontakt kommt es zu Adsorptionsvorgängen und tatsächlichen chemischen Interaktionen zwischen Gas und adsorbiertem Sauerstoff. Reduzierend wirkende Gase wie z.B. Wasserstoff oder Methan werden von dem an der Sensoroberfläche adsorbierten Sauerstoff oxidiert wodurch Ladungsträger für das Basismaterial frei werden, zusätzlich werden die Potentialbarrieren an den Korngrenzen durch den Wegfall von Oberflächenladungen abgesenkt.

$2H_{2\,(g)} + O^-_{2\,(ads)} \rightarrow 2H_2O + e^-$ [Yamazoe2003]

Beide Prozesse führen zu einer Leitfähigkeitserhöhung die messbar ist. Die hierbei ablaufenden Prozesse sind reversibel, da sich nach einer gewissen Zeit mit dem Sauerstoff der Umgebungsluft wieder das Gleichgewicht an der Sensoroberfläche einstellt. Analog zu reduzierenden Gasspezies ist die Funktionsweise bei oxidierenden Gasen ähnlich. Hierbei kommt es allerdings zu einer Absenkung der Ladungsträgerdichte und einem Anstieg der Potentialbarrieren wodurch der messbare Wider-

stand des Halbleiters steigt. [Gründler2004]

Wie aus der theoretischen Betrachtung der am Sensor ablaufenden Reaktionen hervorgeht, ist von einem klassischen MOX-Sensor außer der Unterscheidung zwischen reduzierenden und oxidierenden Gasen keine Aussage über das tatsächlich am Sensor detektierte Gase zu erwarten. Es gibt allerdings mehrere Möglichkeiten diesen Mangel an Selektivität zu verbessern. Es kommen dabei mehrere Verfahren zum Einsatz:

Neben der Variation des eingesetzten Metalloxides kann dieses an seiner Oberfläche mit Katalysatoren, meist Edelmetalle, belegt werden um die Reaktion einzelner Gasspezies zu bevorzugen [Eberheim2003].

Weiter kann die Temperatur des Sensorelementes statisch oder in dynamisch zyklischen Temperaturprofilen variiert werden um die Reaktion spezifischer Gaskomponenten zu fördern [Lee1999, Kohler1996, Schütze2004, Ankara2004].

Als letztes besteht die Möglichkeit vor dem eigentlichen Sensorelement gasselektive Filtermembranen zu platzieren die entweder als eigene Schicht direkt auf die gassensitive Schicht aufgetragen werden oder aber als eigenständiges Bauteil vor dem Sensorelement als Selektor fungieren. Hierdurch können Störsubstanzen unterdrückt werden oder größere Moleküle in leichter zu detektierende kleiner Moleküle zerlegt werden [Baumbach2005, Ryzhikov2005].

I.4.4 Bildgebende Radarverfahren und Materialklassifizierungen

Materialdurchdringende radarbasierte Scannertypen basieren heutzutage meist auf der Ultrabreitbandtechnik (UWB). Es existieren von verschiedenen Forschergruppen unterschiedliche Messaufbauten, welche aber aus verschiedenen praktischen (wie Messzeit) oder technischen Gründen (unzureichende Auflösung im Zentimeterbereich aufgrund der relativ geringen Frequenz) nicht praktikabel sind. Auch kommerzielle Systeme aus dem militärischen Bereich, hier wäre das Handheld-System „RadarVision2“ zu nennen, welche Personen hinter Wänden detektiert, sind nicht für eine zur Klassifizierung geeigneten hochauflösenden Radarabbildung einsetzbar.

Derzeit gibt es keine radarbasierten Systeme auf dem Markt, die zuverlässig gefährliche Gegenstände in Behältnissen wie Gepäckstücken, Kisten, Briefen oder Kartons erkennen. Jedoch wurden bei der Maxonic Gmbh bereits Vorstudien durchgeführt, welche die grundlegende Machbarkeit solcher Scanner demonstrieren [Häge-

len2008]. Dabei wurde eine Schusswaffe in einen Koffer versteckt, welcher anschließend mit einem Radar abgescannt und nach Verarbeitung der empfangenen Daten detektiert, lokalisiert und identifiziert wurde. Es zeigte sich, dass aufgrund der Eigenschaft der elektromagnetischen Strahlung im Millimeterwellenbereich viele Materialien wie Stoffe, Holz oder Kunststoff durchdrungen werden können und dass radarbasierte Systems zu diesem Zweck zum Einsatz kommen können. Aus diesem Grund wurde für das Projekt ein im Millimeterwellenbereich (30 GHz – 100 GHz) arbeitender radarbasierter Scanner vorgeschlagen, der in der Lage ist, verborgene, für die Fährschifffahrt gefährliche Objekte in Behältnissen zu detektieren und bildhaft darzustellen. Um eine 3-dimensionale Abbildung eines Volumenelements erzeugen zu können, wird das Prinzip des Synthetischen Apertur Radars (SAR) mit einer kleinen schwach fokussierenden Antenne umgesetzt. Ein solches System ist kompakt, transportabel und flexibel bezüglich Abstand zum Messobjekt und Größe des abgebildeten Bereiches. Damit lassen sich nicht nur Gepäckstücke, Kartons oder ähnliches untersuchen, sondern je nach Art des verborgenen Gegenstandes beispielsweise eventuell auch Zünder von Sprengkörpern lokalisieren und damit eine wichtige, teils auch lebensrettende, Information den Räumungskräften bereitzustellen.

I.4.5 Lineare Brandmeldesysteme

Die folgende Tabelle 2 gibt eine Übersicht über den Stand der Technik zur Detektion von Bränden wieder. Weitergehende Aspekte z.B. in Bezug auf Datenübertragung und Sicherheitsfunktionalität werden an dieser Stelle nicht betrachtet, da in diesem Projekt die Neuentwicklung eines linearen Brandmelders im Fokus stand. Diese Entwicklung sollte bis zu einem Labormuster vorangetrieben werden, die Integration in das Meldebussystems einen Fährschiffes und Langzeittests waren nicht mehr Bestandteil des Projektes.

Tabelle 2: Melder für die Detektion von Rauch und Bränden

Detektions-prinzip	Melderart	Beschreibung	Verbreitung / Preis je „Melder“
Streulicht	Punktförmiger Rauchmelder	Häufigster Meldertyp, der Standardmelder zur Detektion aller Arten von Rauch-freisetzenden Bränden Nachteil: Störungsneigung bei Staubfanfall oder Nebel	>80% <100€
	Linearer Durchlicht Rauchmelder	Verbreiteter Meldertyp zur Überwachung in Hallen oder bei hohen Räumen Fehlalarme oder Störungen bei Staub, Nebel oder „Objekten“ (z.B. Vögel, Insekten…)	<1% >1000€
	Linearer Rückstreu Rauchmelder	Neuer Meldertyp im Prototypstadium zur Überwachung in Hallen oder bei hohen Räumen	Entwicklung >1000€
	Rauchansaugsystem	eigentlich keine abweichende Detektionstechnologie, da als Detektor ein klassischer Streulichtrauchmelder verwendet wird, aber durch die andersartige Installationstechnik und die Möglichkeit, Filter vorzusehen, erhält das RAS eine Sonderstellung	<1% >1000€
Temperatur	Punktförmiger Wärmemelder	Zweithäufigster Meldertyp, der Standardmelder zur Detektion aller Arten von offenen Flammen-Bränden, die Wärme freisetzen Nachteil: Detektion verhältnismäßig „spät“ und unempfindlich	<20% <100€
	Linenförmiger Wärmemelder ohne Ortsauflösung	Robuster Wärmemelder insbesondere zur Überwachung längerer Strecken (Kabelkanäle, Tunnel) Nachteil: Detektion verhältnismäßig „spät“ und unempfindlich	<5% >1000€
	Linenförmiger Wärmemelder mit Ortsauflösung	Robuster Wärmemelder insbesondere zur Überwachung längerer Strecken (Kabelkanäle, Tunnel). Die Ortsauflösung ermöglicht eine signifikante Empfindlichkeitssteigerung und eine Lokalisierung des Brandortes Nachteil: verhältnismäßig hoher Preis	<0,01% >10.000€
Strahlung	Flammenmelder IR und/oder UV	Meldertyp zur Detektion aller Arten von offenen Flammen-Bränden, die Licht oder Infrarotstrahlung freisetzen; Die Detektion erfolgt dann sehr schnell und zuverlässig, da die Luftbewegung keine Rolle spielt. Nachteil: Flammenschein ist erforderlich ebenso wie „freie Sicht“ auf die Flamme	<1% >1000€
	Infrarot-Wärmebildkamera oder Array	Meldertyp zur Detektion aller Arten von Bränden, die sich durch warme oder heiße Oberflächen ankündigen; Die Detektion erfolgt dann schnell und zuverlässig, da die Luftbewegung keine Rolle spielt. Standard z.B. in Müllbunkern Nachteil: „freie Sicht“ auf die Oberfläche ist erforderlich; Keine Detektion von verdeckten Bränden	<0,1% >10.000€ oder >1000€

Gas	Punktförmiger Brandgasmelder	Meldertyp zur Detektion aller Arten von Bränden, die Brandgase freisetzen; Standard z.B. in Kohlenkraftwerken Nachteil: Abgase z.B. von Verbrennungsmotoren, können Alarme auslösen	<1% >1000€
	Linearer Brandgasmelder	Meldertyp zur Überwachung in Hallen oder bei hohen Räumen; Unempfindlich auf Stäube oder Nebel Fehlalarme bei Abgasen; Störungen bei Unterbrechung der „Sichtverbindung“ Nachteil: Hoher Preis	<0,01% >10.000€

Die Betriebsumgebung auf den Schiffen ist von salzhaltiger Atmosphäre geprägt. Alle Detektionsprinzipien, bei denen die zu überwachende Luft an die Oberfläche eines Sensors oder in eine „kleine“ Messkammer (wie beim punktförmigen Rauchmelder) gelangen muss, besteht das erhebliche Risiko, dass sich mit der Zeit eine Salzschicht auf den Oberflächen ablagert. Im Falle der punktförmigen Rauchmelder wird dies mittelfristig zu einer Abnahme der Empfindlichkeit bzw. zu einer erhöhten Streuung innerhalb der Kammer an den aufwachsenden Kristallen führen. Bei den punktförmigen Gassensoren ist hingegen mittelfristig mit einer Sensorvergiftung zu rechnen.

Die klassischen linearen Systeme (Rauch/Gas) liefern keine Ortsauflösung, so dass weder eine Lokalisierung noch eine intelligente Mehr-Positionsverknüpfung möglich ist. Zur Anwendung auf einem Fährdeck scheiden IR bildgebende Verfahren ebenso wie Flammenmelder aus, da die Abschattung durch z.B. Fahrzeuge überwiegen wird.

Einsatzfähig wären Temperatur-Melder (punktförmig wie linear), jedoch bleibt hier die Detektionsempfindlichkeit weit hinter der „erwarteten“ Empfindlichkeit, z.B. zur Detektion von Schwelbränden, zurück. Daher besteht also der Wunsch nach einer neuen Messmethode, bei der Rauch mit Ortsauflösung gemessen wird, ohne dass die zu erfassende Luft das Mess-System „berührt“. Aus dieser Anforderung ist das Konzept des linearen Rückstreu Rauchmelders entstanden:

- Rauchdetektion
- Ortsauflösung
- Kein Kontakt Messluft mit dem Messsystem (ggf. Spül/Sperrluft)

I.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Für die Darstellung der Zusammenarbeit mit anderen Stellen sei auf das Kapitel II.1 verwiesen, in dem aufgeteilt nach den einzelnen Arbeitspaketen die Projektpartner aufgelistet sind, mit denen eng zusammen gearbeitet wurde. Darüber hinaus konnte die Zusammenarbeit mit den folgenden Stellen zur Bearbeitung der Arbeitspakete genutzt werden:

- Spedition Hoss GmbH & Co. KG: Das Unternehmen ermöglichte die Durchführung von Wischprobennahmen (Itemiser DX - Sprengstoff/Drogen, lösungsmittelgetränkte Wischer für eine anschließende instrumentell-analytische Bewertung der untersuchten Flächen unter Laborbedingungen) der auf dem Firmengelände ein- und ausgehenden LKW (06.12.2013).
- BPol im Hafen Puttgarden: Die BPol unterstützte die Planung zur Hafensicherheitsübung in Puttgarden.
- Securitas: Der Sicherheitsdienstleister (gestellt durch den Hafen Rostock) unterstützte personell und mit eigenen Erfahrungen Durchführung und Planung der Testläufe und Hafensicherheitsübungen im Hafen Rostock
- Bundesamt für Güterverkehr (BAG): Das Bundesamtes kontrolliert LKW-transporte und führt hierzu eigene Statistiken. Auf Anfrage des IDT wurde die Daten aus den Kontrollen des Jahres 2013 eigens in Hinblick auf das Auftreten von Nicht-/fehldeklarierten Gefahrgütern ausgewertet und die Ergebnisse zur Verfügung gestellt.
- DSTL - Defense Science & Technologie Laboratory: Das DSTL stellte Informationen zur Sprengstoffdetektion mittels RASCO™ oder RASCargO™ im Bereich der Luftsicherheit in England zur Verfügung.
- Firma Richard Wolf: Das Unternehmen stellt für eine Messkampagne im Hafen ihre Geräte (Wolfpack™ und Videoskop VIPAQ™) und Personal zur Verfügung.
- RS-Dynamics: Die Firma stellte für Versuche Ihren Explosivstoffdetektor Explonix zur Verfügung. Dieser wurde in Labvorversuchen und im Rahmen von Messkampagnen im Hafen eingesetzt.

II. Projektergebnisse und Verwertung

II.1 Ergebnisse im Projekt DeHaBo

Die folgenden Tabellen zeigen zusammengefasst eine Kurzdarstellung der im Antrag beschriebenen Ziele und die erreichten Ergebnisse der einzelnen Arbeitspakete. Eine detaillierte Darstellung der Projektergebnisse befindet sich der besseren Lesbarkeit wegen im Anhang. In den nachfolgenden Tabellen sind die Projektpartner wie folgt abgekürzt: BSH (Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie), DA-MV (Verkehrsministerium Mecklenburg-Vorpommern, Hafensicherheitsbehörde), DA-SH (Landespolizeiamt Schleswig-Holstein, Dezernat 43, Behörde für Hafenanlagensicherheit), GTE (GTE Industrieelektronik GmbH), HRO (Hafen- und Seemannsamt Rostock), HSW (Hochschule Wismar, University of Technology, Business and Design), IKS (Universität Hamburg, Institut für Kriminologische Sozialforschung), ISV (Institut für Sicherheitstechnik/Schiffssicherheit), LHG (Lübecker Hafengesellschaft mbH), MARSIG (MARSIG Ingenieurgesellschaft für Maritime Sicherheitstechnik und Management mbH Warnemünde), Maxonic (MaXonic GmbH), Reederei (Scandlines Deutschland GmbH, TT-Line GmbH und Co. KG, F. Laeisz GmbH), VDR (Verband Deutscher Reeder).

Arbeitspaket 1 **Harmonisierung und Optimierung der Sicherheitsstrukturen**
Arbeitspaket 1.1.1 **Ganzseitige Erfassung der landseitigen Sicherheitsarchitektur**
Beschreibung des Arbeitspaketes: **Beratung zum Einsatz von technischen Detektionssystemen (Explosivstoffe und Gefahrstoffe)** Die von der Hochschule Bonn-Rhein-Sieg evaluierten Detektionssysteme sind in ihrer Einsatzfähigkeit begrenzt. Gründe hierfür sind z.B. der zeitliche Aufwand je Messung oder Leistungsgrenzen der Systeme in Hinblick auf das nachweisbare Substanzspektrum bzw. die für eine Messung notwendigen Substanzmengen. Darüber hinaus ist je nach Messverfahren mit einer - für das anspruchsvolle Hafenumfeld noch nicht bekannten – Rate an Fehlalarmen zu rechnen. Dieses ist bei der Einbindung dieser Systeme in die landseitige Sicherheitsarchitektur zu berücksichtigen.

Ziele und Arbeitsinhalte:

Festlegung der für die Modellierung benötigten Geräteparameter und Kriterien.

Beteiligte:	**Bearbeitungszeitraum:**
HBRS, HRO, FKIE	Feb. 12- Juli 12 Jan. 14- Aug. 14

Ergebnisse:

Es wurden nachfolgende Geräteparameter und Kriterien für Detektionssysteme zu Erfassung der landseitigen Sicherheitsarchitektur festgelegt. Diese sind:

Sicherheitsgewinn: Der Sicherheitsgewinn kann nur qualitativ beschrieben werden und beinhaltet Aspekte wie Nachweisgrenzen, Fehlalarmquote, sowie Anwendungsbereich und -breite (z.B. Detektion einer breiten Auswahl unterschiedlicher Explosivstoffe).

Rüstzeit: Dies ist Zeitbedarf für die Inbetriebnahme des Detektors in der Kontrollstelle.

Zeitbedarf Kontrolle: Benötigte Zeit zur Durchführung einer Fahrzeugkontrolle einschließlich Zeit für Probennahme, eigentlicher Messdauer, sowie für Systemregeneration und eventueller Reinigung.

Robustheit: Ist das Gerät für einen mobilen Einsatz in rauer Umgebung ausgelegt, oder sind zusätzliche Maßnahmen zum Schutz des Gerätes erforderlich?

Bedienbarkeit: Eine einfache Bedienbarkeit ist Voraussetzung für den Einsatz der Geräte durch angelerntes Sicherheitspersonal.

Kosten: Beschaffungs- und Wartungskosten.

Arbeitspaket 1

Harmonisierung und Optimierung der Sicherheitsstrukturen

Arbeitspaket 1.2.1

Kommunikationsprozesse

Beschreibung des Arbeitspaketes:

Einbindung von Informationen technischer Detektionssysteme (Explosivstoffe

und Gefahrstoffe) in den Kommunikationsprozess.

Informationen, welche aus dem Einsatz technischer Detektionssysteme (Explosivstoffe und Gefahrstoffe) gewonnen werden, müssen in die Sicherheitsarchitektur eingebunden werden. Die Daten müssen rechtzeitig und in verwertbarer Form zur Verfügung gestellt werden. Die im Rahmen des Projektes eingesetzten Detektionssysteme zur Detektion von Explosiv- und Gefahrstoffen verfügen über verschiedene Darstellungs- bzw. Benutzermodi. Diese sind wahlweise sehr einfach und mit nur geringem Informationsgehalt (z.B. Explosivstoff Ja/Nein) bis hin zu sehr detailliert mit Zugang zu den Rohdaten und Spektren des Detektors. Bei zwei Systemen, welche der Identifizierung von außen zugänglicher, größerer Stoffmengen im mg-Bereich (z.B. aus Leckagen) dienen, können Spektren an Experten des Herstellers weitergeleitet werden, welche dann in unsicheren Fällen zusätzliche fachliche Unterstützung leisten können.

Die eingesetzten Systeme weisen in Ihren Einsatzmöglichkeiten Überschneidungen auf, was eine gegenseitige Absicherung der Messergebnisse ermöglicht. Grundsätzlich möglich ist aber auch, dass die Geräte bei der Untersuchung ein und derselben Substanz zu abweichenden Ergebnissen kommen. Unklare oder widersprüchliche Befunde müssen bewertet und organisatorisch aufgefangen werden.

Ziele und Arbeitsinhalte:

- Erstellung eines Entscheidungsbaums (Gewichtung der Ergebnisse der einzelnen Messgeräte, Behandlung widersprüchlicher Ergebnisse, etc.).

Beteiligte:	**Bearbeitungszeitraum:**
HBRS, FKIE, MARSIG	März 13- Okt. 13

Ergebnisse:

Es wurden Entscheidungsbäume für den Einsatz von Detektionstechnologien im Hafen (Zugangskontrolle) und an Bord (Einsatz von Detektionstechnologien nach einem Vorfall) entwickelt und den Partnern vorgestellt.

Im Falle der Nutzung von Detektionstechnologie an Bord handelt es sich um einen Konzeptentwurf, da bislang keine Nutzung entsprechender Systeme im nennenswerten Umfang stattfindet bzw. geplant ist. Das Konzept ist nicht auf bestimmte Geräte festgelegt und bindet ein an Bord befindliches Entscheidungsunterstützungssys-

tem mit ein.

Im Konzept wird vorgeschlagen im Falle von sicherheitsrelevanten Vorfällen den Ort des Vorfalles mit Lademanifest bzw. Gefahrstoffkataster abzugleichen. Auf Basis des Abgleichs wird überprüft ob an Bord geeignete Detektionsverfahren für die vor Ort vorliegenden Gefahrstoffe verfügbar sind und aussagekräftig eingesetzt werden können.

Der Entscheidungsbaum für die Zugangskontrolle beinhaltet mehrere Detektionssysteme, die teilweise parallel eingesetzt werden. Besondere Bedeutung kommt hier dem Umgang mit (falsch-) Alarmen, der Verdachtserhärtung und der Behandlung von Betriebsstörungen der Detektionssystemen zu. Der entwickelte Entscheidungsbaum basiert nicht zuletzt auf Erfahrungen, die im Rahmen von Hafensicherheitsübungen gewonnen wurden. Die berücksichtigten Detektionstechnologien werden in den im Projekt beteiligten Fährhäfen teilweise bereits jetzt zusammen oder einzeln einsetzten.

Arbeitspaket 1

Harmonisierung und Optimierung der Sicherheitsstrukturen

Arbeitspaket 1.2.2

Unterstützung eines gemeinsamen Situationsverständnisses an der Schnittstelle Schiff-Hafen

Beschreibung des Arbeitspaketes:

Beratung zum gemeinsamen Einsatz technischer Detektionssysteme für Explosiv- und Gefahrstoffe.

Die Nutzung der technischen Detektionssysteme soll in eine gemeinsame Sicherheitsarchitektur von Hafen und Schiff eingebunden werden. Dies schließt die gegenseitige Kenntnis der jeweils verfügbaren technischen Fähigkeiten und Ausrüstung mit ein. Die im Rahmen des Projektes eingesetzten Detektionssysteme verfügen teilweise über verschiedene Darstellungs- bzw. Benutzermodi. Tatsächlich wird bei zwei Systemen seitens des Herstellers vorgesehen, dass entsprechende Rohdaten im Sinne einer Hotline an Experten des Herstellers weitergeleitet werden können. So kann in unsicheren Fällen zusätzliche externe fachliche Unterstützung geleistet werden. Die externe Auswertung der Spektren kann jedoch einige Stunden Zeit in An-

spruch nehmen. Es wurde daher an einer lokalen Datenbank, mit der unklare Substanzspektren von geschultem Personal auf eine begrenzte Zahl besonders kritischer Verbindungen (Explosivstoffe) überprüft werden kann, gearbeitet. Eine Abstimmung der zwischen Hafen und Schiff auszutauschenden Informationen ist, da andernfalls die Gefahr besteht, dass die zur Verfügung gestellten Daten für den Empfänger nutzlos oder irreführend sind.

Ziele und Arbeitsinhalte:

- Unterstützung der Projektpartner bei der Einbindung technischer Detektionssysteme in die Sicherheitsstrukturen.

Beteiligte:	Bearbeitungszeitraum:
HBRS, FKIE, HSW, MARSIG, GITZ	März 13- Dez. 13

Ergebnisse:

Die Beteiligten wurden bezüglich der Möglichkeiten und Grenzen der Technologien und der verfügbaren Datenformate und deren Übertragbarkeit beraten. Es wurden Daten für die Entwicklung einer lokalen Datenbank zur Verfügung gestellt. Auf Basis der Daten wurde durch FKIE-SDF ein elektronisches Auswerteverfahren entwickelt und durch GITZ in ein für mobile Endgeräte optimiertes webbasiertes Tool integriert. Die Funktionsfähigkeit des Tools wurde zusammen mit FKIE-SDF getestet.

Arbeitspaket 1

Harmonisierung und Optimierung der Sicherheitsstrukturen

Arbeitspaket 1.3.2

Anpassung

Beschreibung des Arbeitspaketes:

Einbindung von Informationen technischer Detektionssysteme (Explosivstoffe und Gefahrstoffe) in die Risikobewertung.

Technische Detektionssysteme, insbesondere zur Detektion von Explosivstoffen und Identifizierung von Gefahrstoffen, sollen einen Beitrag zur Risikobewertung von Hafenanlagen sowie für Gegenmaßnahmen bei Vorfällen leisten. Eine zielführende Integration der Systeme in setzt die genaue Kenntnis der Einsatzbereiche und techni-

schen Möglichkeiten der im Rahmen dieses Projektes genutzten Systeme voraus.

Bei den im Rahmen des Projektes genutzten Geräten handelt es sich überwiegend um mobile, schnell-anzeigende und relativ kostengünstige Systeme, für deren Benutzung keine aufwendige Ausbildung nötig ist. Verglichen mit instrumentell-analytische Laborsystemen ist aber auch mit einer erhöhten geräte- und szenarabhängigen Fehlerwahrscheinlichkeit zu rechnen.

Zur Detektion von Explosivstoffen wird im Rahmen des Projektes ein Spurendetektor getestet, der beispielsweise auch an Flughäfen eingesetzt wird. Sprengstoffspuren können aber nur als Indiz für das Vorhandensein einer größeren Menge Explosivstoff angesehen werden. Darüber hinaus können aus Zeit- und Kostengründen in der Regel nur stichprobenartige Untersuchungen durchgeführt werden.

Die mit der Hilfe der Geräte gewonnenen Informationen sollten für die Risikobewertung aufgrund ihrer naturgemäß eingeschränkten Aussagekraft (Fehlalarmrate, indirekter Nachweis) – sofern möglich - mit weiteren Informationen (z.B. aktuelle Bedrohungslage oder zusätzliche Verdachtsmomente) abgeglichen werden. Darüber hinaus muss die Bedeutung eines Messergebnisses unter Berücksichtigung des verwendeten Gerätes, eventuellen Einschränkungen bei der Probennahme und des Einsatzszenarios gewichtet werden.

Ziele und Arbeitsinhalte:

- Einbindung von Informationen zu grundsätzlichen Parametern der verwendeten technischen Detektionssysteme in die Risikobewertung.

Beteiligte:	**Bearbeitungszeitraum:**
HBRS, FKIE	Juli 12- Feb. 13 Jan. 14- Juni 14

Ergebnisse:

Das im Projekt entwickelte Verfahren zur Risikobewertung ist statisch (Überprüfung der Risikobewertung erfolgt alle 5 Jahre) und erfasst nur grobe, allgemein gehaltene Bewertungskategorien. Eine angemessene Berücksichtigung der spezifischen Anwendungsfelder der Detektionstechnologien und kurzfristiger Weiterentwicklungen (Technik und Bedrohungslage) ist nicht möglich.

In Abstimmung mit den Projektpartnern wurde daher eine Einbindung von Detekti-

onstechnologien in die Risikobewertung als nicht sinnvoll erachtet,

Arbeitspaket 2

Technologie-Integration zur Gefahrstoffkontrolle

Arbeitspaket 2.1.2

Integration von Detektionssystemen für die Gefahrstoffkontrolle (Zugang von Schiff und Hafen)

Beschreibung des Arbeitspaketes:

Ziel ist die Integration verschiedener Detektionssysteme zur Erhöhung der Sicherheit beim Zugang zum Hafen und zum Schiff. Der Einsatz der Systeme soll in Hinblick auf die speziellen Anforderungen des Hafenbetriebs und der Fährschifffahrt optimiert werden. Hierfür ist unter Anderem zu klären in welchen Szenarien die Geräte einsetzbar sind, welcher Durchsatz erzielt werden kann und mit welchem Aufwand (zeitlich, personell und finanziell) beim Einsatz unter Berücksichtigung des ISPS-Codes und der verschiedenen Gefahrenstufen zu rechnen ist. Für einen effizienten Einsatz der Systeme müssen die Geräte in die Sicherheitsarchitekturen von Hafen und Fährschiff eingebunden sein und nach Möglichkeit zusätzliche Verdachtsmomente berücksichtigt werden. Ein Schwerpunkt liegt hier auf der schnittstellen-übergreifenden Kommunikation der gewonnenen Daten. Die Kontrolle soll sich auf Explosivstoffe, austretendes Gefahrgut und richtige Deklaration von Gefahrgut erstrecken. Zur Bestimmung von flüssigen oder festen Gefahrstoffen können marktübliche Geräte (z.B. eine Kombination aus Raman- und FTIR- Analytik bzw. speziell auf Sprengstoffe und Drogen optimierte Systeme wie z.B. der Itemiser DX) in den Ablauf integriert werden und somit zu einer Erhöhung der Sicherheit beitragen. Zusätzlich ist hier zu prüfen, in wieweit sich Neuentwicklungen, die z.B. im Rahmen der Förderung des BMBF zur Entwicklung von CBRNE Detektionssystemen und –verfahren entstanden sind, bereits jetzt in neue Konzepte eingebunden werden können.

Hierfür wird zunächst die Erfassung des aktuellen Status-quo bezüglich des Einsatzes technischer Systeme bei der Zugangskontrolle von Hafen und Schiff unter Berücksichtigung der Anforderungen aus 725/2004/EG (ISPS-Code) und der Gesamthafenrichtlinie EG/2005/65. Nachfolgend werden - unter Berücksichtigung des aktuellen Ablauf des Zugangs von Reisenden und Gütern auf Hafengelände und Fähr-

schiff- Einsatzszenarien für von Detektionssysteme identifiziert, getestet und evaluiert.

Es lassen sich folgende Einsatzbereiche identifizieren:

1. Detektion von Explosivstoffen
   Sinnvoll erscheint eine stichprobenartige oder blockweise Untersuchung, wobei weitere Verdachtsmomente berücksichtigt werden sollten (siehe hierzu FKIE-SDF). Exemplarisch für die Untersuchung des Einsatzes eines Sprengstoffspurendetektors wurde der Itemizer® ausgewählt.
2. Aufspüren verdächtiger Objekte in Gepäckstücken
   Im Rahmen einer Machbarkeitsstudie soll geprüft werden, ob ein radarbasiertes; mobiles System, welches ohne den Einsatz gefährlicher Strahlung auskommt, bei der Stichprobenkontrolle von Gepäck einen Vorteil gegenüber herkömmlichen Systemen aufweist. Aufbau und Anpassungsarbeiten an dem radarbasierten Durchleuchtungssystem werden als Unterauftrag vergeben. Die Untersuchung zur Einbindung dieser Technologie in die Zugangskontrolle zum Hafen und Schiff erfolgt durch das IDT.
3. Detektion von Gefahrgutleckagen
   Leckende Gefahrguttransporte sollen frühzeitig erkannt werden. Für die Arbeiten im Projekt wurde der GDA 2 von Airsense ausgewählt. Es handelt sich um einen hand-getragenen Gasphasendetektor, der zur Erfüllung seiner Messaufgabe mehrerer orthogonale Detektionsverfahren (IMS, PID, MOX und EC) kombiniert. Das Gerät wird bereits von Feuerwehren und dem Zoll eingesetzt. Die im Rahmen dieses Projektes angestrebte Verbesserung im Informationsaustausch zwischen Hafenbetreiber, Reeder und Behörden wird damit erleichtert.
4. Identifizierung von Gefahrstoffen.
   Es soll untersucht werden, inwieweit handgetragene und mobile Systeme zur Stoffidentifizierung einen Beitrag zur Verbesserung der Sicherheit in diesem Bereich leisten können. Hierbei ist zu beachten, dass die zu untersuchenden Stoffe zugänglich sein müssen. Für diesen Teil der Untersuchung wurden zwei auf Raman- bzw. Infrarotspektroskopie basierende Geräte beantragt. Die Geräte sind zusammen in der Lage die jeweiligen Schwächen eines Messverfahrens gegenseitig auszugleichen. Die

Stoffidentifizierung erfolgt über den Abgleich des aufgenommenen Spektrums mit einer im Gerät hinterlegten Datenbank. Die Datenbank enthält weitere Informationen (z.B. Namens-Akronyme und erste Gefahrenhinweise) die bei einer erfolgreichen Identifizierung mit ausgegeben werden können. Zusätzlich wird in Kooperation mit FKIE an der Entwicklung einer Entscheidungsunterstützung vor-Ort bei unklaren Befunden gearbeitet.

Ziele und Arbeitsinhalte:

- Beschaffung und Einarbeitung in die Messsysteme.
- Marktanalyse innerhalb der Projektlaufzeit. Test und Evaluierung der Messsysteme im Rahmen der zuvor identifizierten Einsatzmöglichkeiten.
- Erfassung von Messdaten im Hafenumfeld.
- Übergabe der ermittelten und aufgearbeiteten Einsatzparameter der Detektionssysteme an die Kooperationspartner.
- Unterauftrag Maxonic GmbH

Abschließendes Urteil über die Einsatzfähigkeiten der getesteten Technologien für die Detektion undeklarierten Gefahrgutes.

Beteiligte:	**Bearbeitungszeitraum:**
HBRS, FKIE, GITZ, ISV, HRO, Maxonic	Jan. 11- Aug. 14

Ergebnisse:

Die Messsysteme wurden beschafft und die administrativen und rechtlichen Voraussetzungen zum Umgang mit den Geräten (mobiler Einsatz einer radioaktiven Quelle oberhalb der Freigrenze, Laser Klasse 3b) geschaffen. Es erfolgte die Einarbeitung in die Systeme und Aktualisierung der Gerätesoftware.

Es wurde eine Marktanalyse durchgeführt. Einige Systeme wurden getestet. Als besonders hilfreich wird die Ergänzung der chemischen Detektionsverfahren durch fortgeschrittene optische Inspektionshilfen (Videoskope und Endoskope mit speziellen, auch IR-geeigneten Optiken und starken Beleuchtungsquellen) angesehen.

Die beschafften Geräte wurden sowohl unter Laborbedingungen als auch im Hafen – teilweise auch im Rahmen von Hafensicherheitsübungen durch zuvor eingewiesenes Fremdpersonal - evaluiert. Dabei zeigte sich, dass die Systeme im Wesentlichen den Bedingungen im Hafen gewachsen waren. Im Falle des Sprengstoffdetek-

tors Itemiser DX wurde bei der Überprüfung von teilweise sehr stark verschmutzten Fahrzeugen eine Fehlalarmrate (falsch-positiv) von < 5% gegenüber einem instrumentell analytischem Vergleichsverfahren (lösungsmittelfeuchte Wischprobennahme, Lösungsmittelextraktion gefolgt von einer Untersuchung der Extrakte mit instrumentell analytischen Verfahren) beobachtet.

Als wesentliches Einsatzszenario wurde die Zugangskontrolle zum Hafen identifiziert und überprüft. Messdaten zu diesem Szenario wurden insbesondere im Hafen Rostock im Rahmen von Testläufen und Hafensicherheitsübungen aufgezeichnet. Es wurden Daten zu Fehlalarmraten, Durchsatz, Rüstzeit sowie zum Kontrollprozess erhoben und an die Projektpartner weitergegeben bzw. allen Projektpartner vorgestellt. Insgesamt führte der Einsatz der Detektionstechnologie zu einem Sicherheitsgewinn ohne den Kontrollprozess aufzuhalten. Jedoch sind klare Anforderungen an den Aufstellungsort und an die Einbindung der Geräte in den Kontrollprozess Voraussetzung. Geschultes Personal kann die Geräte ohne großen fachlichen Hintergrund bedienen. Es wird jedoch empfohlen, auch fachlich geschultes Personal abrufbar zu haben, da bei technischen Problemen und unklaren Anzeigen der Geräte das angelernte Personal Unterstützung benötigt besondere Kenntnisse – trotz grundsätzlich einfacher Bedienbarkeit - sind insbesondre bei der Probenahme für die Handspektrometern (FirstDefender, TrueDefender) und der Interpretation der erzeugten Daten sinnvoll. Hier sollte der Nutzer über chemische Grundkenntnisse und Erfahrung beim Umgang mit Gefahrstoffen verfügen. Andernfalls besteht die Gefahr dass durch Probleme mit den Geräten der Kontrollprozess über längere Zeiträume blockiert wird. Die Einbindung von Detektionstechnologie bei Stichprobenkontrollen führen zu Mehrkosten für Personal, Technik und Verbrauchsmittel. Diese Kosten scheinen aber nach einer Studie beim Projektpartner Uni Hamburg die Keine großen Auswirklungen auf die Wirtschaftlichkeit des Fährverkehrs zu haben.

Unterauftrag Maxonic: Es wurde ein funktionsfähiges Labormuster aufgebaut. Mit dem System konnte demonstriert werden, dass mit nicht ionisierender Radarstrahlung bildgebend verpackte Objekte dargestellt werden können. Weiterführende Angaben befinden sich im Anhang „Abschlussbericht Maxonic“.

Bezüglich der Fragestellung der Detektion undeklarierter Gefahrgüter war es möglich mit Hilfe des Multisensorgasdetektors GDA 2 ausgasende Gefahrgüter von unbedenklichen Gütern zu unterscheiden. Mit einem einfacheren, robusteren und kos-

tengünstigeren Photoionisationdetektor wurden hingegen keine Detektionserfolge erziel. Kombiniert mit optischen Inspektionshilfen zur visuellem Untersuchung von Fracht können auch in der Gasphase unauffällige Abweichungen von den Frachtpapieren festgestellt werden. Basierend auf Daten des Bundesamtes für Güterverkehr wird hier eine Ereigniswahrscheinlichkeit < 1% für fehldeklarierte Güter angenommen. Für den effizienten Einsatz der technischen Geräte wird jedoch etwas Erfahrung benötigt. Im Rahmen der Untersuchten Stichprobe (circa 40 Fahrzeuge wurde keine fehldeklarierten Gefahrgüter gefunden. Bei zwei Fahrzeugen wurden erhöhte Anzeigen für unbekannte Kohlenwasserstoffe gefunden. Diese Fahrzeuge hatten Kunststoffprodukte geladen, welche – obwohl formal kein Gefahrgut – in auffälligen Mengen potentiell schädliche Stoffe freisetzten. Ein Gerät wie der GDA 2 kann hier auch einen wertvollen Beitrag zum Eigenschutz des Kontrollpersonals leisten.

Arbeitspaket 2

Technologie-Integration zur Gefahrstoffkontrolle

Arbeitspaket 2.2.1

Überwachung von Fahrzeugdecks hinsichtlich austretender Gefahrstoffe

Beschreibung des Arbeitspaketes:

Ein frühzeitiges Erkennen des Austritts von Gefahrstoffen auf dem Fahrzeugdeck, sowie die richtige Identifizierung der Substanz sind entscheidend für die rechtzeitige Gefahreneindämmung und Wahl geeigneter Maßnahmen.

Die Durchführung häufiger und gründlicher Kontrollgänge auf den Fahrzeugdecks ist aufgrund des dafür nötigen Zeitaufwands unwirtschaftlich und wegen der engen Stauung wenig praktikabel. Am erfolgversprechendsten erscheint eine Überwachung der Luft des Fahrzeugdecks über eine Absauganlage und/oder die Nutzung eines kontinuierlich arbeitenden, handgetragenen Gasdetektors zur Überprüfung bzw. Verifizierung eines Verdachtsfalles. Der bereits in AP 2.1.2 beschriebene Gasphasendetektor kann als mobiles Gerät bei Kontrollgängen mitgeführt und soll in seiner Einsetzbarkeit zur Detektion von Leckagen auf dem Fahrzeugdeck überprüft werden. Hier gilt es insbesondere zu zeigen, ob sich austretende Gefahrstoffe mit dem verfügbaren System vom sonst üblichen chemischen Hintergrund eines Fahrzeugdecks unterscheiden lassen und das System über eine ausreichende Empfindlichkeit für

die Messaufgabe verfügt. Darüber hinaus kann das System nach Modifikation in eine Absauganlage (siehe hierzu den Bericht vom Projektpartner ISV) eingebaut werden und dort zentral als empfindliches, schnelles und breitbandiges Detektionssystem eingesetzt werden.

Es soll untersucht werden, inwieweit hand-getragene und mobile Systeme zur Stoffidentifizierung einen Beitrag zur Verbesserung der Sicherheit an Bord leisten können (siehe auch AP 2.1.2).

Ziele und Arbeitsinhalte:

- Identifikation der Einsatzorte und Parameter im Schiff
- Test und Evaluierung der Messsysteme im Rahmen der zuvor identifizierten Einsatzmöglichkeiten an Bord.
- Erfassung von Messdaten auf dem Fährdeck.
- Übergabe der ermittelten und aufgearbeiteten Einsatzparameter der Detektionssysteme an die Kooperationspartner Gerät wurde in den Versuchsaufbau zur Fährdecküberwachung (ISV) integriert
- Übergabe der Messdaten an ISV zur ganzheitlichen Beurteilung des installierten Überwachungssystems

Beteiligte:	**Bearbeitungszeitraum:**
HBRS, ISV, Reedereien	März 12- Okt. 13 Verlängert bis Mai 14 (Zusätzliche Messkampagne auf einer Fähre)

Ergebnisse:

Mögliche Einsatzorte an Bord sind im Grundsatz alle Bereiche des Schiffes zu denen Passagiere zumindest kurzfristig Zugang bekommen können oder bei denen es im Rahmen von Havarien zum Austritt gefährlicher Stoffe kommen kann. Von besonderem Interesse sind das Fährdeck (Transport von Gefahrgütern, hohe Brandlast, Unübersichtlichkeit durch dicht abgestellte Fahrzeuge) und die Passagierkabinen (siehe AP 2.2.4). Letztere sind von Interesse, da hier Täter bei längeren Überfahrten unter Nutzung der in den Kabinen verfügbaren Infrastruktur gefährliche Stoffe synthetisiert werden könnten. Der Einsatz von Detektionssystemen im Rahmen einer Zugangskontrolle ist aufgrund der kurzen Be- und Entladezeiten nicht sinnvoll.

Einsatzmöglichkeiten für mobile Detektionsverfahren bestehen im Falle von gemeldeten Ereignissen wie Havarien oder entstehenden Bränden, oder aber im Rahmen der routinemäßig durchgeführten „Ronden“ (Begehungen) durch Besatzungsmitglieder. Aufgrund der vielfältigen Gefahren und der Art des Einsatzes wird hierfür ein schnell anzeigendes, mobiles, handgetragenes breitbandig Gasphasen- Detektionssystem benötigt. Der Einsatz von Sprengstoffspurendetektoren an Bord ist hingegen nicht sinnvoll, da an Bord keine Möglichkeiten zur Alarmauflösung bestehen und die Existenz von Sprengstoffspuren nicht zwangsläufig mit der Existenz einer tatsächlichen Gefahr einhergeht.

Wichtige Parameter zur Evaluierung eines mobilen Gasphasendetektors an Bord sind unter anderem Handhabbarkeit, schnelles Anzeigeverhalten, Sensitivität, Selektivität und Breitbandigkeit der Detektion, da mit einer sehr weit gefächerten chemischen Gefährdung gerechnet werden kann.

Die Evaluation des Multisensor-Gasphasendetektoren GDA 2 und eines Photoionisationsdetektors (PID) erfolgte im Rahmen von Ronden bei denen standardmäßig große Teile des Schiffes abgegangen werden. Dabei stellte sich heraus, dass die Geräte für einen Einsatz an Bord nicht geeignet sind, da sie aufgrund der teilweise sehr beengten Bedingungen an Bord zu unhandlich waren. Dabei erwies sich das mitgeführte PID als zu unempfindlich, wohingegen der deutlich empfindlichere und breitbandiger detektierende GDA 2 von den ständig wechselnden chemischen Hintergründen überfordert war.

Bei einem festinstallierten Gerät besteht jedoch die Möglichkeit die Sensorik an den vor Ort vorliegenden Hintergrund anzupassen. Es wurde ein Multisensorsystem zur Überwachung des Fährdecks hinsichtlich austretender Gasemissionen mit entsprechendem Auswertealgorithmus realisiert und erfolgreich unter Realbedingungen auf geschlossenen und halboffenen Decks getestet. Mit einer fest-installierten chemischen Sensorik ist es möglich, Gefahrstoffaustritte auch vor einem komplexen chemischen Hintergrund zu detektieren.

Die Daten wurden zusammen mit dem ISV erhoben und dem Projektpartner zur Verfügung gestellt.

Das Konzept soll im Anschluss an das Projekt in Kooperation mit einem Industriepartner weiterverfolgt werden.

Arbeitspaket 2

Technologie-Integration zur Gefahrstoffkontrolle

Arbeitspaket 2.2.2

Untersuchungen zur Erfassbarkeit orts-untypischer Dämpfe

Beschreibung des Arbeitspaketes:

Realisierung einer einfachen Sensorik für den Nachweis von Triacetontriperoxid (TATP) in der Gasphase:

Hierzu sollen im ersten Schritt kommerziell erhältliche Halbleitergassensoren auf ihre Eignung für den Nachweis von TATP getestet werden. Für diese Eignungstests gilt es eine Gasmischanlage in Betrieb zu nehmen, die in der Lage ist:

- handhabungssicher reproduzierbare Konzentrationen von TATP zu Verfügung zu stellen,
- die Untersuchung des Sensorsignals bei unterschiedlicher Luftfeuchtigkeit zu ermöglichen,
- die Untersuchung des Sensorsignals bei Anwesenheit von Störsubstanzen zu erlauben.

In einem zweiten Schritt sollen abweichen von dem kommerziell erhältlichen Zinndioxid Gassensoren Metalloxide (z.B. Indiumoxid) auf ihre Nachweisempfindlichkeit gegenüber TATP untersucht werden. Aus der Literatur sind für solche Metalloxide signifikante Sensorreaktionen gegenüber TATP zu erwarten. Hierfür müssen entsprechende Sensoren beschafft oder selbst hergestellt werden.

TATP ist im Gegensatz zu vielen anderen flüchtigen organischen Verbindungen instabil. Diese Stoffeigenschaft soll genutzt werden um die Selektivität eines Nachweissystems auf Basis von Halbleitergassensoren zu steigern und damit die Fehlalarmraten zu senken. Mit speziellen katalytischen Filtern soll gasförmiges TATP vor den eigentlichen Sensoren gezielt zersetzt werden, so dass aus resultierenden Differenzsignalen von unbeeinflusster und beeinflusster Gasphase molekülspezifische Informationen generiert werden können. Für die Auswertung dieser Informationen sind geeignete Algorithmen zu finden. Für diesen Teil der Arbeit sollen geeignete Katalysatormaterialien synthetisiert und ihr Einfluss auf die Zerfallsreaktion von TATP evaluiert werden.

Realisierung einer einfachen Sensorik zum Nachweis orts-untypischer Dämpfe:

Im Sinne einer Machbarkeitsstudie soll untersucht werden, ob mittels einfacher Sensorsysteme, das Auftreten orts-untypischer Dämpfe, wie sie bei der Herstellung von Selbstlaboraten auftreten können, detektiert werden können. Sofern möglich soll dieses Sensorsystem in herkömmliche Brandmelder integriert werden.

Sensoren die für diese Aufgabe in Frage komme sind z.B. Halbleitergassensoren, Elektrochemische Zellen oder auch einfache IR-Sensoren, die auf Grund ihrer Baugröße, ihrer Leistungsaufnahme und Ihres Preises in jeden geschlossenen Raum an Bord eingebaut werden können.

Auf der Basis derartiger Sensoren wird die Entwicklung einer Gassensorplattform angestrebt die in der Lage ist typische, bei der Herstellung von Sprengstoffen auftretende Präkursoren zu detektieren. Bedeutsame Substanzen die hierbei in der Gasphase erwartet werden sind:

- Aceton
- Wasserstoffperoxid
- Nitrose Gase
- Saure Gase (insbesondere HCL)

Diese Substanzen finden Anwendung bei der Herstellung von Explosivstoffen bzw. treten als Nebenprodukte der Synthese auf.

Um ein besseres Verständnis der zu detektierenden Gase während der Synthese zu erhalten (zu erwartende Konzentrationen, zeitlicher Verlauf) wird angestrebt in kontrollierter Umgebung typische Vertreter der Selbstlaborate herzustellen und die bei der Synthese entstehenden Gase analytisch zu erfassen.

An Bord (z.B. in einer Kabine) ist schon durch „normale Nutzung“ mit dem Auftreten einer Vielzahl von Störsubstanzen zu rechnen (z.B. Zigarettenrauch, alkoholische Getränke, Kosmetikartikel, Reinigungsmittel) diese Einflüsse müssen untersucht und bei der Entwicklung berücksichtigt werden. Hierbei sind vor allem Feldtests in realen Umgebungen unabdingbar, um das Design des Sensorsystems zu optimieren.

Ziele und Arbeitsinhalte:

- Aufbau eines automatisierten Sensorprüfstandes/ Gasmischanalage.(GMA)
- Bereitstellung einer kontinuierlich arbeitenden TATP-Quelle.
- Evaluation von geeigneten kommerziell erhältlichen Sensoren für den Gasphasennachweis von TATP
- Aufbau eines Messplatzes zur Untersuchung der katalytischen Umsetzung von TATP an Metalloxidkatalysatoren.
- Konzipierung eines Sensors auf Basis von In_2O_3.
- Klärung der Frage welche chemischen Verbindungen bei der Synthese von Selbstlaboraten in der Gasphase nachweisbar sind.
- Auswahl und Betriebsmodi von Sensoren die für den Nachweis von im Punkt „Erfassung der Gasemissionen bei Selbstlaboraten“ ermittelten Gasen
- Konzeptionierung eines Arrays aus Sensoren für den Einsatz in einer Kabine
- Aufbau eines geschlossen Versuchsraumes zur Simulation eines geschlossenen Raums.
- Test der Eignung der ausgewählten Sensoren an Bord und Anpassung bei Abweichung von Laborergebnissen.

Beteiligte:	**Bearbeitungszeitraum:**
HBRS, Reedereien	Sep. 2011- Aug 2014

Ergebnisse:

- Die GMA zur analytischen Betrachtung des Sensorverhaltens gegenüber Testgasen wurde aufgebaut und eine geeignete Apparatur zur Bereitstellung von gasförmigem TATP realisiert.
- Während der Synthese der Beispielsubstanz TATP konnten ausschließlich Präkursorsubstanzen in Form der leichtflüchtigen Lösemittelbestandteile nachgewiesen werden. Die Emissionen zeigen aber eine zeitliche Charakteristik die zur Detektion von Synthesen genutzt werden kann.
- Eine im Projekt entwickelte Sensorelektronik ermöglicht verschiedenste Betriebsmodi und Auslesemethodiken für Halbleitergassensoren. Darunter sind auch temperaturzyklische Betriebsweisen möglich, die für die TATP Sensorik den gewünschten Detektionserfolg liefern.
- Es wurde eine neue Methode zum temperaturzyklischen Betrieb von Halb-

leitergassensoren entwickelt (virtueller Sensorarray), die durch ein einzigartiges - Merkmal des reduzierenden und oxidierenden Charakters von organischen Peroxiden den selektiven Nachweis von TATP ermöglicht. Weiter ist auch die Detektion von Präkursorsubstanzen mit Halbleitergassensoren, die temperaturzyklisch betrieben werden, möglich.

- In weiteren Untersuchungen zur katalytischen Umsetzung von TATP an Metalloxiden und Fertigung von Sensoren aus entsprechendem Material (In_2O_3, SnO_2, WO_3…) konnte gezeigt werden, dass Wolframtrioxid besonders geeignet für die Detektion von TATP ist.
- Für den Nachweis der Synthese in abgeschlossenen Räumen (wie z.B. einer Schiffskabine) konnte als signifikantes Merkmal das zeitliche Emissionsverhalten des Syntheseverfahrens identifiziert werden. Dies wurde in einer Simulierten Kabine getestet und unter realen Bedingungen an Bord bestätigt. Im Vergleich zu Referenzmessungen auf Fähren konnte keine vergleichbare Emissionsquelle während der normalen Kabinen Nutzung ausgemacht werden.
- Es wurde ein Basisalgorithmus zur Detektion von TATP und Anomalien entwickelt, der als Merkmal das zeitliche Verhalten des Sensorsignals in zwei unterschiedlichen Zeitdomänen nutzt.

Arbeitspaket 2

Technologie-Integration zur Gefahrstoffkontrolle

Arbeitspaket 2.2.4 (UA GTE)

Untersuchungen zu Brandmeldesystemen

Beschreibung des Arbeitspaketes:

Die besondere Gestaltung eines linearen Rückstreu Rauchmelders mit Laser ermöglicht einen robusten Aufbau, der sich z.B. in einem Schutzrohr quasi kapseln lässt. Eine weitere Komponente wie z.B. Reflektor oder Detektor ist nicht erforderlich. Daraus folgt, dass eine besondere Stabilität der Montagepositionen nicht notwendig ist. Die Ortsauswertung des rückgestreuten Signals liefert eine Information über den Abstand des streuenden Bereichs vor dem Detektor.

Da das "Streuzentrum" weit vor dem Detektor liegt (im Gegensatz zu punktförmigen

Rauchmeldern, wo die Luft in die direkte Umgebung der Detektionselemente gelangen muss), ist ein Schutz gegen Salz/Seewasser leicht möglich.

Es ist geplant ein solches neuartiges Brandmeldesystem Im Labor aufzubauen und durch Testszenarien zu evaluieren. Dabei soll der eigentliche Detektor in seiner Leistung durch einen im 90° Winkel schwenkbaren mechanischen Halter ergänzt werden um die von einzelnen Sensorknoten überwachten Bereiche zu maximieren.

Die im Labor erlangten Erkenntnisse sind in Folge auf das reale Umfeld eines Fährdecks zu übertragen und durch Messungen auf einer Fähre zu belegen. Die dabei erlangten Erkenntnisse werden dem Projektpartner ISV zur Verfügung gestellt um das Gesamtbild über derzeitig betriebene Brandmeldesysteme und eine eventuelle Verbesserung durch neue Technologien zu vervollständigen.

Ziele und Arbeitsinhalte:

- Aufbau und Inbetriebnahme unter Laborbedingungen
- Evaluation des Brandmelders auf dem Fährdeck
- Übergabe der gewonnen Daten an ISV für die Gesamtbewertung der Brandmeldetechnik

Beteiligte:	**Bearbeitungszeitraum:**
HBRS, GTE, ISV, Reedereien	Feb. 2012- Jan 2013 Verlängert: bis Jul. 2013

Ergebnisse:

- Drei Labormustern mit unterschiedlichen Objektiven und Lasern der Klasse 2 und 3 wurde realisiert sowie schwenkbaren mechanischen Halters zur Erweiterung des Detektionsbereiches (Neigungswinkel 0-180°, Rotationswinkel 360°).
- Eine Software zur Ansteuerung und Visualisierung der Messdaten wurde erfolgreich getestet.
- Umfangreiche Labortests zur Bewertung des Gesamtsystems sowie im speziellen der Vergleich der beiden Laserklassen zur Beurteilung einer Variante des Systems.
- Die Labormuster wurden in einem Praxistest des SmokeSpot im Feldversuch unter Realbedingungen auf der MS Transrussia gemeinsam mit ISV getestet.

Arbeitspaket 3

Entscheidungsunterstützung an Bord

Arbeitspaket 3.2.1

Entwicklung eines Konzepts zur Integration von Safety- und Security-Komponenten

Beschreibung des Arbeitspaketes:

Beratung zur Interaktion von technischen Detektionssystemen (Explosivstoffe und Gefahrstoffe) und deren Einbindung in ein EUS.

Die von der Hochschule Bonn-Rhein-Sieg evaluierten Detektionssysteme sind in ihrer Einsatzfähigkeit begrenzt. Gründe hierfür sind z.B. der zeitliche Aufwand je Messung oder Leistungsgrenzen der Systeme in Hinblick auf das nachweisbare Substanzspektrum, Fähigkeit der Substanzidentifizierung, Vorgegebenen Detektionsmodi bzw. die für eine Messung notwendigen Substanzmengen. Dieses ist bei der Einbindung dieser Systeme in zu berücksichtigen.

Informationen, welche aus dem Einsatz technischer Detektionssysteme (Explosivstoffe und Gefahrstoffe) gewonnen werden, müssen angemessen in ein EUS eingebunden werden. Die Daten müssen in verwertbarer Form zur Verfügung gestellt werden.

Die eingesetzten Systeme weisen in Ihren Einsatzbereichen Überschneidungen auf. Grundsätzlich kann dies dazu führen, dass die Geräte bei der Untersuchung ein und derselben Substanz zu abweichenden Ergebnissen kommen

Ziele und Arbeitsinhalte:

- Festlegung der für die Entwicklung eines EUS benötigten Geräteparameter und Kriterien
- Fertigstellung Entscheidungsbaum (Gewichtung der Ergebnisse der einzelnen Messgeräte, Behandlung widersprüchlicher Ergebnisse, etc.)

Beteiligte:	**Bearbeitungszeitraum:**
HBRS, HSW	**Sep. 2012- Aug. 2014**

Ergebnisse:

Wichtige Kriterien und Parameter sind Leistungsgrenzen der Systeme in Hinblick auf

das nachweisbare Substanzspektrum, Fähigkeit der Substanzidentifizierung, Rüstzeit und Messzeit. Nachfragen bei den Reedern ergaben, dass sich an Bord in der Regel nur sehr einfache (z.B. Gasprobenröhrchen) oder eingeschränkt nutzbare Multisensorsysteme befinden.

Es wurde das Konzept eines Entscheidungsbaumes aufgestellt, der bei Änderung der technischen Detektionsfähigkeiten an Bord weiterentwickelt werden kann.

Arbeitspaket 4

Übungen

Arbeitspaket 4.2.2

Umgang mit Gefahrstoffsystemen

Beschreibung des Arbeitspaketes:

Der Einsatz der Detektionssysteme soll im Rahmen schnittstellenübergreifender Übungen geprobt werden. Für die Durchführung der Übungen muss zunächst sichergestellt sein, dass das Personal ausreichend für den Umgang mit den Geräten geschult wurde. Außerdem müssen die Übungsszenarien unter Berücksichtigung der Einsatzbereiche der Geräte entwickelt und vorbereitet werden. Wichtiger Teil der Übung ist die Erfassung eventueller Probleme während der Durchführung, um diese in der Zukunft mit geeigneten Maßnahmen (z.B. Verbesserung der Schulung des Personals und der Kommunikationsprozeduren) abstellen zu können.

Ziele und Arbeitsinhalte:

- Erarbeitung von Übungsszenarien
- Schulung von Personal
- Begleitung von Schnittstellenübergreifenden Übungen

Beteiligte:	**Bearbeitungszeitraum:**
HBRS, FKIE, HSW, ISV, BSH, DA-MV, DA-SH, HRO,	Aug. 2012- Aug. 2014

Ergebnisse:

Es wurden zusammen mit den Hafenbetreibern und den Sicherheitsbehörden Übungsszenarien erarbeitet, Personal im Umgang mit Detektionssystemen geschult

und sprengstoffkontaminierte Übungsobjekte hergestellt.

Für die Durchführung von Übungen am Simulator wurden Konzepte für Gefahrstoff-Szenarien an Bord entworfen und an die Projektpartner übergeben.

II.2 Die wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die Planungen der Ausgaben zu den Positionen 0812 Beschäftigte E12 - E15, 0817 Beschäftigte E1 - E11, 0822 Beschäftigungsentgelte, 0835 Vergabe Aufträge (Koop), 0843 Verbrauchsmaterial, 0846 Dienstreisen, 0850 Investitionen wurden in der Gesamtsumme nicht überschritten.

Bedingt durch Tariferhöhungen im öffentlichen Dienst und erhöhte Arbeitsleistungen in einigen Arbeitspaketen liegen die Ausgaben für Personal leicht über den geplanten Kosten. Durch Einsparungen in anderen Teilkostenbereichen konnten diese Mehrausgaben allerdings kompensiert werden.

II.3 Verwertung

Die Projektergebnisse zur Technologieintegration haben insbesondere aufgrund der starken Einbindung der Endanwender bereits jetzt einen Beitrag zur Verbesserung der Sicherheit geleistet. So ist deutlich geworden, dass die Kontrolle von Fahrzeugen unter Verwendung von Detektionstechnologien auch bei einer längerfristigen Erhöhung der Gefahrstufe problemlos möglich ist. Die getesteten Technologien sind dabei mit geringem Schulungsaufwand auch von einfachem Sicherheitspersonal einsetzbar. Neuanschaffungen von Detektionstechnologien seitens der Hafenbetreiber wurden hierbei unter Nutzung der Projekterfahrungen speziell für den LKW Bereich vorgenommen bzw. über den Sicherheitsdienstleister beauftragt.

Durch das Projekt konnte aber auch die Expertise des IDT in den Bereichen

- Einsatz von Detektionstechnologien für Explosiv- und Gefahrstoffe in realen Umgebungen eines RoRo Hafens
- Einsatzmöglichkeiten für und Entwicklung von Multisensorsystemen im Hafen zur Messung gasförmiger Gefahrstoffe sowie an Bord zur feldtauglichen Integration von Messsystemen zur kombinierten Brand und Gefahrstofferkennung auf Fährdecks
- Entwicklung und Eignung von temperaturzyklisch betriebenen Halbleitergassensoren zur Messung von orts-untypischen Gasen, die bei der Herstellung

von einfach herstellbaren Explosivstoffen wie TATP entstehen können

- Der Einsetzbarkeit von radarbasierten Durchleuchtungsmethoden von Gepäckstücken als Alternative zu Röntgentechniken
- Der Einsatzbarkeit von neuartigen linearen Brand- und Rauchmeldern, die in verstellten Bereichen wie einem Fährdeck einen Rauchherd lokalisieren können.

deutlich gesteigert werden. Detailliertere Informationen über die Verwendbarkeit und die Ergebnisse finden sich im Anhang. Aufbauend an den gesammelten Erfahrungen hat das IDT sich für mögliche Folgeprojekte beworben und wird dies auch zukünftig weiter tun. Somit ergeben sich für die Hochschule große Potentiale für eine wirtschaftliche und wissenschaftliche Anschlussfähigkeit und Weiterentwicklung.

II.4 Notwendigkeit der Förderung

Das Institut für Detektionstechnologien der Hochschule Bonn-Rhein-Sieg stellt die Ergebnisse seiner wissenschaftlichen Projektarbeiten – soweit diese keiner Geheimhaltung unterliegen oder in sich wiederum eine eventuelle Gefährdung der öffentlichen Sicherheit darstellen würden – in Form von Maßnahmen, Empfehlungen, Richtlinien und Ähnlichem zur Verfügung, um das Sicherheitsniveau im öffentlichen Raum verbessern zu können. Hierbei ist es als nicht-wirtschaftliches, hochschulgetragenes Forschungsinstitut auf öffentliche Zuwendungen zur Erbringung seiner Forschungsleistungen angewiesen.

Im Rahmen des Projekts VESPER^{Plus} wurden Arbeitspakete übernommen, die für die Zielerreichung des Vorhabens nicht verzichtbar sind und die die präventiven Maßnahmen zur Bekämpfung von terroristischen Aktivitäten im maritimen Kontext der Fährschifffahrt zum Wohle der Allgemeinheit unmittelbar stärken.

Da es sich bei den oben genannten Arbeitspaketen um reine Forschungsaktivitäten handelt, kann die Hochschule diese Arbeiten nicht aus ihrem eigenen Budget finanzieren.

II.5 Fortschritte auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Neuere Forschungsarbeiten beschäftigen sich mit Detektionsverfahren zur Bestimmung und zum Nachweis von bestimmten Substanzspuren (z.B. Sprengstoffe) in geringsten Konzentrationsbereich ppb- bis ppq. Bisher sind diese Verfahren kommerziell nicht nutzbar und im Rahmen der Projektlaufzeit wurden auch keine Fortschritte

von alternativen Methoden und Verfahren bei anderen Stellen bekannt.

II.6 Veröffentlichungen im Rahmen des Projektes

Titel		**Art**	**Jahr**
Smart Sensor Systems for Security Applications	Saarbrücken	Vortrag	2012
Detection of Explosives and Drugs	Brüssel BMBF Workshop	Poster	2012
Detektion von flüchtigen Explosivstoffen mittels Halbleitergassensoren	St. Augustin PhD-Postersession	Poster	2012
Sicherheit im Fährverkehr: Detektionstechnologien für Explosivstoffe und Gefahrstoffe im Rahmen von VESPER^{Plus}	Technische Sicherheit	Journal Beitrag	2012
Improving security for ferry boat passengers, Detection technologies for harbours and ships	InnovationsAllianz der NRW-Hochschulen	Journal Beitrag	2013
Fährdeckküberwachung mittels Multigassensorsystem in einem Rauch- Ansaugsystem Improvement of Security for the Passenger Transport on Ships (VESPER^{Plus})	St. Augustin Tag der Forschung	Poster	2013
Improvement of Security for the Passenger Transport on Ships (VESPER^{Plus})	Brüssel, NRW Innovationsallianz	Vortrag und Poster	2013
Technologieintegration zur Gefahrstoffkontrolle beim Zugang zum Fährhafenbereich (BMBF-Projekt VESPER^{Plus})	Hafensicherheitskonferenz	Vortrag	2013
Sprengstoff-Detektor für Fährschiffe: Schutz vor Terrorangriffen auf dem Wasser http://www.technikjournal.de/cms/front_content.php?idcat=59&idart=761&lang=1	Interview	Internetbeitrag	2013
Detection of triacetone triperoxide using metal-oxide semiconductor gas sensors	EnFi-Konferenz Jülich	Vortrag und Poster	2014
Detektion von Gefahrstoffen: Mobiler Einsatz von Detektionssystemen	2. F&T- Symposium der DHPol	Vortrag	2014
Technologieintegration zur Gefahrstoffkontrolle zum Fährhafenbereich (BMBF-Projekt Vesper^{Plus})	Counter IED Workshop in Ettlingen	Vortrag	2014
Detection of Triacetonetriperoxid using semiconducting gas sensors (eingereicht Nov. 2014)	Physica Status Solidi	Paper	2014

II.7 Literatur

[Amani2012] M. Amani, Y. Chu, K. L. Waterman, C. M. Hurley, M. J. Platek, O. J. Gregory, “Detection of triacetone triperoxide (TATP) using a thermodynamic based gas sensor”, Sens. Actuators B 162, 7 (2012).

[Ankara2004] Z. Ankara, T. Kammerer, “Low power virtual sensor array based on a micromachined gas sensor for fast discrimination between H_2,CO and relative humidity, Sensors and Actuators B, 2004

[Arb2011] http://www.arbeitssicherheit.de/de/html/fachbeitraege/anzeigen/ 210/Gase-im-Arbeitsschutz/ (aufgerufen am 03.05.2011)

[Aschenbruck2012] N. Aschenbruck, P. Martini, M. Meier, J. Tölle (eds.),” Designer Drugs and Trace Explosives Detection with the Help of Very Recent Advancements in Proton-Transfer- Reaction Mass Spectrometry (PTR-MS)”, Future Security, (Springer, Heidelberg, 2012), p. 366

[Banerjee2009] S. Banerjee, S. K. Mohapatra, M. Misra, I. B. Mishra, “The detection of improvised nonmilitary peroxide based explosives using a titania nanotube array sensor.”, Nanotechnology 20, 075502 (2009).

[Baumbach2005] M. Baumbach, A. Schütze, „Mikrostrukturierte Gassensoren mit nanostrukturierten gassensitiven Schichten“, Magazin Forschung der Universität des Saarlandes, 2/2005

[BBK2011] http://www.bbk.bund.de/DE/AufgabenundAusstattung/CBRN Schutz/CBRN-Erk/Messtechnik/Messtechnik_einstieg.html (aufgerufen am 03.05.2011)

[Becher2010] C. Becher, P. Kaul, J. Mitrovics, J. Warmer, " The detection of evaporating hazardous material released from moving sources using a gas sensor network”, Sens. Actuators B 146, 513 (2010).

[Bhattacharjee2008] Y. Bhattacharjee, “New Efforts to Detect Explosives Require Advances on Many Fronts”, Science 320, 1416 (2008).

[Bicego2002] Manuele Bicego, Gino Tessari, Giampietro Tecchiolli, Marco Bettinelli, “A comparative analysis of basic pattern recognition techniques for the development of small size electronic nose”, Sensors and Actuators B, p.137-144, 2002

[BMI2010] „Stellungnahme zur aktuellen Gefährdungslage, BM de Maizière, Berlin, 12.00 Uhr“; http://www.bmi.bund.de/SharedDocs/ Pressemitteilungen/DE/ 2010/11/statement2.html, aufgerufen am 22.01.2015

[Buttigieg2003] G. A. Buttigieg, A. K. Knight, S. Denson, C. Pommier, M. Bonner Denton, “Characterization of the explosive triacetone triperoxide and detection by ion mobility spectrometry”, Forensic Sci. Int. 135, 53 (2003).

[Capua2009] E. Capua, R. Cao, C. N. Sukenik, R. Naaman, “Detection of triacetone triperoxide (TATP) with an array of sensors based on non-specific interactions”, Sens. Actuators B 140, 122 (2009).

[Cargo2014] „How secure is RASCO?“ ; http://www.cargoforwarder.eu/2014 /06/11/how-secure-is-rasco/; aufgerufen am 23.01.2015

[Cull2004] H. Cullum et al; “A second survey of high explosives traces in public places”; J Forensic Sci., Vol. 49(4), p. 684-90; 2004

[Dobrokhotov2012] V. Dobrokhotov, L. Oakes, D. Sowell, A. Larin, J. Hall, A. Kengne, P. Bakharev, G. Corti, T. Cantrell, T. Prakash, J. Williams, D. N. McIlroy, “Toward the nanospring-based artificial olfactory system for trace-detection of flammable and explosive vapors”, Sens. Actuators B 168, 138 (2012).

[Dobson2010] Dobson, L. R. 2010. „Ultrasonic Activation of Triacetone Triperoxide.“ Thesis for the Degree of Master of Science, University of Nebraska - Lincoln.

[Dubnikova2011] F. Dubnikova , et al., “Role of Metal Ions in the Destruction of TATP: Theoretical Considerations”, J. Phys. Chem. A, 2011, 115 (38), pp 10565–10575

[Eberheim2003] A. Eberheim, „Qualifizierung von Halbleiter-Gassensoren für die Detektion spezifischer organischer Rauchgaskomponenten“, Dissertation, Gießen 2003

[ELP2011] http://www.elp-gmbh.de/uploads/detektion/170605.pdf; Aufgerufen am 09.05.2011

[Ewing2013] R. G. Ewing, M. J. Waltman, D. A. Atkinson, J. W. Grate, P. Hotchkiss, “The vapor pressures of explosives”, Trends Anal. Chem. 42, 35 (2013).

[Ganguly2007] Ganguly, A. and George, R. 2007. Synthesis, characterization and gas sensitivity of MoO3 nanoparticles. Bull Mater Sci 30, 2, 183–185.

[Gardn2004] Gardner J.W. and Yinon J.; “Electronic Noses & Sensors for the Detection of Explosives” Kluwer Academic Publishers; 2004

[Gründler2004] P. Gründler, „Chemische Sensoren“, Springer,2004

[Hägelen2008] Hägelen, M., Stanko, S., Essen, H., Briese, G., Schlechtweg, M., Tessmann, A.: A 3-D Millimeter-wave Luggage Scanner, IRMMW-THz 2008, Pasadena, USA, September 2008

[ICTS2012] http://www.icts.gr/wp-content/uploads/2012/03/Whitepaper-RASCargO-022010.pdf “Whitepaper: Cargo Security Screening by the RASCargO™ System”, aufgerufen am 18.07.2012.

[ISPS2004] ISPS-Code: Verordnung (EG) Nr. 725/2004 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 31. März 2004 zur Erhöhung der Gefahrenabwehr auf Schiffen und in Hafenanlagen.

[Kaul2011] P. Kaul, C. Becher, R. Makarow, S. Maurer, G. Holl, „Controlled Test Enviroment für Scientific Investigation of the Sensing Capabilities of Explosives Detection Dogs“, Proceedings of the 7th International Working Dog Conference, 2011

[Kessler2007] W. Kessler, „Multivariate Datenanalyse für die Pharma-,Bio- und Prozessanalytik“, Wiley-VHC, Weinheim, 2007

[Kohler1996] H. Kohler, N. Linke, „Detektion von Lösungsmitteldämpfen mit SnO_2 –Gassensoren durch zyklische Variation der Arbeitstemperatur und Anwendung von Mustererkennungsverfahren“, VDI Berichte Nr. 1255, 1996

[Kolla1997] Kolla P.; „Anwendung analytischer Verfahren zur Detektion versteckter Sprengstoffe -das Aufspüren von Sprengvorrichtungen“; Angew. Chem.; vol. 109; p. 829–839; 1997

[Laine2008] D. F. Laine, C. W. Roske, I. F. Cheng, “Electrochemical detection of triacetone triperoxide employing the electrocatalytic reaction of iron(II/III)-ethylenediaminetetraacetate and hydrogen peroxide”, Anal. Chim. Acta 608, 56 (2008).

[Lee1999] A.P. Lee, B.J. Reedy, “Temperature modulation in semiconductor gas sensing”, Sensors and Actuators B, 1999

[Lin2010] H. Lin, K. S. Suslick, „A Colorimetric Sensor Array for Detection of Triacetone Triperoxide Vapor”, J. Am. Chem. Soc. 132, 15519 (2010).

[Lockw2003] Lockwood J.R. et al. MacDonald J.; “Alternatives for landmine detection”. RAND, 1700 Main Street, P.O. Box 2138, Santa Monica, CA 90407-2138, www.rand.org.; 2003

[Lubczyk2010] D. Lubczyk, C. Siering, J. Lörgen, Z. B. Shifrina, K. Müllen, S. R. Waldvogel, „ Simple and sensitive online detection of triacetone triperoxide explosive”, Sens. Actuators B 143, 561 (2010).

[Maiolini2009] E. Maiolini, S. Girotti, E. N. Ferri, P. Caputa, G. Guarnieri, S. A. Eremin, A. Montoya, M. J. Moreno, M. D’Elia, “Development of chemiluminescent methods for explosives detection “, Ovidius University Annals of Chemistry 20, 57 (2009).

[Malashikhin2008] S. Malashikhin, N. S. Finney, “Fluorescent Signaling Based on Sulfoxide Profluorophores: Application to the Visual Detection of the Explosive TATP”, J. Am. Chem. Soc. 130, 12846 (2008).

[Manee2003] Maneesha S.; Sameer S.; “Explosives detection systems (eds) for aviation security”; Signal Processing; vol. 83; P. 31–55; 2003

[Matyas2010] R. Matyas, Jiri Pachman, „ Study of TATP: Influence of Reaction Conditions on Product Composition, PROPELL EXPLOS PYROT, p.31-37, 2010

[Mitrovics2004] J. Mitrovics, „Auswerteverfahren für Gassensorarrays”,Diss., Tübingen, 2004

[Moore2004] Moore D. S.; “Instrumentation for trace detection of high explosives”; Review of Scientific Instruments; vol. 75; p. 2499-2507; 2004

[NIAG2005] NATO Industrial Advisory Group; “Executiv summary: Countering Improvised Explosive Devices”; NIAG/SG-84; vol. 4; 2005

[Oxley2002] Oxley, J. C., Smith, J. L., and Chen, H. 2002. Decomposition of a Multi-Peroxidic Compound: Triacetone Triperoxide (TATP). Propellants, Explosives, Pyrotech-nics, 27, 209–216.

[Oxley2006] J. Oxley, J. Smith, “Detection and Disposal of Improvised Explosives”, (Springer, Dordrecht, 2006), p.113.

[Ramana2009] Ramana, C., Atuchin, V., Troitskaia, I., Gromilov, S., Kostrovsky, V., and Saupe, G. 2009. Low-temperature synthesis of morphology controlled metastable hex-agonal molybdenum trioxide (MoO3). Solid State Communications 149, 1-2, 6–9. [Jiao2005] Jiao, L., Yuan, H., Si, Y., Wang, Y., Zhao, M., and Wang, Y. 2005. A novel meth-od for synthesis of microstructure MoO3. Materials Letters 59, 24-25, 3112–3114.

[Räsänen2007] R.-M. Räsänen, T. Kättö, M. Nousiainen, K. Peräkorpi, M. Sillanpää, M. Utriainen, “Detecting gas phase Triuacetone triperoxide, its reactants and reference substances with aspiration ion mobility spectrometry and semiconductor sensors”, Int. J. Ion Mobil Spectrom. 10, 1 (2007).

[Reisert2012] S. Reisert, B. Schneider, H. Geissler, M. van Gompel, P. Wagner, M. J. Schöning, “Multi-sensr chip for the investigation of different types of metal oxides for the detection of H2O2 in the ppm range”, Phys. Status Solidi A, 210, p. 898- 904, 2012

[Rowell2012] F. Rowell, J. Seviour, A. Y. Lim, C. G. Elumbaring-Salazar, J. Loke, J. Ma, “Detection of nitro-organic and peroxide explosives in latent fingermarks by DART- and SALDI-TOF-mass spectrometry”, Forensic Sci. Int. 221, 84 (2012).

[Royer2012] J. E. Royer, E. D. Kappe, C. Zhang, D. T. Martin, W. C. Trogler, A. C. Kummel, „Organic Thin-Film Transistors for Selective Hydrogen Peroxide and Organic Peroxide Vapor Detection”, J. Phys. Chem. C 116, 24566 (2012).

[Ryzhikov2005] A. Ryzhikov, M. Labeau “Al_2O_3(M=Pt,Ru) catalytic membranes for selective semiconductor gas sensors”, Sensors and Actuators B, 2005

[Schütze2004] A. Schütze, A. Gramm, “Identification of Organic Solvents by a Virtual Multisensor System With Hierarchical Classification”, IEEE Sensors Journal Vol.4 No.5, 2004

[Smith2008] R. G. Smith, N. D’Souza, S. Nicklin, „A review of biosensors and biologicallyinspired systems for explosives detection“, Analyst 133, 571 (2008).

[Supothina2007] Supothina, S., Seeharaj, P., Yoriya, S., and Sriyudthsak, M. 2007. Synthesis of tungsten oxide nanoparticles by acid precipitation method. Ceramics Internation-al 33, 6, 931–936.

[Walter2011] M. A. Walter, U. Panne, M. G. Weller, „A Novel Immunoreagent for the Specific and Sensitive Detection of the Explosive Triacetone Triperoxide (TATP)”, Biosensors 1, 93 (2011).

[Wils09] A. D. Wilson, M. Baietto; “Applications and Advances in Elektronic-Nose Technologies”; Sensors; Vol. 9; p. 5099-5148; 2009

[Winnacker2006] K. Winnacker, L. Küchler, Chemische Technik. Prozesse und Produkte, Katalyse, J.Weitkamp, R. Gläser, Wiley-VCH, Weinheim, 2004-2006.

[Wombl2001] Womble P.C., Campbell C., Vourvopoulos G., Paschal J., Gacsi Z., and Hui S.; “Detection of Explosives With the PELAN System at Application of Accelerators in Research and Industry”; Sixteenth Intl. Conf. American Institute of Physics; 2001

[Yamazoe2003] N. Yamazoe, G. Sakai, “Oxide semiconductor gas sensors”, Catalysis Surveys from Asia Vol. 7, No. 1, 2003

[Zhang2010] W-H. Zhang, W-D. Zhang, L-Y. Chen, “Highly sensitive detection of explosive triacetone triperoxide by an In2O3 sensor.”, Nanotechnology 21 315502 (2010).

Anhang

Technische und wissenschaftliche Ergebnisse

zum Verbundprojekt

Verbesserung der Sicherheit von Personen in der Fährschifffahrt (VESPER^{Plus})

Teilvorhaben: „Detektionstechnologien im Hafen und an Bord" (Förderkennzeichen 13N11924)

Zeitraum: Sep.2011- Aug.2014

Ansprechpartner
Prof. Dr. Peter Kaul
Hochschule Bonn-Rhein-Sieg
Institut für Detektionstechnologien
Institut für Sicherheitsforschung
Von-Liebig-Str. 20
53359 Rheinbach
Tel: +49 2241 865-515
E-Mail: peter.kaul@h-brs.de

Inhaltsverzeichnis

I. Abbildungsverzeichnis 4

II. Tabellenverzeichnis 9

III. Abkürzungsverzeichnis 10

1 Einleitung 14

2 Im Projekt verwendete Geräte und Untersuchungsmethoden 15

2.1 LC/MS^2 -Verfahren 15
2.1.1 LC/MS^2 Analyse von TATP 15
2.1.2 LC/MS^2 Analyse von Lösungsmittelextrakten auf TNT, RDX, HMX, PETN, 2,4-DNT, 2,6-DNT, 1,3-DNB, Tetryl, 2-Amino-4,6,-Dinitrotulol, 4-NT 16

2.2 GC-FID-Verfahren 17

2.3 GC-TDU-MS-Verfahren 18

2.4 Ionenchromatographie (IC) 19

2.5 Fourier-Transformations-Infrarotspektrometer- Spektrometer 20

2.6 GDA 2 (Multisensorgasphasendetektor) 20

2.7 Itemiser DX (Sprengstoffspurendetektor) 22

2.8 FirstDefender RM (Raman-Handspektrometer) 23

2.9 TrueDefender FT (IR-Handspektrometer) 23

2.10 MiniRAE3000 (PID Gasphasendetektor) 24

2.11 Explonix (Sprengstoffspurendetektor) 24

2.12 Benutzung und Aufarbeitung der PU-Wischer für die Referenzanalytik 24
2.12.1 Wischprobennahme mit PU-Wischern 25

2.13 Auswahl der zu beprobenden Flächen für die Sprengstoffspurendetektion an Kontrollobjekten 26

3 Identifizierung von Szenarien für den Einsatz von Detektionstechnologien 27

3.1 Einsatz von Detektionstechnologien im Hafen 27

3.2 Einsatz von Detektionstechnologien auf dem Schiff 27

4 Einbindung von Detektionssystemen – Hafen 28

4.1 Evaluierung der Messsysteme 29
4.1.1 Detektion von Sprengstoffspuren 30
4.1.2 Detektion flüchtiger Gefahrstoffe 38
4.1.3 Identifizierung unbekannter Stoffe 43
4.1.4 Visuelle Inspektionshilfe 47
4.1.5 Radardurchleuchtung von Objekten 48

4.2 Einbindung der Messsysteme in die Sicherheitsarchitektur 48

5 Einbindung von Detektionssystemen – Schiff 52
5.1 Evaluierung der Messsysteme 52
5.1.1 Detektion flüchtiger Gefahrstoffe....52
5.1.2 Identifizierung unbekannter Stoffe 55
5.1.3 Überwachung des Fahrzeugdecks hinsichtlich austretender Gefahrstoffe. ..56
5.1.4 Linearer Brandmelder 72
5.1.5 Entwicklung eines Systems zur Luftüberwachung auf orts-untypische Gase73
5.1.6 Evaluierung von Sensoren auf Basis verschiedener Metalloxide....101
5.1.7 Entwicklung katalytisch wirkender Vorfilter zur Selektivitätssteigerung von Halbleitergassensoren 106

6 Anhänge: Abschlussberichte der Unterauftragnehmer 133

I. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: GDA 2 mit Messlanze (unten links); Balkenanzeige und Zuordnung der Messkanäle zu den unterschiedlichen Sensoren des Gerätes. 21

Abbildung 2: Sprengstoff- und Drogenspurendetektor Itemiser DX 22

Abbildung 3: PU-Wischer mit Einweg-Zentrifugenröhrchen für Transport und Extraktion 25

Abbildung 4: Wischprobennahme mit PU-Wischer am Kofferraumöffnungsknopf/Schlüsselloch eines PKWs 26

Abbildung 5: TNT-Rückstände auf zuvor sauberen Polystyrolflächen nachdem diese mit einem kontaminierten Teflonwischer (Itemiser DX) nacheinander beprobt worden sind (N=3). 32

Abbildung 6: TNT-Rückstände auf zuvor sauberen Polystyrolflächen, nachdem diese mit einem kontaminierten Faserfilzwischer (Itemiser DX) nacheinander beprobt worden sind (N=3). 32

Abbildung 7: TNT-Rückstände auf zuvor sauberen Papierwischtuch nachdem diese mit einem kontaminierten Faserfilzwischer (Itemiser DX) nacheinander beprobt worden sind (N=3). 33

Abbildung 8: Kontrollstelle im Hafen Rostock im Rahmen einer Hafensicherheitsübung. Der Itemiser DX ist im blauen Container aufgebaut, welcher sich in unmittelbarer Nähe zur mit Pylonen markierten Kontrollspur befindet. das Gerät wurde nach kurzer Einweisung durch Mitarbeiter der Firma Securitas bedient. 34

Abbildung 9: Prozentuale Verteilung der Anzeigen bei der Kontrolle von Fracht-LKW (N=88) mit dem im Dual-Modus betriebenen Itemiser DX. Mit dem instrumentell-analytischer Referenzverfahren konnte an keinem LKW Explosivstoff nachgewiesen werden. 37

Abbildung 10: Einsatz des PID MiniRAE3000 zur Kontrolle des Gasatmosphäre im Laderaum eines LKW 39

Abbildung 11: Netplot der Sensorkanäle; Blau: Mittelwert und Standardabweichung der unauffälligen LKW sowie Messdaten von 4 LKW mit ausgasenden Gefahrstoffladungen (Grün und Rot: 90 UN 2211 (Schäumbare Polymerkügelchen, entzündbare Dämpfe abgebend) und 80 UN 2794 (Batterien (Akkumulatoren) nass, gefüllt mit Säure, elektrische Sammler). 42

Abbildung 12: Links: TruDefender FT (IR-Handspektrometer) mit dem separaten Probenaufnehmer („Crusher“); Rechts: FirstDefender RM (Raman-Handspektrometer) mit Transportkoffer 44

Abbildung 13: Inspektion der Ladefläche eines verschlossenen LKWs mit

einem Endoskop.....47

Abbildung 14: Ausgewählte Objekte und Symbole der eEPK 50

Abbildung 15: Schwankungsbreite der Anzeigen der Messkanäle des GDA 2 an Bord der MS Mecklenburg-Vorpommern (in Blautönen) und obere Grenze der Schwankungsbreite bei der Kontrolle von Ladeflächen unauffälliger LKW (rot).....53

Abbildung 16: Schematischer Aufbau des Sensorsystems. Neben der eigentlichen Sensorik sind auch Stromversorgung und Steuer- und Regeleinheiten innerhalb der Box untergebracht. 59

Abbildung 17: Versuchsaufbau des Rauchgasansaugsystem für die ersten Laborversuche. 60

Abbildung 18: Versuchsaufbau zur Kalibrierung des Sensorsystems. 62

Abbildung 19: Kalibrierung des Sensors PID AH mit Aceton im Konzentrationsbereich von 0,1 bis 8ppm. 62

Abbildung 20: Kalibrierung der elektrochemischen Zelle EC-NO mit Stickstoffmonoxid im Konzentrationsbereich von 0,1- 8ppm. 63

Abbildung 21: Gemessene Konzentration zur Bestimmung der Verdünnung innerhalb des Ansaugsystems 64

Abbildung 22: Zeit bis zur eindeutigen Anzeige eines Analyten nach Exposition direkt vor Ansaugöffnung eins, drei und acht.....65

Abbildung 23: Zeit bis zur eindeutigen Analytexposition bei unterschiedlicher Entfernung der Analytquelle auf Höhe von Ansaugöffnung 3.....66

Abbildung 24: Hauptkomponentenanalyse der Sensorsignale aller verwendeten Sensoren. Die in Punktwolken zusammenliegenden Messungen einer Substanz sprechen für die gute Separierung der Stoffe untereinander. 67

Abbildung 25: Hauptkomponentenanalyse der Sensorkanäle des GDA 2 68

Abbildung 26: Ablaufschema des Klassifikationsalgorithmus. Links: die im Einzelnen ablaufenden Schritte der Klassifizierung. Rechts: Kurzanmerkungen und Erläuterungen.....69

Abbildung 27: Geometrische Betrachtung der PCA. A: Ausgangsdaten, B: gedrehtes Koordinatensystem, C: Elimination nicht benötigter Hauptkomponenten (Achsen).....72

Abbildung 28: Aufbau der Syntheseapparatur für TATP 73

Abbildung 29: Spektren Verlauf zur Synthese von TATP. Das Spektrum wird über die gesamte Messzeit von den Banden des Acetons dominiert. Charakteristisch sind die Banden im Fingerprintbereich bis 1500 cm^{-1}, die Carbonylbande bei ca. 1750 cm^{-1}, sowie die charakteristische doppelte CH-Valenzschwingungen oberhalb von 3000 cm^{-1}. 75

Abbildung 30: Molekülstruktur Triacetontriperoxid 76

Abbildung 31: Schematischer Aufbau der Gasmischanlage 77

Abbildung 32: Temperiertes Gas durchströmtes Analytdepot mit Peltierkühlung. 78

Abbildung 33: Elektronik für temperaturzyklischen Betrieb von Halbleitergassensoren (links Bild einer bestückten Platine, rechts Platinen Layout).....79

Abbildung 34: Blockschaltbild der modularen Sensorelektronik für die Sensorik für TATP und Explosivstoff-Präkursorsubstanzen. 80

Abbildung 35: Reaktion von 1ppm TATP auf die Sensoren GGS 1533 (SnO_2) sowie GGS 5533 (WO_3) bei verschiedenen Sensortemperaturen.....84

Abbildung 36: Sensorreaktion des Sensors GGS 1533 auf TATP, DADP, DTBP und Aceton.....85

Abbildung 37: Sensorreaktion des Sensors GGS 2533 auf TATP, DADP, DTBP und Aceton.....85

Abbildung 38: Sensorreaktion des Sensors GGS 3533 auf TATP, DADP, DTBP und Aceton.....86

Abbildung 39: Sensorreaktion des Sensors GGS 4533 auf TATP, DADP, DTBP und Aceton.....86

Abbildung 40: Sensorreaktion des Sensors GGS 7533 auf TATP, DADP, DTBP und Aceton.....87

Abbildung 41: Sensorreaktion des Sensors GGS 5533 auf TATP, DADP, DTBP und Aceton. Die oxidierende Reaktion ist jeweils im unteren und die reduzierende im oberen Teil der Grafik dargestellt. 87

Abbildung 42: relatives Signal der Sensoren GGS 1533 und GGS 5533 bei unterschiedlicher Luftfeuchtigkeit 88

Abbildung 43: Sensorantwort des Sensors GGS 1533 bei 100 °C gegen Konzentration im Bereich 12ppb bis 3ppm.....89

Abbildung 44: Sensorantwort des Sensors GGS 5533 bei 100 °C gegen Konzentration im Bereich 12ppb bis 3ppm.....89

Abbildung 45: Temperaturzyklischer Betrieb des Sensors GGS 1533 (SnO_2-basiert). Dargestellt ist in Rot das Temperaturprogramm des Sensors und in Schwarz der Widerstand der sensitiven Schicht.....91

Abbildung 46: Temperaturzyklischer Betrieb des Sensors GGS 5533 (WO_3-basiert). Dargestellt ist in Rot das Temperaturprogramm des Sensors und in Schwarz der Widerstand der sensitiven Schicht.....92

Abbildung 47: Exemplarische Sensorantwort auf den Temperaturzyklus mit

Sensor GGS 5533 auf Luft, Aceton und TATP 93

Abbildung 48: Versuchskammer zur Simulation eines geschlossenen Raums mit integrierter Lüftung und Sensorik..... 94

Abbildung 49: Signalverläufe der mit konstanter Temperatur betriebenen Sensoren UST5533 (100 °C, 300 °C) bei der Synthese von TATP. 96

Abbildung 50: Aus dem temperaturzyklisch betriebenen Gassensor UST5533 extrahierte Signalverläufe bei der Synthese von TATP. Dargestellt sind sechs Datenpunkte (0, 10, 50, 100, 150, 199) die jeweils unterschiedliche Zeitpunkte innerhalb des Temperaturzyklus repräsentieren (vgl. Abbildung 47) 96

Abbildung 51: Test einer Aceton- und TATP-Quelle im Versuchstand Simulation eines geschlossenen Raumes. Dargestellt sind sechs Datenpunkte (0, 10, 50, 100, 150, 199) die jeweils unterschiedliche Zeitpunkte innerhalb des Temperaturzyklus repräsentieren (vgl. Abbildung 47) 97

Abbildung 52: Mobile Sensoreinheit zur Kabinenluft Überwachung 99

Abbildung 53: Simulation einer Synthese innerhalb der Kabine an Bord und Vergleich mit einem typischen Ereignis der Deodorantbenutzung in der Waschkabine. 100

Abbildung 54: Hintergrundbelastung während der normalen Nutzung der Kabine an Bord über ca. 18 Stunden 100

Abbildung 55: Oben: Sensorchip auf TO39 Sockel Unten: Nahaufnahme eines unbeschichteten Sensorchips mit Interdigitalstruktur. 102

Abbildung 56: Sinterprofil zur Konsolidierung der Metalloxidschichten 103

Abbildung 57: Lichtmikroskopische Aufnahmen der mit den unterschiedlichen Metalloxiden beschichteten Substrate. 104

Abbildung 58: Relatives Sensorsignal der Hergestellten Metalloxidsensoren bei 1ppm TATP und 50% rel. Luftfeuchte im Temperaturbereich 100 °C- 400 °C 105

Abbildung 59: Oben: Bild des Katalysatorprüfstandes die einzelnen Bestanteile sind farblich hinterlegt. Unten: Schema des Prüfstandes bestehend aus geregelter Luftversorgung, Ventilblock und TATP-Quelle, Ofen zur Temperierung des Katalysators sowie Analyse Geräte (FTIR- und Massenspektrometer. 107

Abbildung 60: Apparatur zur Beschichtung der Korundkugeln: 1) KPG-Rührer, 2) Rückflusskühler, 3) Pt100-Temperaturfühler, 4) pH-Elektrode, 5) Drehalsrundkolben, 6) Heizpilz 109

Abbildung 61: Korundkugeln vor und nach der Beschichtung mit Fe2O3 109

Abbildung 62:: Zersetzungsspektren (FTIR) bei unbeschichteten Kugeln im zweiten Reaktor 111

Abbildung 63: Zersetzung am SnO_2-Katalysator 112

Abbildung 64: Zersetzung von TATP am Fe_2O_3-Katalysator 113

Abbildung 65: Zersetzung am In_2O_3-Katalysator 114

Abbildung 66: Zersetzungsspektren am CuO-Katalysator 115

Abbildung 67: Zersetzungsspektren am Cr_2O_3-Katalysator 116

Abbildung 68: Zersetzungsspektren an der WO_3-Probe 117

Abbildung 69: TATP-Zerfallsspektren am MoO_3-Katalysator 119

Abbildung 70: Mess- und Referenzspektrum der unbeschichteten Kugeln bei 250 °C 121

Abbildung 71: Mess- und Referenzspektrum der Zerfallsprodukte am SnO_2-Katalysator bei 250 °C 122

Abbildung 72: Vergleich der Mess- und Referenzspektren des Fe_2O_3-Katalysators 123

Abbildung 73: CuO-Spektrum bei 300 °C und das angepasste Literaturspektrum von CO_2 125

Abbildung 74: In_2O_3-Spektrum bei 300 °C und das zugehörige Referenzspektrum in der Übersicht 126

Abbildung 75: Messspektrum bei 250 °C im Vergleich mit dem Referenzspektrum der Cr_2O_3-Probe 128

Abbildung 76: Mess- und Referenzspektrum der WO_3-Probe bei 250 °C 129

Abbildung 77: Mess- und Referenzspektrum der MoO_3-Probe bei 250 °C 130

II. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Identifikationswahrscheinlichkeit einiger ausgewählter einfacher Gemische durch die Handspektrometer. Als richtige Identifikation wurde gewertet, wenn der Hauptbestandteil (Ammoniumnitrat) vom Gerät als sicherer oder wahrscheinlicher Inhaltsstoff angezeigt wurde. 46

Tabelle 2: Messwerte (GDA 2, MiniRAE3000) bei einer Ronde auf der MS Mecklenburg-Vorpommern. Rot markiert sind Schiffsbereiche mit Anzeigen des GDA 2 oberhalb der für die Kontrolle von LKW festgelegten oberen Schwankungsbreite (Alarmschwelle bei LKW-Kontrolle) 55

Tabelle 3 Verwendete Testgase. Auswahl aus den Gasanalysen des Projektpartners ISV. 57

Tabelle 4 Auflistung der im System verbauten Sensoren. Die Auswahl der Sensoren deckt ein weites Spektrum von Zielgasen ab. Neben der breitbandigen Erfassung verschiedener Kohlenwasserstoffe sind spezielle Sensoren für den Nachweis von NO, NO_2 sowie CO vorgesehen. 59

Tabelle 5: Untersuchte Analyten und untersuchte Konzentrationen für den Nachweis der Substanzen mit Halbleitergassensoren 81

Tabelle 6: Untersuchte Sensoren mit Herstellerangaben zur Betriebstemperatur und Anwendungsfall 82

Tabelle 7: Verbindungen die als Reaktionsprodukte des TATP- Zerfalls das Referenzspektrum bilden, welches an das Messspektrum angepasst wurde. 120

Tabelle 8: Zerfallsprodukte am SnO_2-Katalysator 122

Tabelle 9: Komponenten des Fe_2O_3-Referenzspektrums 123

Tabelle 10: Bandenquotient im Vergleich mit den Oberflächen der In_2O_3- und CuO-Proben 126

Tabelle 11: Komponenten des Cr_2O_3-Referenzspektrums 129

Tabelle 12: Komponenten der WO_3- und MoO_3-Referenzspektren 131

III. Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
ADC	Analog-to-Digital-Converter
AFP	Amplifying fuorecence poymere
Al2O3	Aluminium(III)oxid
BAG	Bundesamt für Güterverkehr
CH2O	Formaldehyd
CO	Kohlenmonoxid
CO2	Kohlendioxid
Cr2O3	Chrom(III)oxid
CuO	Kupfer(II)oxid
DAC	Digital-to-analog converter
DADP	Diacetondiperoxid
DeHaBo	Detektionstechnologien im Hafen und an Bord
DIAL	Differential absorption
2,4-DNT	2,4-Dinitrotoluen
2,6-DTN	2,6-Dinitrotoluen
DSTL	Defence Science and Technology Laboratory
DTBP	Di-tert-butylperoxid
e-	Elektron
EC	Elektrochemische Zelle
EDX	Energiedispersive Röntgenspektroskopie
eEPK	Erweiterte Ereignisgesteuerte Prozesskette
EtOH	Ethanol
EUS	Entscheidungs- Unterstützungssystem
Fe2O3	Eisen(III)oxid
FKIE-MMS	Fraunhofer Institut für Mensch-Maschine-Systemtechnik
FKIE-SDF	Fraunhofer Institut für Sensordaten- und Informationsfusion
FT/IR	Fourier-Transform-Infrarotspektrometer
GC	Gaschromatographie
GC-CLD	Gaschromatographie- Chemilumineszenz-Detektor
GC-FID	Gaschromatograph- Flammenionisationsdetektor
GC-MS	Gaschromatographie-Massenspektrometrie

GC-TEA	Gaschromatographie-Thermal Energy Analyser
GITZ	Gauß-IT-Zentrum
GMA	Gasmischanlage
GUNDI	Gefahrgut-Datenbank im Internet
H2	Molekularer Wasserstoff
H2O	Wasser
H2O2	Wasserstoffperoxid
H-BRS	Hochschule Bonn-Rhein-Sieg
HCl	Salzsäure
HMTD	Hexamethylentriperoxiddiamin
HMX	Oktogen
IC	Ionenchromatographie
IED	Improvised explosive device
IMS	Ionen-Mobilitäts-Spektrometer
In2O3	Indium(III)oxid
IR	Infrarot
ISPS	International Ship and Port Facility Security Code
ISV	Institut für Sicherheitstechnik/Schiffssicherheit e.V.
ITMS	Ion - Trap - ion - Mobility Spectrometer
KNN	K-nearest-neighbor
LC-MS	Flüssigchromatographie mit Massenspektrometrie-Kopplung
LIBS	laserinduzierte Plasmaspektroskopie
LIDAR	Light detection and ranging
MCU	Microcontroller
MEMS	Microelectromechanical systems
MFC	Mass Flow Controller
MO3	Molebdän(VI)oxid
MOX	Metalloxid-Gassensor
MS	Massenspektrometrie
NO	Stickstoffmonoxid
NO2	Stickstoffdioxid
4-NT	4-Nitrotoluen
O2	Molekularer Sauerstoff
OpAmp	Operationsverstärker

PCA	Principal component analysis
PETN	Nitropenta
PID	Photoionisazionsdetektor
PS	Polystyrol
PSO	Port-security-officer
PU	Polyurethan(-schaum)
PWM	Puls-Weiten-Modulation
RAMAN	Raman-Spektroskopie
RAS	Rauchansaugsystem
RASCargO	Remote Air Sampling for Canine Olfaction
RASCO	Remote Air Sampling for Canine Olfaction
RDX	Hexogen
RedOX	Reduzierend/Oxidierend
REM	Rasterelektronenmikroskop
SAW	surface acoustic wave
SD	Secure Digital Memory
Semtex 1A	Plastiksprengstoff
SERS/SERRS	Surface-enhanced Raman spectroscopy/surface-enhanced resonance Raman scattering
SnO2	Zinn(IV)oxid
SSO	Ship Security Officer
Syn.Air	synthetische Luft (79,5% N2 21,5% O2)
TATP	Triacetontriperoxid
TIC	toxic industrial chemical
TNT	Trinitrotoluen
Ts	Schmelztemperatur
T-Zyklus	Temperatur-Zyklus
UART	Universal Asynchronous Receiver Transmitter
UEG	Untere Explosionsgrenze
USBV	Unkonventionelle Spreng- oder Brandvorrichtung
UV	Ultraviolet
UWB	Ultrabreitbandtechnik
VESPER	Verbesserung der Sicherheit von Personen in der Fährschifffahrt
VOC	volatile organic compound

WO_3	Wolfram(VI)oxid
XRD	X-ray diffraction
ZnO	Zink(II)oxid

1 Einleitung

Der Anhang „Technische und wissenschaftliche Ergebnisse“ aus dem Teilprojekt „DeHaBo“ enthält eine detaillierte Beschreibung aus den im Abschlussbericht genannten kurzgefassten Arbeitsergebnissen, in denen die Hochschule Bonn-Rhein-Sieg im Projekt VESPER^{Plus} beteiligt war. Der besseren Lesbarkeit wegen wird in diesem Anhang nicht nach Arbeitspaketen unterscheiden sondern es wird eine inhaltlich zusammenhängende Beschreibung vorgenommen.

Im Rahmen des Projektes wurden Detektorsysteme für Explosivstoffe und Gefahrstoffe in die seitens des ISPS-Codes geforderten Kontrollen im Hafenbereich (ein an Bord bringen wird verhindert) und an Bord zur Identifizierung von Gefahr- und Explosivstoffen (Reaktion auf mögliche Gefährdungen auf See einschließlich Bränden, sowie die Überwachung geschlossener Räume hinsichtlich orts-untypischer Substanzen, die beim Bau von unkonventionellen Spreng- und Brandvorrichtungen auftreten) integriert. Gesamtziel war, eine deutliche Erhöhung der Sicherheit im Fährbetrieb zu erreichen, wobei eine fortbestehende Funktions- und Leistungsfähigkeit sowie Wirtschaftlichkeit des Fährschifffahrtsbetriebes aufrechtzuerhalten ist.

2 Im Projekt verwendete Geräte und Untersuchungsmethoden

Die nachfolgenden Kapitel enthalten eine Übersicht über die verwendeten Methoden und Geräte, die im Projekt verwendet wurden. Dies beinhaltet analytische Begleitmessungen und die Detektionssysteme, die evaluiert wurden (siehe hierzu auch die Beschreibungen und Ergebnisse im Abschlussbericht).

2.1 LC/MS^2 -Verfahren

Das LC-MS^2-Verfahren wurde als Referenzanalytik zur quantitativen Bestimmung von Explosivstoffen verwendet. Die nachfolgende Auflistung zeigt die wichtigsten Parameter der verwendeten Methode.

2.1.1 LC/MS^2 Analyse von TATP

Geräte:

LC:	Agilent 1200 System mit:
MS:	AB Sciex QTrap 5500 Triple Quadrupole-System

Methode LC:

Säule:	Phenomenex Luna 3 µm C18(2), 150 x 2 mm
Laufmittel:	400 µL/min 65 % Acetonitril mit 10 mMol Ammoniumacetat und 35 % Wasser mit 10 mMol Ammoniumacetat
Laufzeit:	isokratisch 6 min
Temperatur:	20 °C
Injektion:	20 µL

Methode MS:

Acquisition Information:

Scan Type:	MRM (MRM)
Polarity:	Positive
Ion Source:	Turbo Spray (ESI)
Resolution Q1:	Unit
Resolution Q3:	Unit

Parameter Table:

CUR: 20.00
CAD: Medium
TEM: 450.00
GS1: 60.00
GS2: 60.00
IS: 5500.00

2.1.2 LC/MS^2 Analyse von Lösungsmittelextrakten auf TNT, RDX, HMX, PETN, 2,4-DNT, 2,6-DNT, 1,3-DNB, Tetryl, 2-Amino-4,6,-Dinitrotulol, 4-NT

Geräte :

siehe TATP LC-MS^2-Verfahren

Methode LC

Säule: Phenomenex Luna 3 µm C18(2), 150 x 2 mm

Laufmittel: 200 µL/min 60 % Acetonitril mit 10 mMol Ammoniumacetat und 40 % Wasser mit 10 mMol Ammoniumacetat

Laufzeit: isokratisch 13,5 min

Temperatur: 25 °C

Injektion: 20 µL

Methode MS

Acquisition Information:

Acquisition Method: 2012-05-14 Explosivstoffe-13-5min-20ul.dam

Period 1:

Scan Type: MRM

Polarity: Negative

Ion Source: Turbo Spray (ESI)

Resolution Q1: Unit

Resolution Q3: Unit

Parameter Table:

DP: -45
EP: -8
CUR: 20.00
CAD: Medium
TEM: 450.00

GS1: 60.00
GS2: 60.00
IS: -4500.00

2.2 GC-FID-Verfahren

Das GC-FID-Verfahren wurde als weitere Referenzanalytik zur quantitativen Bestimmung von Explosivstoffen verwendet. Die nachfolgende Auflistung zeigt die wichtigsten Parameter der verwendeten Methode.

Geräte:

GC:	PE AutosystemGC with built-in Autosampler
Säule:	Agilent HP 5-MS, 30 m x o,25 mm, o,25 µm Belegung

Methode:

Channel Parameter
Channel A

Delay-Time:	0,00 min
Run Time:	6,00 min
Sampling Rate:	12,500 pts/s
Autosampler Injektion:	1,0 µL
Trägergas:	Helium 14,0 PSIG
Ventilstellung:	Split on, Splitverhältnis manuell auf 50:1 eingestellt
Detektor:	FID, Range 1

Temperaturen

Injektor:	100 °C
Detektor:	250 °C

Ofenprogramm:

Initial Temp.:	40 °C
Initial Hold:	1 min
Ramp 1:	40,00 °C/min auf 160 °C
Hold time:	2,00 min
Total run time:	6,00 min

2.3 GC-TDU-MS-Verfahren

Das GC-TDU-MS-Verfahren wurde zur quantitativen Bestimmung gasförmigen Substanzen verwendet. Die gasförmigen Substanzen wurden zuvor aus der Gasphase auf Adsorbensmaterialien angereichert. Die nachfolgende Auflistung zeigt die wichtigsten Parameter der verwendeten Methode.

Geräte:

GC:	Agilent 7890A GC mit
MS:	Agilent 5975C inert MSD
TDU:	Gerstel TDU und MPS
Säule:	max. 450 °C: 30 m x 250 µm x 0.25 µm DB-5ms

Oven Program

Initial:	40 °C for 1 min
Ramp 1:	60 °C/min to 160 °C for 2 min
Ramp 2:	80 °C/min to 240 °C for 1 min
Total run time:	7 min
Split Ratio:	50:1
MSD Transfer Line:	200 °C for 0 min

GERSTEL CIS TEMPERATURE PROGRAM

Initial Temperature:		-50 °C
Equilibration Time:		0.50 min
Initial Time:		0.10 min
Ramp 1:	Rate:	12.00 °C/s
End Temp:		150 °C
Hold Time:		1.00 min

GERSTEL TDU TEMPERATURE PROGRAM

Initial Temperature:		30 °C
Delay Time:		0.50 min
Initial Time:		0.50 min
Ramp 1:	Rate 1:	80.0 °C/min
End Temp :		270 °C
Hold Time:		1.00 min
Transfer Temp:		150 °C

Desorption Mode:	Splitless
MSZones	
MS Source:	200 °C
MS Quad:	150 °C

GC-MS-Verfahren (Direkteinspritzung):

Geräte:

GC:	Agilent 7890A GC mit
MS:	Agilent 5975C inert MSD
Säule:	max. 450 °C: 30 m x 250 µm x 0.25 µm DB-5ms

Oven Program

Initial:	40 °C for 1 min
Ramp 1:	60 °C/min to 160 °C for 2 min
Run Time:	5 min
Mode:	Splitless
MSD Transfer Line:	100 °C for 0 min

GERSTEL MPS Liquid Injection

Inj. Volume:	1.0 µL
MSZones:	MS Source: 200 °C
MS Quad:	150 °C

2.4 Ionenchromatographie (IC)

Als weitere Referenzmethode für anorganische Bestandteile zur Analyse von Lösungsmittelextrakten auf Nitrat, Nitrit, Sulfat und Chlorat wurde die Ionenchromatographie verwendet. Die nachfolgende Auflistung zeigt die wichtigsten Parameter der verwendeten Methode.

System:

Gerät:	IC 861 Advanced Compact 2 Metrohm
Autosampler:	863 Compact Autosampler
Vorsäule + Säule:	Metrohm, METROSEPP A SUPP 5, 250 mm * 4 mm
Guard:	METROSEPP A Supp4/5, 5 mm* 4 mm
Software:	IC Net 2.3

Methode:

Laufmittel:	3,2 mmol/L Na2CO3 + 1mmol/L NaHCO3 und 5% Aceton in Reinstwasser
Supressor:	Regenration mit 50 mmol/L H2SO4 in Reinstwasser, Spülung mit Reinstwasser
Flussrate:	0,70 mL/min
Detektor:	Leitfähigkeit; Maximalausschlag 250 µS/cm
Injektionsvolumen:	20 µL
Laufzeit:	30 min

2.5 Fourier-Transformations-Infrarotspektrometer- Spektrometer

Das verwendete Gasphasen FTIR wurde unter anderem zur Analyse der Gasphase bei der Synthese von Explosivstoffen, so wie als Analysewerkzeug bei der Untersuchung der katalytischen Umsetzung von TATP an Modellkatalysatoren eingesetzt. Die dabei erhaltenen spektroskopischen Informationen wurden mittels einer Analysesoftware und den Vergleich mi Referenzspektren ausgewertet.

Gerät:

Hersteller:	Gasmet
Model:	CX4000
Software:	Calcmet
Messzelle:	50 °C
Strahlungsquelle:	SiC-Keramik. 1550 K
Detektor:	MCT
Messfrequenz:	0,003- 1 Hz

2.6 GDA 2 (Multisensorgasphasendetektor)

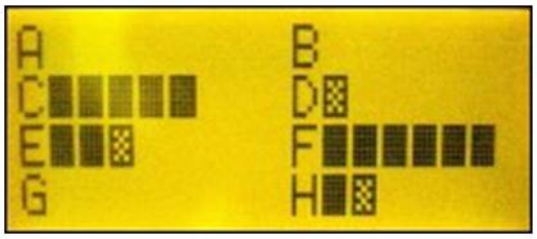
Hersteller: Airsense GmbH, Deutschland

Siehe auch Abschlussbericht.

Der GDA 2 enthält neben einem IMS (für positive und negative Ionen), ein PID, zwei

Metalloxidsensoren (MOS, für oxidierende und reduzierende Gase) sowie eine elektrochemische Zelle (EC) für dissoziierbare Stoffe. Die Signale der Sensoren des Gerätes werden dem Gerätenutzer im Form einer 8-Kanal Balkendarstellung angezeigt (siehe Abbildung 1).

KANAL	SENSOR	CHARAKETRISTISCHE SUBSTANZEN:
A	IMS	Ammoniak
B	IMS	anorganische Verbindungen (chlorierte Verbindungen) oder z.B. Cyanide
C	IMS	polare Substanzen (elektropositiv)
D	IMS	polare Substanzen (elektronegativ)
E, F	MOS	oxidierbare Gase
G	EC	dissoziierbare Substanzen, z.B. Phosgen, Salzsäure
H	PID	aromatische, ungesättigte Kohlenwasserstoffe



Anzeige der einzelnen Kanäle

Abbildung 1: GDA 2 mit Messlanze (unten links); Balkenanzeige und Zuordnung der Messkanäle zu den unterschiedlichen Sensoren des Gerätes.

Im Projekt wurde der GDA 2 mit einer langen Messlanze ausgestattet, um zwischen der Plane und den Bordwänden der LKW Proben aus dem Inneren nehmen zu können.

Das Gerät wurde ohne Stoffdatenbank und mit ausgeschalteter Identifizierungsfunktion betrieben. Das System verfügt über die Möglichkeit die zu untersuchende Luft in verschiedenen Stufen intern zu verdünnen. Im Rahmen des Projektes wurde die Versuche ohne voreingestellte Verdünnung durchgeführt. Die Messdauer je LKW Frachtraum betrug circa eine Minute. Die Sensoren und die Flussrate des Gerätes wurden bei Messkampagnen täglich mit den herstellerseitig dafür vorgesehenen Testprogrammen und -mitteln überprüft und neu kalibriert.

2.7 Itemiser DX (Sprengstoffspurendetektor)

Hersteller: Morpho Detection, Vertrieb durch ELP GmbH, Deutschland

Siehe auch Abschlussbericht.

Das Gerät dient der Detektion von Sprengstoff- und Drogenspuren durch Wischprobenahme, gefolgt von einer Thermodesorption des Wischers im Thermodesorber des Gerätes und der Analyse der abgedampften Bestandteile im „ion-trap-ion-mobility spectrometer“ (ITMS, siehe Abbildung 2).

Abbildung 2: Sprengstoff- und Drogenspurendetektor Itemiser DX

Ionisierte Analyten werden anhand ihrer Driftzeit unterschieden und identifiziert. Das Gerät verfügt über zwei Kanäle und detektiert sowohl positive als auch negative Ionen. Für das Gerät existieren verschiedene Betriebsmodi: „explosives“ (nur Explosivstoffe), „drugs“ (nur Drogenstoffe), „dual“ (Explosivstoffe und Drogen). Diese haben Auswirkungen auf die Temperatur der Desorption und der Driftröhre und somit auch auf die Driftzeiten der Ionen. Sofern nicht anders erwähnt, wurden alle Untersuchungen im Explosivstoffmodus durchgeführt. Teil des Systems sind zwei unterschiedliche Wischertypen aus Teflon und aus einem Faserfilz. Für die Wischproben an den Fahrzeugen wurde ausschließlich der Teflonwischer genutzt. Wischproben wurde unmittelbar nach der Probennahme im Itemiser untersucht.

2.8 FirstDefender RM (Raman-Handspektrometer)

Hersteller: ThermoScientific, Vertrieb durch Anlyticon GmbH, Deutschland
Siehe auch Abschlussbericht.

Die grundsätzliche Bedienung erfolgt gemäß Handbuch und den Anweisungen des Gerätes.
Feste und flüssige Substanzen werden Probenvials gefüllt und in die dafür vorgesehen Halterung im Gerät gestellt. Werden (z.B. aus Sicherheitsgründen bei farbigen Explosivstoffen und Zündstoffen) sehr kleine Probenmengen untersucht, so werden diese zunächst auf Aluminiumfolie gegeben und der Strahl des Raman-Lasers auf die Probe fokussiert. Die Messung erfolgt im automatischen Modus des Gerätes. Hierbei werden die Messparameter (z.B. Intensität des Lasers, Messdauer, Anzahl der kumulierten Spektren) durch das Gerät selbsttätig an die Probe angepasst. Dauert die Messung (ohne Spektrensuche) länger als 15 Minuten wird die Messung abgebrochen.
Die Substanzidentifizierung erfolgt anhand des automatischen Abgleichs des Messspektrums mit der im Gerät hinterlegten Spektren-Datenbank. Die Datenbanken umfassen bei den im Projekt genutzten Handspektrometern (TruDefender, FirstDefender) mehrere tausend Substanzen und decken Explosivstoffe, Drogen und viele Industriechemikalien ab. Zu dem identifizierten Stoff stehen dem Nutzer weitere Information z.B. zur Gefahrstoffeinstufung zur Verfügung.

2.9 TrueDefender FT (IR-Handspektrometer)

Hersteller: ThermoScientific, Vertrieb durch Anlyticon, Deutschland
Siehe auch Abschlussbericht.

Die grundsätzliche Bedienung erfolgt gemäß Handbuch und der Nutzerführung des Gerätes.
Bei festen Proben wird eine Spatelspitze – circa 20 – 100 mg Substanz werden in die Probeaufnahmevorrichtung des Gerätes („Crusher“) gegeben und das Messgerät bis zum Einrasten der Verschlüsse aufgesetzt. Bei flüssigen Proben wird ein Tropfen der Substanz direkt auf den ATR-Diamanten des aufrechtstehenden Gerätes getropft. Die Messung erfolgt im automatischen Modus des Gerätes. Es wird darauf geachtet, dass das Gerät während der Messungen nicht erschüttert wird. Dauert die Messung länger als 15 Minuten wird die Messung abgebrochen.

Die Substanzidentifizierung erfolgt anhand des automatischen Abgleichs des Messspektrums mit der im Gerät hinterlegten Spektren-Datenbank.

2.10 MiniRAE3000 (PID Gasphasendetektor)

Hersteller: RAE Systems, Dänemark

Siehe auch Abschlussbericht.

Im Projekt wurde das handgetragene, akkubetriebene PID MiniRAE3000 mit einer 10,6 eV Ionisierungslampe eingesetzt. Das Gerät wurde vor Beginn einer Messkampagne mit Isobuten-Testgas des Herstellers überprüft und kalibriert. Um den Zugang in den Gasraum der LKW-Frachträume zu verbessern wurde das Gerät mit einer Messlanze ausgestattete (siehe Messlanze des GDA 2 in Abbildung 1).

2.11 Explonix (Sprengstoffspurendetektor)

Hersteller: Fa. RS-Dynamics, Tschechische Republik

Siehe auch Abschlussbericht.

Die Detektion erfolgt über eine kontrollierte Zersetzung von Explosivstoffen und der Detektion der relevanten Zersetzungsprodukte mittels Chemolumineszenz. Das Gerät verfügt über mehrere Messmodi („Continuous“ – „Cold“ bzw. „Infrared“, „Particles“ und „Vapour“), die für verschiedene Anwendungsbereiche des Gerätes optimiert sind. Für die Bewertung von überwiegend glatten Flächen auf Sprengstoffkontaminationen (Testflächen und an Fahrzeugen) wurden Wischproben mit den vom Hersteller mitgelieferten Papierwischern genommen und diese im „continuous – infrared“ – Modus gemäß der Anleitung im Handbuch bewertet. Vor Beginn einer Messkampagne wurde das Gerät gemäß Anleitung mit den vom Hersteller zur Verfügung gestellten Explosivstoff-Testlösungen kalibriert.

2.12 Benutzung und Aufarbeitung der PU-Wischer für die Referenzanalytik

Zur quantitativen Bestimmung von Explosivstoffproben auf diversen Oberflächen wurden angefeuchtete PU-Wischer verwendet. Die PU-Wischer (siehe auch Abbildung 3) werden mit 400 µL Acetonitril/Wasser (90/10) benetzt und bis zu ihrer Nutzung einzeln in verschlossenen Zentrifugenröhrchen aufbewahrt.

Zur Nutzung wird der Wischer mit einer Pinzette oder mit Einweg-Handschuhen aus

dem Zentrifugenröhrchen entnommen, wobei darauf geachtet wird, dass der Schaumstoffkopf des Wischers nicht berührt wird.

Abbildung 3: PU-Wischer mit Einweg-Zentrifugenröhrchen für Transport und Extraktion

Material:

- Wischer mit Wischkopf aus Polyurethanschaum und gekürztem Griff aus Polyethylen (PU-Wischer): Chemtronics® Foamtips #110 CF1050; ITW Chemtronics®, USA
- Spritzenvorsatzfilter: Multoclear 0,45 µm LE-PA (Nylon), 13 mm; CS-Chromatographie Service GmbH, Deutschland
- Zentrifugenröhrchen: 15 mL aus PP mit Deckel aus PE; Rotilabo®
- Reinstwasser
- Acetonitril in LC-MS-Qualität

2.12.1 Wischprobennahme mit PU-Wischern

Die Probennahme erfolgt mit leichtem Druck des Wischers auf der zu untersuchenden Oberfläche (siehe Abbildung 4). Alle Wischer werden spätestens drei Wochen nach Herstellung verwendet und innerhalb von 14 Tagen extrahiert und analysiert werden. Gebrauchte und ungebrauchte Wischer werden dunkel und trocken, vorzugsweise bei einer Temperatur um 7 °C (Kühlschrank) aufbewahrt.

Abbildung 4: Wischprobennahme mit PU-Wischer am Kofferraumöffnungsknopf/Schlüsselloch eines PKWs

Für die Extraktion der benutzten PU-Wischer wird zum im Röhrchen befindlichen Wischer 3 mL ACN/Wasser (90+10) gegeben und dieses 15 min im Ultraschallbad extrahiert und anschließend geschüttelt. Der Wischer wird an den Wandungen des Röhrchens ausgedrückt und anschließend verworfen. Das Extrakt wird mit einer Spritze aufgenommen und über einen Spritzenvorsatzfilter (0,45 µm, Nylon) gefiltert. Für eine nachfolgende Analyse werden von der Probe 0,5 mL (für HPLC, LC-MS/MS) und 1,5 mL (für IC) entnommen, in HPLC- bzw. IC-Vials gefüllt und mit der gleichen Menge Reinstwasser verdünnt. Die Vials werden vor Durchführung der Analyse geschüttelt.

2.13 Auswahl der zu beprobenden Flächen für die Sprengstoffspurendetektion an Kontrollobjekten.

Die nachfolgenden Inhalte sind aufgrund von Vertraulichkeitsvereinbarungen mit den Endnutzern nicht im öffentlichen Teil des Berichts aufgeführt worden, da sie ggf. in die nicht-öffentlichen Gefahrenabwehrpläne aufgenommen werden können. Die Informationen können auf Nachfrage Behörden oder mit behördlichen Aufgaben versehenen Stellen zur Verfügung gestellt werden.

3 Identifizierung von Szenarien für den Einsatz von Detektionstechnologien

3.1 Einsatz von Detektionstechnologien im Hafen

Die nachfolgenden Inhalte sind aufgrund von Vertraulichkeitsvereinbarungen mit den Endnutzern nicht im öffentlichen Teil des Berichts aufgeführt worden, da sie ggf. in die nicht-öffentlichen Gefahrenabwehrpläne aufgenommen werden können. Die Informationen können auf Nachfrage Behörden oder mit behördlichen Aufgaben versehenen Stellen zur Verfügung gestellt werden.

3.2 Einsatz von Detektionstechnologien auf dem Schiff

Die nachfolgenden Inhalte sind aufgrund von Vertraulichkeitsvereinbarungen mit den Endnutzern nicht im öffentlichen Teil des Berichts aufgeführt worden, da sie ggf. in die nicht-öffentlichen Gefahrenabwehrpläne aufgenommen werden können. Die Informationen können auf Nachfrage Behörden oder mit behördlichen Aufgaben versehenen Stellen zur Verfügung gestellt werden.

4 Einbindung von Detektionssystemen – Hafen

Die Hochschule unterstützte den Projektpartner FKIE-MMS bei der Einbindung technischer Detektionssysteme (Itemiser DX, GDA 2, FirstDefender, TruDefender) in die landseitige Hafensicherheitsarchitektur.

Darüber hinaus wurden weitere mobile Technologien und Verfahren im Rahmen der Marktrecherche identifiziert und gegebenenfalls getestet. In **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** wurden beispielhaft ein handgetragener Photoionisationsdetektor (MiniRae 3000, PID) und ein Teleskopkamerasystem, MM-Imagingsystem) aufgenommen.

Um die Einsatzmöglichkeiten von Detektionstechnologien bewerten zu können müssen die im nachfolgenden aufgelisteten Parameter berücksichtigt werden:

1. **Sicherheitsgewinn:** Der Sicherheitsgewinn kann nur qualitativ beschrieben werden und beinhaltet Aspekte wie Nachweisgrenzen, Fehlalarmquote, sowie Anwendungsbereich und -breite (z.B. Detektion einer breiten Auswahl unterschiedlicher Explosivstoffe).
2. **Rüstzeit:** Dies ist Zeitbedarf für die Inbetriebnahme des Detektors in der Kontrollstelle.
3. **Zeitbedarf Kontrolle:** Benötigte Zeit zur Durchführung einer Fahrzeugkontrolle einschließlich Zeit für Probennahme, eigentlicher Messdauer, sowie für Systemregeneration und eventueller Reinigung.
4. **Robustheit:** Ist das Gerät für einen mobilen Einsatz in rauer Umgebung ausgelegt, oder sind zusätzliche Maßnahmen zum Schutz des Gerätes erforderlich?
5. **Bedienbarkeit:** Eine einfache Bedienbarkeit ist Voraussetzung für den Einsatz der Geräte durch angelerntes Sicherheitspersonal.
6. **Kosten:** Beschaffungs- und Wartungskosten.

Die nachfolgenden Inhalte sind aufgrund von Vertraulichkeitsvereinbarungen mit den Endnutzern nicht im öffentlichen Teil des Berichts aufgeführt worden, da sie ggf. in die nicht-öffentlichen Gefahrenabwehrpläne aufgenommen werden können. Die Informationen können auf Nachfrage Behörden oder mit behördlichen Aufgaben versehenen Stellen zur Verfügung gestellt werden.

4.1 Evaluierung der Messsysteme

Die Evaluierung der Messsysteme erfolgte unter Laborbedingungen und im Rahmen von Testläufen an der Hochschule Bonn-Rhein-Sieg und in den Häfen Rostock und Puttgarden an realen, zufälligen Kontrollobjekten. Im Rahmen der Kontrolle wurden die Sicherheitsdienstleister als auch die kontrollierten Personen, sofern eine Verständigung in Deutsch oder Englisch möglich war, gebeten ihre Meinung zu den durchgeführten Kontrollen zu äußern. Obwohl unsystematisch konnten hierbei wichtige Eindrücke zur Akzeptanz der Kontrollen im Allgemeinen und der Kontrolltechniken im Speziellen gewonnen werden. Die Kontrollen und die dabei durchgeführten Maßnahmen wurden überwiegend akzeptiert, wobei aber insbesondere die LKW-Fahrer darauf hinwiesen, dass sie bereits durch anderer Behörden (z.B. BAG, Zoll) häufig (teilweise sogar mehrfach auf dem Weg zum Fährhafen) kontrolliert würden.

Generell zeigte sich, dass die Wege zwischen kontrolliertem Objekt und Detektionstechnik möglichst kurz zu halten sind, da der zusätzliche Zeitbedarf für den Weg zwischen Gerät und zu kontrollierendem Objekt erhebliche negative Auswirkungen auf die benötigte Zeit und somit die Kontrollfrequenz hatte.

Der Itemiser DX benötigt für einen dauerhaften Betrieb einen 230 V Anschluss und muss vor Witterungseinflüssen geschützt werden. Die anderen Detektionsgeräte (GDA 2, FirstDefender RM, TrueDefender) sind akkubetrieben. Für den GDA 2 wird zur Durchführung der (Wieder)Inbetriebnahme ein Computer (z.B. Laptop) und eine Pumpe zur Regeneration stark mit Analyten belasteter Probennahmelanze benötigt da sich Substanzen auf den durchströmten Oberflächen absetzen und nachfolgende Messungen stören können. Mit der Pumpe wird im Gegenstrom über Aktivkohle gefilterte Luft durch die Lanze und die störenden Verbindungen entfernt.

Die Beurteilung des Sicherheitsgewinns durch den Einsatz einer Detektionstechnologie hängt von einer Reihe schwer greifbarer Faktoren ab:

- Ausreichende Leistungsfähigkeit des Gerätes (Sensitivität, Selektivität, Spezifität, Bandbreite ausreichend zur Detektion der relevanten Bedrohungen), wobei zumindest für den Fährhafenbereich diese nicht definiert ist.
- Handhabbarkeit (Durchsatz, einfache Bedienbarkeit, einfache und eindeutige Interpretation der Messergebnisse).
- Qualität und Motivation des Bedienpersonals und der für den Einsatz benötigten Organisationsstruktur.

- Akzeptanz durch den Anwender/Kontrolleur.
- Akzeptanz und Abschreckung (Glaube an die Wirksamkeit der Untersuchung) durch die kontrollierte Person.

4.1.1 Detektion von Sprengstoffspuren

Als exemplarischer Vertreter für mobile Sprengstoffspurendetektoren wurde im Projekt überwiegend der für den Einsatz auf Flughafen zugelassene Itemiser DX genutzt.

Rüstzeit:

Der Itemiser DX benötigt, sofern er zuvor eine längere Zeit ausgeschaltet war, circa 8 Stunden Rüstzeit. Diese Zeit wird für einige einfache Wartungsarbeiten, Kalibrierungen, vor allem aber für eine längere Equilibrierungsphase, in der sich das Gerät aufheizt und selber reinigt, benötigt. Wird das Gerät hingegen nicht ausgeschaltet und im Grundbetriebszustand (alternative Stromversorgung über 12 V Kfz-Stromversorgung und/oder Akku) von einem Ort zum anderen transportiert, so ist es innerhalb von circa 15 Minuten wieder voll betriebsbereit. Die Rüstzeiten sind kompatibel mit der veranschlagten Vorlaufzeit von in der Regel mehreren Stunden bei Erhöhung der Gefahrenstufe von eins auf zwei im Hafen, welche den Aufbau mobiler Kontrollstellen nötig machen würde.

Zeitbedarf Kontrolle:

Im Falle des Itemiser DX können stark verunreinigte Wischproben zu einer Verschmutzung des Probeneinlasses führen. Dieses kann relativ aufwendige und zeitintensive Reinigungsprozeduren erforderlich machen. Die Erfahrung in den Testläufen zeigte aber, dass das Gerät selbst nach der Analyse stark verschmutzter Proben üblicherweise nach maximal 10 Minuten wieder einsatzfähig war. Im Durchschnitt wurde für die Kontrolle eines LKW < 5 Minuten benötigt, sofern ein Fahrzeug mit einem Wischer zunächst an mehreren Stellen beprobt und das Messgerät in unmittelbarer Nähe zur Kontrollstelle aufgebaut wurde. Wurde eine Fahrzeug mit mehreren Wischern beprobt - entweder zur punktuellen Untersuchung oder zur Abklärung eines Fehlalarms – konnte sich die für eine Kontrolle benötigte Zeit erheblich verlängern. Dabei betrug der Zeitbedarf für die eigentliche Probennahme circa eine bis drei Minuten und für die Analyse der Probe einschließlich des Weges zum Detektor ebenfalls circa eine Minute. Bevor eine weitere Wischprobe untersucht werden konnte war eine Erholungszeit von wenigen Sekunden bis zu 10 Minuten notwendig.

Wischprobennahme für Itemiser DX

Werden mit einem Wischer vor der Zuführung zum Detektor zunächst mehrere Flächen beprobt, so werden Kontaminationen, welche bei der Probennahme an einer Stelle aufgenommen werden bei weiteren Probennahmen an anderen Stellen teilweise wieder vom Wischer entfernt bzw. auf im nachfolgenden beprobte Flächen übertragen.

In einer Versuchsreihe wurden jeweils drei glatte Glasplatten (4 cm X 3 cm) aus Glas mit einer definierten Menge in Isopropanol gelöstem TNT betropft und an der Luft getrocknet (Menge TNT/Glasplatte: 310 +/- 50 ng, (N=3) überprüft mittels LC/MS^2). Die Wischprobeneffizienz der Teflonwischer des Itemiser DX betrug unter diesen Bedingungen circa 80% (N=2). Der Gehalt an TNT je Wischer betrug nach dem ersten Wischen circa 270 ng. Glatte Oberflächen wie Glas lassen sich gut abwischen. Es kann davon ausgegangen werden, dass die Wischprobeneffizienz bei rauen Flächen erheblich geringer ausfällt.

Für den Itemiser wird durch den Hersteller noch weitere aus einem Faserfilz bestehende Wischer zur Verfügung gestellt, die üblicherweise in Kombination mit einem Handstaubsauger genutzt werden sollen. Für diesen ergaben sich bei reiner Wischprobenahme der Glasflächen eine Probennahmeeffizienz von circa 70% (circa 230 ng TNT/Wischer).

Werden mit diesen kontaminierten Wischern nach dem Abwischen einer Glasplatte weitere Wischprobennahmen an nicht kontaminierten Flächen (Größe: 4 cm X 3 cm, Materialien: Polystyrol (PS), Papierwischtücher (WYPALL, Kimberly-Clark) durchgeführt, so können im Anschluss kleine Mengen Explosivstoff auf diesen Flächen nachgewiesen werden (siehe Abbildung 5, Abbildung 6, Abbildung 7). Polystyrol (PS) wurde als Vertreter für glatte, nicht saugende Kunststoffoberflächen, die Testflächen aus den Papierwischtüchern als Vertreter für eine saugende Oberfläche gewählt. Die erzeugten Querkontaminationen liegen in der Regel nach zehn nacheinander folgenden Probennahmen in einem Bereich von 4 - 10 ng. Die dabei übertragene Explosivstoffmenge scheint innerhalb der zehn nachfolgenden Probennahmen mit Ausnahme der Probennahme mit dem Faserfilzwischer von Papier unabhängig von der Zahl der abgewischten Flächen zu sein.

Eine stichprobenartig durchgeführte separate Wischprobennahme auf diesen Flächen führte zu keinem Alarm am Detektor.

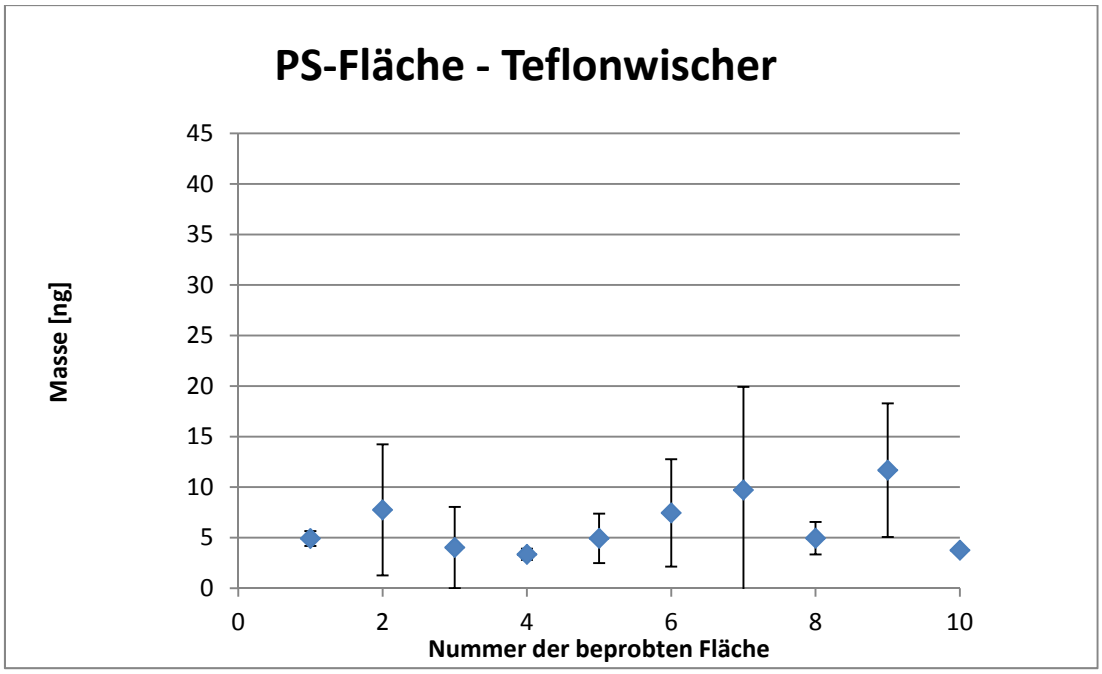


Abbildung 5: TNT-Rückstände auf zuvor sauberen Polystyrolflächen nachdem diese mit einem kontaminierten Teflonwischer (Itemiser DX) nacheinander beprobt worden sind (N=3).

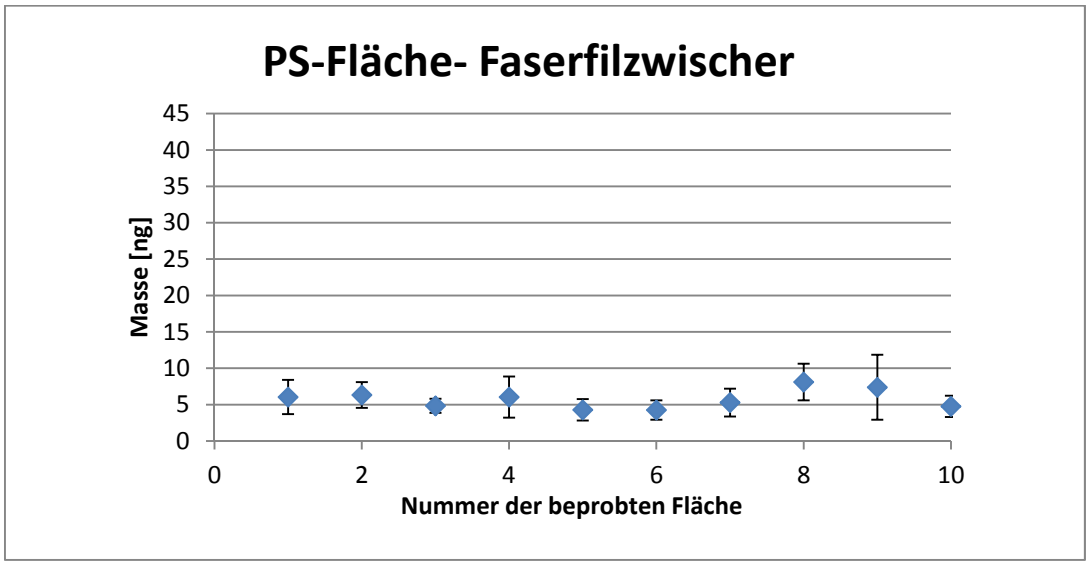


Abbildung 6: TNT-Rückstände auf zuvor sauberen Polystyrolflächen, nachdem diese mit einem kontaminierten Faserfilzwischer (Itemiser DX) nacheinander beprobt worden sind (N=3).

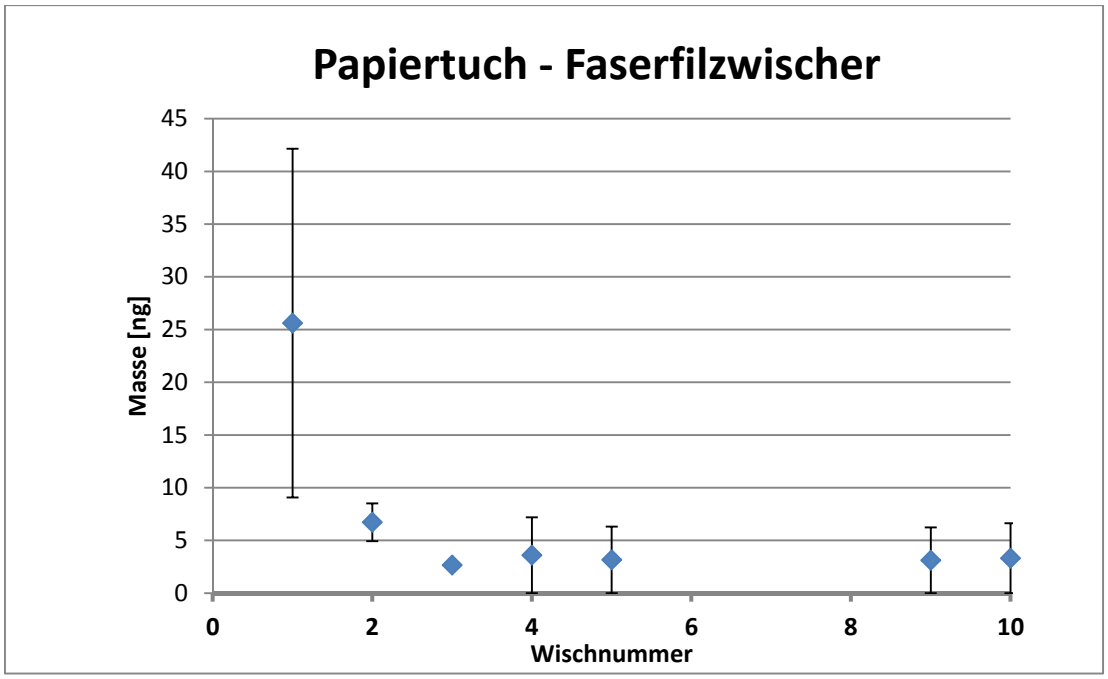


Abbildung 7: TNT-Rückstände auf zuvor sauberen Papierwischtuch nachdem diese mit einem kontaminierten Faserfilzwischer (Itemiser DX) nacheinander beprobt worden sind (N=3).

Bei beiden Wischern (Teflon, Faserfilz) konnte – ausgehend von einem Ausgangskontamination von circa 300 ng auf der Glasfläche - auch nach 10 weiteren Wischprobenahmen auf nicht kontaminierten Flächen und den damit einhergehenden Verlusten TNT in jeweils 3 von 3 Versuchen detektiert werden.

Robustheit/Bedienbarkeit:

Das Gerät erwies sich den Umgebungsbedingungen im Hafen gewachsen, sofern das Gerät geschützt vor Wind, Niederschlägen und starker Sonneneinstrahlung aufgestellt wurde. Auch die zum Teil sehr erheblichen Verschmutzungen (insbesondere: Ruß, Gummiabrieb, Betriebsmittel) an den Fahrzeugen wurden vom Gerät auch bei mehrstündigen Betrieb verkraftet.

Abbildung 8: Kontrollstelle im Hafen Rostock im Rahmen einer Hafensicherheitsübung. Der Itemiser DX ist im blauen Container aufgebaut, welcher sich in unmittelbarer Nähe zur mit Pylonen markierten Kontrollspur befindet. das Gerät wurde nach kurzer Einweisung durch Mitarbeiter der Firma Securitas bedient.

Bei einem Testlauf im Hafen Rostock in den Sommermonaten (siehe Abbildung 8) führte direkte Sonneneinstrahlung auf das Gerät, obwohl die Lufttemperatur noch im – gemäß Gerätespezifikationen - akzeptablen Bereich lag, zu einer Überhitzung des Systems. Als Folge liefen die Driftzeiten der Analyten aus Ihren durch Kalibrierung festgelegten Detektionsfenstern. Auch eine automatische Nachkalibrierung war nicht erfolgreich. Die Fehlalarmrate stieg auf rund 50% und Sprengstoffkontaminationen wurden nicht mehr detektiert. Auch die bei der Probennahme getragenen Handschuhe können Fehlalarm-auslösende Stoffe enthalten. Bei der Aufstellung eines Gerätes sollte der Aufstellungsort daher bestimmte Bedingungen (Witterungsschutz, Einhaltung der in den Gerätespezifikationen genannten Umgebungsbedingungen, Schutz vor starker direkter Sonneneinstrahlung, unmittelbare Nähe zur Kontrollspur) erfüllen. Es sollten die bei der Kontrolle benutzten Hilfsmittel (z.B. Handschuhe) und Flächen (z.B. Tisch auf dem das Gerät aufgestellt wird), welche in Kontakt mit den Wischer kommen können beprobt und mit dem Itemiser DX in Hinblick auf Ihre Möglichkeit zur Auslösung unerwünschter Fehlalarme untersucht werden. Die damit einhergehende Erhöhung der Rüstzeit von 15 Minuten auf circa 45 Minuten führt zu keinen Problemen beim Aufbau der Kontrollstelle.

Regennasse Flächen sind für diese Kontrollmethode nicht zugänglich. In diesem Fall

müsste auf eine Probennahme im Fahrzeuginneren und anderen wettergeschützten Bereichen z.B. an den Griffen der Türinnenseite, sowie auf eine verstärkte visuelle Inspektion potentieller Verstecke zurückgegriffen werden.

Das Material der Wischer (Teflon, Faserfilz) ist vergleichsweise hart und abrasiv. Empfindliche lackierte Oberflächen können bei unvorsichtiger Probennahme zerkratzt werden.

Das Gerät ist mit einer Ni-63 Quelle zur Ionisierung der Analyten ausgestattet. Die Stärke der verbauten radioaktiven Quelle liegt mit 370 MBq oberhalb der Freigrenze, die einen vereinfachten, genehmigungsfreien Umgang zulässt. Besitz und ortsveränderlicher Betrieb des Gerätes müssen vorab von den zuständigen Behörden genehmigt werden. Die betreibende Einrichtung muss über Strahlenschutzbeauftragte verfügen und die Bediener sind regelmäßig zu unterweisen. Jede Ortsveränderung ist der zuständigen Behörde vorab zu melden. Es sind auch IMS-basierte Sprengstoffspurendetektoren marktverfügbar, die auf radioaktive Quellen zur Ionisierung verzichten (DE-tector, Fa. Bruker, Deutschland; QS-B220, Implant Science Corp.; USA).

Fazit Sicherheitsgewinn:

Unter Annahme einer geringen Verbreitung von Sprengstoffspuren im öffentlichen Raum [Cull2004], ist eine gute Nachweisempfindlichkeit eines Sprengstoffdetektors wünschenswert. Detektoren auf Basis der Ionenmobilitätsspektrometrie (IMS) können Probennahmewischer mit Sprengstoffkontaminationen im unteren ng-Bereich in der Regel gut detektieren. Die Nachweisgrenzen können sich jedoch je nach Substanz und verwendetet IMS-Verfahren um Größenordnungen unterscheiden. [Zale2013]

Die Nachweisgrenzen des Itemiser DX, sowie eines handgetragenen Systems (Explonix), wurden für die Stoffe TNT, RDX und Ammoniumnitrat untersucht. Glasflächen (glattes Bilderglas, 3 cm * 4 cm) wurden mit definierten Sprengstoffmengen (1 ng, 10 ng, 20 ng, 100 ng, 500 ng, 2 µg) belegt. Hierfür wurden definierte Mengen gelöster Sprengstoffe aufgetropft und die Oberflächen an der Luft getrocknet. Die getrockneten Oberflächen wurden mit den zu den jeweilige Geräten gehörenden Probenehmern (Itemiser DX: Teflonwischer; Explonix: Papierwischer) sorgfältig, gemäß der Anleitung des Herstellers abgewischt und den Geräten zugeführt. Je Substanz und Kontaminationsstufe wurden für jedes Gerät 5 Testflächen vorbereitet und beprobt.

Die nachfolgenden Inhalte sind aufgrund von Vertraulichkeitsvereinbarungen mit den Endnutzern nicht im öffentlichen Teil des Berichts aufgeführt worden, da sie ggf. in die nicht-öffentlichen Gefahrenabwehrpläne aufgenommen werden können. Die Informationen können auf Nachfrage Behörden oder mit behördlichen Aufgaben versehenen Stellen zur Verfügung gestellt werden. Die Ergebnisse aus den Versuchen sind wettbewerbssensitiv.

Untersuchung der Fehlalarmrate des Sprengstoffspurendetektors Itemiser DX an realen Kontrollobjekten

Es wurden zufällige Fahrzeuge und einige ausgewählte mutmaßlich mit Sprengstoff kontaminierte Objekte zunächst mit Teflonwischern des Itemiser DX und anschließend mit lösungsmittelgetränkten Polyurethanwischern (PU-Wischer) beprobt. Die Probennahme mit den PU-Wischern diente als Kontrollverfahren. LC-MS/MS und IC sind als empfindliche und selektive instrumentell-analytische Verfahren dem Itemiser DX überlegen. Zudem weist die trockene Wischprobennahme eine naturgemäß schlechte Probennahmeeffizienz von < 10 % auf während mit den lösungsmittelfeuchten PU-Wischern Probennahmeefizienzen von 60% und mehr erreicht werden. Daher ist nach der Probenahme durch einen Teflonwischer der überwiegende Teil der chemischen Information noch auf der Oberfläche für eine nachfolgende Untersuchung mit dem empfindlicheren und effizienteren Verfahren lösungsmittelgetränkter PU-Wischer + LC-MS/MS und IC vorhanden (siehe auch Kapitel 2).

Bei der Beprobung wurde 1 Wischer je Objekt genutzt mit dem zunächst mehrere Teilflächen (bei LKW mit Anhänger bis zu 15 Stellen) abgewischt wurden bevor der Wischer im Gerät geprüft wurde. Mit dem PU-Wischer wurden die gleichen Stellen beprobt wie mit dem Teflonwischer zuvor.

Insgesamt wurden 110 Fahrzeuge und 8 kontaminierte Objekte untersucht. Von den untersuchten Fahrzeugen waren 49 LKW (einschließlich unbegleiteter Fracht und LKW mit Anhänger), 50 PKW (einschließlich Caravan-Gespannen) und 11 Zweiräder. Bei den kontaminierten Objekten handelte es sich um 2 mit Explosivstoff kontaminierten KFZ, zwei mit Sprengstoff beladenen LKW sowie Laborflächen an der Hochschule an denen in der Vergangenheit mit Explosivstoffen gearbeitet worden war.

Im Rahmen der Stichprobenuntersuchungen zeigte der Itemiser DX in 4 von 110 Testfahrzeugen (Rate Falsch-positiv: 4%) Explosivstoff an, obwohl mit dem Referenzverfahren kein Sprengstoff nachgewiesen werden konnte. Die im realitätsnahen

Einsatz – auch im Rahmen von Hafensicherheitsübungen – festgestellte Fehlalarmrate von < 5% wurde Seitens der Endnutzer als noch akzeptabel angesehen. Voraussetzung hierfür ist aber ein etabliertes, eingefahrenes Konzept zur Alarmauflösung, mit minimierter Belästigung des Passagiers/Frachtkunden und der Vermeidung von Störungen im Be- und Entladegesamtprozess. Die vergleichsweise geringe Fehlalarmrate galt jedoch nur, sofern das Gerät im Explosivstoffmodus betrieben wurde. Bei Tests an LKWs einer Großspedition (siehe Abbildung 9, N = 88) im Dual-Modus (Sprengstoff und Drogen) kam es zu einem erheblichen Anstieg an falschpositiven Sprengstoffalarmen (circa 25 %).

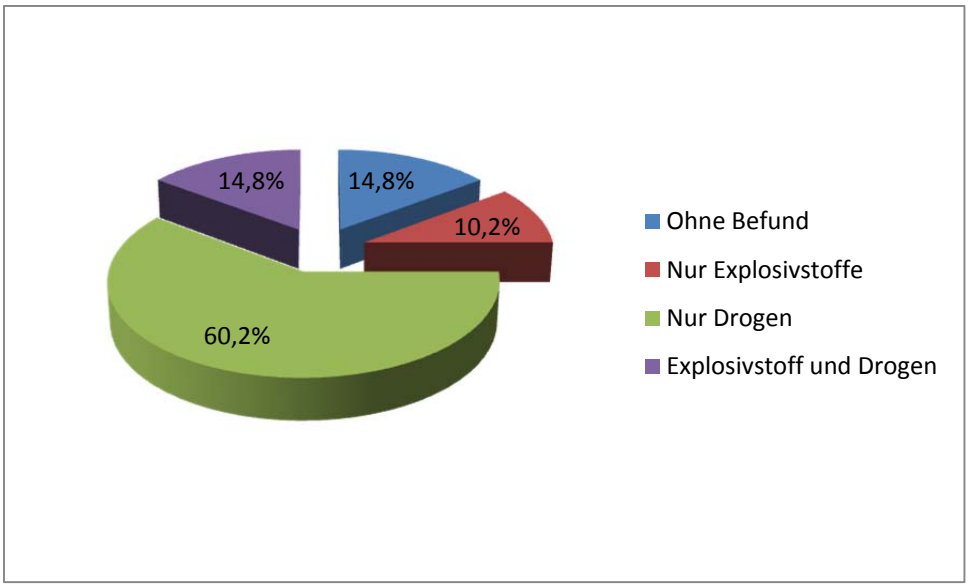


Abbildung 9: Prozentuale Verteilung der Anzeigen bei der Kontrolle von Fracht-LKW (N=88) mit dem im Dual-Modus betriebenen Itemiser DX. Mit dem instrumentell-analytischer Referenzverfahren konnte an keinem LKW Explosivstoff nachgewiesen werden.

Noch häufiger wurde vom Gerät das Vorliegen von Drogen- oder Sprengstoff- und Drogenspuren angezeigt. Für Drogen stand jedoch, anders als für die Explosivstoffe keine analytisches Referenzverfahren zur Verfügung. Die Ursache für diese erhebliche Fehlalarmrate ist nicht abschließend geklärt. Auch technische Probleme des Gerätes können nicht gänzlich ausgeschlossen werden.

Von den kontaminierten Flächen bzw. Fahrzeugen wurden 2 von 8 mit dem Itemiser DX nicht detektiert. Die mit dem Referenzverfahren ermittelte Kontamination lag aber bei den nicht erfolgreichen Detektionen geringfügig oberhalb der zuvor ermittelten Detektionsgrenze des Gerätes (siehe **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**). Die beprobte Stelle wies eine raue Oberfläche auf was sich nachteilig auf die Probennahmeeffizienz des Teflonwischers auswirkt.

Fazit Sicherheitsgewinn:

Sprengstoffspurendetektionsgeräte sind sowohl den potentiellen Nutzern als auch den kontrollierten Personen bereits aus anderen Bereichen (z.B. Sicherheitskontrollen an Flughäfen bekannt) und werden akzeptiert. Einzelgespräche mit LKW-Fahrern, Mitgliedern der Wasserschutzpolizei und Sicherheitsdienstleistern deuten darauf hin, dass Sprengstoffspurendetektoren eine gewisse Wirksamkeit unterstellt wird. Hauptsächliche Bedenken betreffen vor allem das Risiko von falsch-positiven Alarmen oder der Detektion von Sprengstoffspuren aus Querkontaminationen ohne Zusammenhang zur transportierten Ladung. Die Geräte sind in der Regel leicht zu bedienen und zu interpretieren. Marktverfügbare Sprengstoffspurendetektoren decken nicht das gesamte Spektrum denkbarer Explosivstoffe ab, können aber nicht zu kleine Kontaminationen vieler üblicher Sprengstoffe gut detektieren. Die Geräte stellen einen Sicherheitsgewinn dar, da mit ihnen Hinweise auf versteckte Sprengladungen gefunden werden können und eine Abschreckungswirkung wahrscheinlich ist. Jedoch führt die aus Zeitgründen notwendige Wischprobennahmeverfahren, bei der mehrere Stellen hintereinander mit demselben Wischer beprobt werden, zur Abnahme der auf dem Wischer befindlichen Sprengstoffmengen und damit auch zu einer Verschlechterung der Detektionswahrscheinlichkeit.

Beschaffungs- und Wartungskosten:

Die Beschaffungskosten des Gerätes betrugen circa 45.000,-€; Herstellerseitig wurden nach Rückfrage die Kosten für Wartung und Verbrauchsmittel bei intensiver Nutzung mit circa 4000,-€/Jahr angegeben. Hinzu kommen administrative Kosten (Strahlenschutz) aufgrund der im Gerät verbauten radioaktiven Quelle.

4.1.2 Detektion flüchtiger Gefahrstoffe

Zum Auffinden einer Leckage können neben der direkten In-Augenscheinnahme der Ladung oder eines Transportgebindes im Falle von flüchtigen Stoffen Gasphasendetektoren eingesetzt werden. Weit verbreitet sind Photoionisationsdetektoren (PID), die aber unspezifisch sind und Stoffe mit Ionisierungsenergien > 11,7 eV (abhängig von der verbauten Ionisierungsquelle auch weniger) nicht mehr detektieren können. Alternativen bieten hier Multisensorsysteme wie der X-AM-7000 (Dräger, Deutschland) bei dem eine begrenzte Anzahl unterschiedlicher Sensoren (z.B. elektrochemischer Zellen) verbaut werden können oder wie das Multisensorsystem GDA 2 (z.B wird der GDA2 vom Hamburger Zoll zum Eigenschutz bei der Kontrolle von Import-

container auf flüchtige toxische Stoffe genutzt [Harb2006, Bund2012]).

Abbildung 10: Einsatz des PID MiniRAE3000 zur Kontrolle des Gasatmosphäre im Laderaum eines LKW

Im Rahmen des Projektes VESPER ^{Plus} wurden der GDA 2 und ein PID (MiniRAE3000, siehe Abbildung 10) exemplarisch als Beispiele für handgetragene Gasphasendetektoren untersucht. Dabei erweis sich das sehr robuste, leicht zu bedienende und kostengünstige PID als wenig geeignet, da es aufgrund der Detektionseinschränkung auf leicht ionisierbare Stoffe auch bei offensichtlich ausgasenden Frachten häufig nicht zur Anzeige kam. Auf eine weiterführende Beschreibung der Ergebnisse zum PID wird daher verzichtet.

Rüstzeit:

Die Rüstzeit des GDA 2 betrug circa 30 Minuten und beinhaltete das Hochfahren und Aufheizen des Gerätes sowie Testen und Kalibrieren der Sensoren und der Flussrate.

Zeitbedarf Kontrolle:

Die Kontrolle einer Ladefläche benötigte circa 1 Minute. Ein LKW mit Anhänger konnte in circa 2 Minuten überprüft werden und führte zu keiner Verzögerung des Kontrollprozesses. Aufgrund der eingeschränkten Zugänglichkeit der Laderäume und aus Gründen des Eigenschutzes erfolgte die Gasprobenahme über eine mit einem Schlauch an das Gerät angeschlossenen Probennahmelanze. Wurden das Gerät und die Probennahmelanze einer hohen Analytkonzentration ausgesetzt, so wurden

Probennahmelanze und Schlauch ausgetauscht. Die benutzte Lanze wurde mit einem gegenläufigen Luftstrom gereinigt. Auch bei Einhaltung dieser Maßnahme kann die Regeneration des Gerätes nach Kontakt mit hohen Analytkonzentrationen 15 Minuten betragen.

Robustheit/Bedienbarkeit:

Das Gerät kann von Sicherheitsdienstleistern nach einer kurzen Einweisung (etwa eine Stunde) durch erfahrene Instruktoren und einige Übungsläufen am realen Objekt genutzt werden. Bei der Nutzung des Systems sind Blockaden des Luftstroms (z.B. durch abgeknickte Schläuche) zu vermeiden, da es andernfalls zu erheblichen Veränderungen im Ansaugvolumenstrom des Gerätes kommen kann. Diese Veränderungen werden nicht im laufenden Betrieb angezeigt, sondern können nur im Rahmen einer Rekalibrierung festgestellt und korrigiert werden. Diese müssen aber von erfahrenerem Personal durchgeführt werden, da es gelegentlich auch zu Problemen bei der Kommunikation zwischen dem Gerät und dem hierfür benötigten Computer kommen kann.

Schwierigkeiten bereitete dem eingewiesenen Personal zumindest anfänglich die Interpretation der Messergebnisse, da abhängig von den Bedingungen vor Ort auch bei unauffälligen LKW kleinere Messausschläge beobachtet werden. Dieser chemische Hintergrund wirkt sich auf die 8 Messkanäle des Gerätes unterschiedlich aus (blaue Linien in Abbildung 11) und ist zudem von der Umgebungstemperatur abhängig.

Das Gerät enthält eine radioaktive Ni-63-Quelle mit einer Aktivität knapp unterhalb der Freigrenze. Der mobile Einsatz des Gerätes innerhalb Deutschlands ist damit vereinfacht. Sobald aber weitere Geräte mit radioaktiven Quellen gleichzeitig genutzt werden, muss eine Strahlschutzorganisation aufgebaut werden.

Sicherheitsgewinn:

Im Rahmen der Testläufe im Hafen Rostock konnten mit Hilfe des GDA 2 LKW, welche Ladungen mit ausgasenden flüchtigen Stoffen aufwiesen, gut detektiert werden. Der GDA 2 zeigte bei zwei Fahrzeugen erhöhte Messwerte an, obwohl diese kein Gefahrgut geladen hatten (Kunststoffvlies, Gummimatten). Die Ladung setzte aber offensichtlich noch erhebliche Mengen an flüchtigen Stoffen frei. Auch wenn in diesen Fällen kein offensichtlicher oder versteckter Gefahrguttransport vorlag, kann argumentiert werden, dass die Warnung vor erhöhten Konzentrationen unbekannter

flüchtiger Analyten im Laderaum auch für den Eigenschutz des Kontrolleurs wichtig ist. Insgesamt wurden 40 LKW mit dem GDA 2 und per Sichtkontrolle überprüft. In keinem Fall gab es Hinweise auf nicht-deklarierte oder fehldeklarierte Gefahrgüter.

Selektivität:

Ziel im Projekt war es, Anomalien zu detektieren. Hierfür müssen aber zunächst Erfahrungen gesammelt werden mit welchen Sensorreaktionen auch bei eigentlich unauffälligen Fahrzeugen zu rechnen ist und ab wann eine Anomalie vorliegt. Im Falle von den zwei im Projekt beobachteter Gefahrguttypen mit ausgasender Fracht (siehe Abbildung 11: 90 UN 2211 und 80 UN 2794) ist nicht nur eine eindeutige Unterscheidung von den bei unauffälligen Fahrzügen üblichen Anzeigen, sondern auch zwischen den Gefahrgütern möglich. Die Ähnlichkeit der Anzeige bei gleichem Gefahrgut lässt vermuten, dass sich auch bei ausgasendem Gefahrgut durch Abweichungen vom üblichen Muster weitere Anomalien detektieren lassen sollten.

Durch die Aufteilung der Geräteanzeige auf 8 Kanäle ist es für den erfahrenen Anwender möglich erste Hinweise auf die Art der freigesetzten VOC’s zu bekommen.

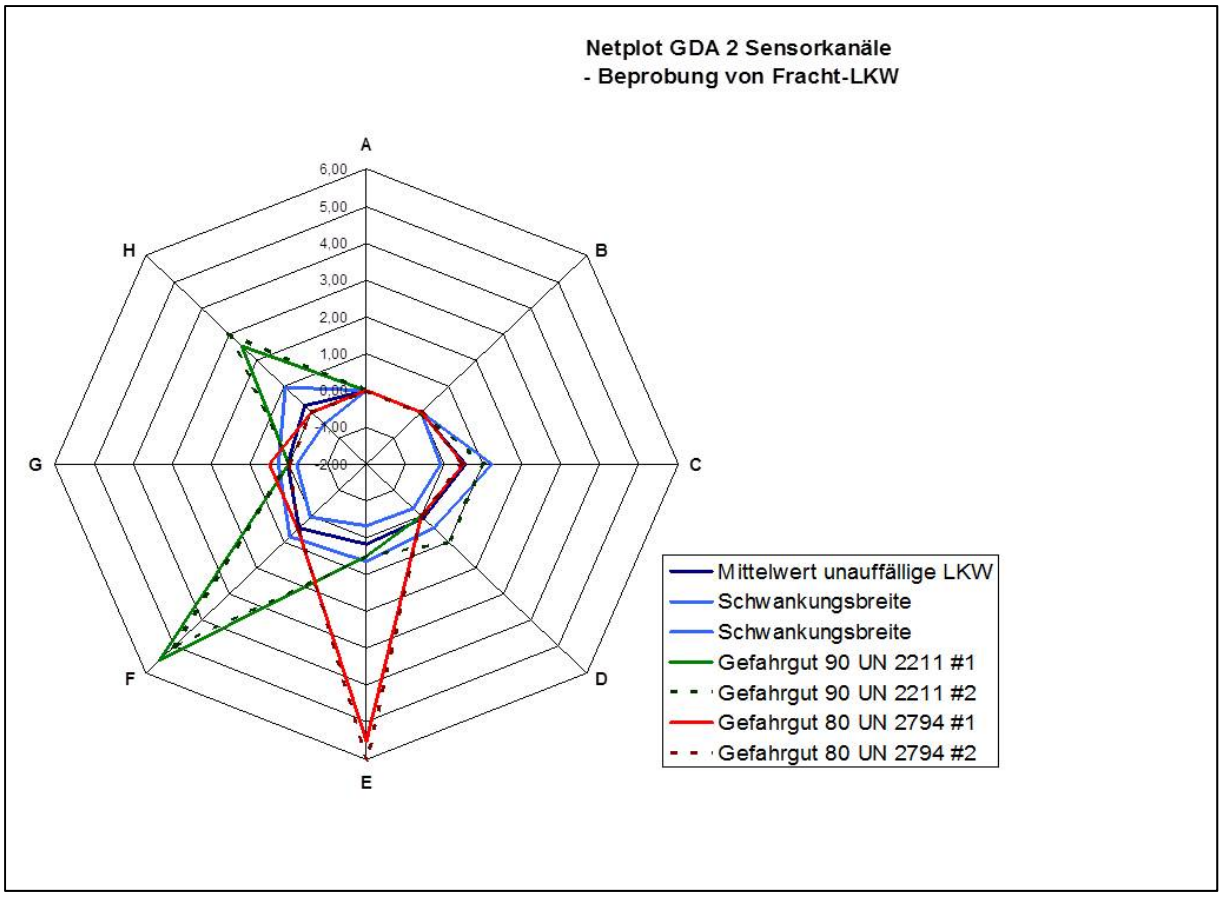


Abbildung 11: Netplot der Sensorkanäle; Blau: Mittelwert und Standardabweichung der unauffälligen LKW sowie Messdaten von 4 LKW mit ausgasenden Gefahrstoffladungen (Grün und Rot: 90 UN 2211 (Schäumbare Polymerkügelchen, entzündbare Dämpfe abgebend) und 80 UN 2794 (Batterien (Akkumulatoren) nass, gefüllt mit Säure, elektrische Sammler).

Sensitivität:

Die Sensitivität des Gerätes ist – nicht zuletzt aufgrund des integrierten IMS – hoch. In eigenen Laborversuchen führten selbst Konzentrationen von 0,1 ppm Tetrahydrofuran an Luft zu einer von der bei den LKW beobachteten Schwankungsbreite deutlich unterscheidbaren Anzeige (Kanal C: 4 von 6 Balken, Kanal F: 1,5 von 6 Balken). Die Konzentration ist für das Gerät so hoch, dass der Selbstschutz des Gerätes vor Überladung greift und vor Erreichen des Maximalwertes die Messung automatisch abgebrochen wurde.

Fazit Sicherheitsgewinn:

Reale Vorfälle mit nicht- bzw. fehldeklarierten Gütern scheinen relativ selten zu sein. Auch eine Nachfrage bei den im Projekt beteiligten Reedern ergab, dass bislang keine Vorfälle mit nicht-deklarierten Gefahrgütern an Bord bekannt sind, obwohl der Transport von Gefahrgut an Bord mit zusätzlichen Kosten und Anmeldefristen für den Spediteur verbunden sind. Andererseits geht von solchen Frachten ein erhebliches

Bedrohungs- und Gefährdungspotential für die Fährschifffahrt aus. Mit Multisensorgasdetektoren wie dem GDA 2 können Anomalien in der Gasphase von LKW und Fracht detektiert und die Aufmerksamkeit des Kontrollpersonals auf auffällige Fahrzeuge gelenkt werden. Gleichzeitig wird der Eigenschutz des Kontrollpersonals verbessert. Es können aber nur ausgasende Stoffe detektiert werden. Eine Kombination mit visuellen Inspektionshilfen – auch als Teil der Maßnahmen zur Alarmauflösung bei auffälligen Fahrzeugen - ist daher äußerst sinnvoll. Die Untersuchung der Fahrzeuge mit dem GDA 2 führte zu keinen Verzögerungen im Kontrollablauf. Entsprechende Systeme waren den kontrollierten Fahrern in der Regel völlig unbekannt und wurden allenfalls mit der Suche nach blinden Passagieren assoziiert. Der Einsatz wurde aber problemlos akzeptiert.

Beschaffungs- und Wartungskosten:

Die Beschaffungskosten des Gerätes betrugen circa 50.000,-€. Herstellerseitig wurden nach Rückfrage die Kosten für Wartung und Verbrauchsmittel mit circa 2.500,-€/Jahr angegeben. Hinzu kommen eventuell administrative Kosten (Strahlenschutz) aufgrund der im Gerät verbauten radioaktiven Quelle.

4.1.3 Identifizierung unbekannter Stoffe

Eine schnelle Identifizierung unbekannter Stoffe erscheint für die Fährhafensicherheit im Falle absichtlich oder unabsichtlich herbeigeführter Gefahrguthavarien auf dem Hafengelände und beim Auffinden unbekannter Stoffe im Rahmen von Kontrollen sinnvoll. Die Bekämpfung von Gefahrguthavarien ist vor allem Aufgabe externer Einsatzkräfte, zumal die im Projekt beteiligten Häfen über keine Werksfeuerwehr verfügen. Zugangskontrollen zum Hafen werden hingegen durch den Hafenbetreiber durchgeführt. Hier besteht das Interesse, Auffälligkeiten in der Kontrolle zu entkräften oder zu erhärten bevor die Polizei hinzugezogen wird. Eine Möglichkeit hierzu bietet die Identifizierung unbekannter Stoffe, die im Rahmen einer Kontrolle entdeckt werden.

Zur Identifizierung unbekannter Stoffe bieten sich IR- und Raman-Handspektrometer an, von denen es neben den im Projekt genutzten Systemen (TruDefender FT, FirstDefender RM, Thermo Scientific, US, siehe Abbildung 12), noch eine Reihe weiterer Anbieter mit ähnlichen Systemen (z.B.: Mobile-IR, Bruker, Deutschland; Fido Verdict, ICX-Technologies, US; ReporteR RCI und HazMatID, Smiths Detektion, UK) gibt. Den Geräten ist gemein, dass die Identifikation über den Abgleich des Messspekt-

rums mit Spektren in der im Gerät hinterlegten Datenbank erfolgt.

Abbildung 12: Links: TruDefender FT (IR-Handspektrometer) mit dem separaten Probenaufnehmer („Crusher“); Rechts: FirstDefender RM (Raman-Handspektrometer) mit Transportkoffer

Bei der IR- und Ramanspektroskopie werden Molekülschwingungs- und Rotationsenergien gemessenen. Die Spektren sind abhängig von Bindungsstärke und Masse der beteiligten Bindungen bzw. Atome. Die erzeugten Spektren sind substanzspezifisch. Dabei verhalten sich Raman- und IR-Spektroskopie oftmals komplementär zueinander: Raman-aktiv sind Schwingungen, die zu einer Änderung der Polarisierbarkeit, nicht aber des Dipolmomentes führen. Bei der IR-Spektroskopie werden hingegen Schwingungen angeregt, welche zu einer Änderung des Dipolmomentes führen. Fluoreszierende Stoffe lassen sich schlecht mittels Ramanspektroskopie vermessen, da das Fluoreszenzsignal die Raman-Emissionslinien überdecken können. Wasserfeuchte Stoffe sind dagegen problematisch für eine Analyse mittels IR-Spektroskopie, da Wasser in weiten Bereichen des IR Spektrums starke Absorptionslinien aufweist.

Rüstzeit:

Die Geräte sind innerhalb weniger Minuten betriebsbereit.

Zeitbedarf Kontrolle:

Sofern keine besonderen Schutzmaßnahmen (z.B. Anlegen eines Vollschutzanzuges) bei der Probennahme notwendig sind und die Stoffe für die Geräte zugänglich sind, können unbekannte Stoffe innerhalb weniger Minuten vermessen werden.

Robustheit/Bedienbarkeit:

Die Geräte sind handlich, dekontaminierbar und robust. Die grundsätzliche Bedienung ist einfach. Beim FT-IR sind Erschütterungen während des Messvorganges zu vermeiden. Das Raman-Handspektrometer nutzt einen Klasse 3b-Laser, der in der

Lage ist empfindliche, brennbare Stoffe zu entzünden. Das Tragen einer Laserschutzbrille während des Betriebs wird dringend empfohlen, da nicht immer sichergestellt werden kann, dass die Untersuchungen in der nötigen Weise durchgeführt werden können, um eine Gefährdung der Augen durch das Laserlicht zu vermeiden. Gefahren für Mensch und Material können z.B. durch Probennahme und Untersuchung geringer Stoffmengen vermieden werden. Jedoch müssen die Nutzer regelmäßig durch einen Laserschutzbeauftragten geschult werden.

Probleme ergaben sich bei der Interpretation der Messergebnisse. Trotz der in der Datenbank enthaltenen Zusatzinformationen sahen sich die angesprochenen Endnutzer (Sicherheitsdienstleister und Wasserschutzpolizei) vielfach außerstande, die bereitgestellten Informationen zu interpretieren, da das Personal über keinerlei chemische Grundkenntnisse verfügte. In der Datenbank wird das in den USA übliche Verfahren zur Beschreibung und Darstellung von Gefahrstoffen genutzt, was Frage zur Kompatibilität und Vergleichbarkeit der Angaben zum europäischen System aufwarf.

Zur Nutzung der Geräte (insbesondere für Probennahme und Interpretation der Ergebnisse) sollte der Bediener über chemische Grundkenntnisse verfügen. Vielfach werden industrielle Produkte nur mit ihrem Handelsnamen auf den Gebinden beschriftet bzw. in den Frachtpapieren geführt. Ein Abgleich der mit den Handspektrometern erhaltenen Stoffidentifikationen mit den verfügbaren Angaben zur Fracht ist daher schwierig. In diesen Fällen müssen weitere Informationen zum Produkt, z.B. online oder durch telefonische Rückfragen beim Hersteller, beschafft werden.

Fazit Sicherheitsgewinn:

Die Identifizierung unbekannter Stoffe funktioniert bei Reinstoffen und nicht zu komplexen Gemischen, sofern die Einzelstoffe in der Datenbank enthalten sind, bei beiden Geräten gut. In Tabelle 1 sind die Ergebnisse der von Identifizierungsversuche einfacher Substanzgemische mit Ammoniumnitrat z.B. Ammoniumnitrat/Mehl im Verhältnis 50/50 dargestellt. Bei allen aufgeführten Gemischen wurde der Hauptbestandteil Ammoniumnitrat in jedem der durchgeführten Versuche identifiziert.

Tabelle 1: Identifikationswahrscheinlichkeit einiger ausgewählter einfacher Gemische durch die Handspektrometer. Als richtige Identifikation wurde gewertet, wenn der Hauptbestandteil (Ammoniumnitrat) vom Gerät als sicherer oder wahrscheinlicher Inhaltsstoff angezeigt wurde.

TrueDefender			FirstDefender		
Substanz	Anzahl Versuche	Anzahl richtige Identifikationen	Substanz	Anzahl Versuche	Anzahl richtige Identifikationen
Ammoniumnitrat/ Mehl (50/50)	10	10	Ammoniumnitrat/ Mehl (90/50)	10	10
Ammoniumnitrat/ Zucker (90/10)	10	10	Ammoniumnitrat/ Zucker (50/50)	20	20
Ammoniumnitrat/ NaCl ((50/50)	10	10	Ammoniumnitrat/ NaCl ((90/10)	10	10

Bei komplexeren Gemischen, welche zudem noch störende Farbstoffe und sowohl feste als auch flüssige Bestandsteilen enthalten können, nimmt die Wahrscheinlichkeit einer erfolgreichen Identifikation ab.

Die nachfolgenden Inhalte sind aufgrund von Vertraulichkeitsvereinbarungen mit den Endnutzern nicht im öffentlichen Teil des Berichts aufgeführt worden, da sie ggf. in die nicht-öffentlichen Gefahrenabwehrpläne aufgenommen werden können. Die Informationen können auf Nachfrage Behörden oder mit behördlichen Aufgaben versehenen Stellen zur Verfügung gestellt werden.

Sollte auch nach erneuter Messung eine Substanz nicht identifiziert bleiben, so besteht die Möglichkeit das Spektrum zum Gerätehersteller zu schicken, der eine 24 h-Auswerteunterstützung für unbekannte Spektren anbietet. Dies ist für den hier betrachteten Anwendungsfall zu langsam. Im Rahmen des Projektes wurde daher mit Projektpartnern mit guten Erfolg an einem webbasierten Datenaustauschverfahren und einem Expertensystem gearbeitet mit dem unklare Spektren erheblich schneller in Hinblick auf das mögliche Vorhandensein besonders kritischer Stoffe ausgewertet werden können (siehe hierzu die Berichte der Projektpartner GITZ und FKIE-SDF).

Fazit Sicherheitsgewinn:

Ein Ziel der Kontrollstelle muss es sein, die unerkannte Verbringung gefährlicher Stoffe in den ISPS Bereich zu verhindern. Die betrachteten Geräte können hierzu einen sinnvollen Beitrag leisten, wobei entsprechende Untersuchungen in der Regel erst nach einem Anfangsverdacht durchgeführt werden würden. Jedoch bestand im Rahmen der Testläufe und Hafensicherheitsübungen bei insgesamt über 100 kontrollierten Fahrzeugen in keinem Fall ein dringender Bedarf für die Anwendung der Sys-

teme durch die Endnutzer. Dies könnte daran liegen, dass den Nutzern bei der Bearbeitung der wenigen Verdachtsfälle die Möglichkeiten dieser Geräte nicht bewusst waren. Zum anderen wurde die Probennahme an unbekannten Stoffen als mit dem Eigenschutz schwer vereinbar angesehen. Es erscheint daher sinnvoller entsprechende Geräte z.B. bei der Feuerwehr zu etablieren, und diese dann bei Bedarf zusammen mit dem fachkundigen Personal anzufordern.

Beschaffungs- und Wartungskosten:

Beschaffungskosten für den TrueDefender FT und für den FirstDefender RM betragen 40.000 € bzw. 45.000 €. Die laufenden Kosten sind (ohne Wartungsverträge) < 500,- €/a. Aufgrund des Klasse 3b Lasers ist mit zusätzlichen administrativen Kosten für den Laserschutz zu rechnen.

4.1.4 Visuelle Inspektionshilfe

Die visuelle Inspektion ist eine der wichtigsten Maßnahmen in der Kontrollstelle. Sie ist aber aufgrund von Unübersichtlichkeit, Größe und Vielzahl der potentiellen Versteckmöglichkeiten zeitaufwändig. Im Rahmen des Projektes wurden die visuellen Inspektionshilfen Wolfpack™ (Teleskopkamera, EOMAX, Canada, siehe Abbildung 13), das Videoskop VIPAQ™ (Richard Wolf, Deutschland) sowie einfache rollbare Spiegel eingesetzt.

Abbildung 13: Inspektion der Ladefläche eines verschlossenen LKWs mit einem Endoskop.

Rüstzeit:

Die Inspektionshilfen sind innerhalb weniger Minuten zusammengebaut und einsatzbereit.

Zeitbedarf Kontrolle:

Je nach Größe des Objektes, Art der Ladung und Gründlichkeit der Untersuchung wurden 1-10 Minuten benötigt. Die Sichtkontrolle z.B. auch mit fahrbarem Bodenspiegel erwies sich neben der Ansprache des Fahrers und der Kontrolle der Papiere als eine der zeitaufwendigsten Maßnahmen in der Kontrollstelle.

Robustheit/Bedienbarkeit:

Die visuellen Inspektionshilfen sind im Allgemeinen für eine raue Umgebung geeignet und leicht zu bedienen. Die Suche nach versteckten Objekten und die Interpretation des Gesehenen benötigt Erfahrung.

Fazit Sicherheitsgewinn:

Die visuelle Inspektion ist die wichtigste Maßnahme zum Auffinden verdächtiger Objekte. Es ist von einer abschreckenden Wirkung auszugehen, allerdings wird diese Maßnahme je nach Intensität von den Kontrollierten nicht selten als invasiv angesehen. Visuelle Inspektionshilfen, z.B. ausgestattet mit IR-Licht und Kamerasystemen können Effizienz und Wirksamkeit der visuellen Inspektion erheblich verbessern. Mit modernen, hochwertigen Systemen ist z.B. möglich verschlossene und verdunkelte LKW-Ladeflächen komplett auszuleuchten und zugestellte, schwer zugängliche Bereiche zu inspizieren. Die sehr positiven Erfahrungen im Projekt führten dazu, dass im Hafen Rostock entsprechende Systeme (Teleskopkamera) als Bestandteil der Kontrollstelle bereits innerhalb der Projektlaufzeit eingeführt wurden.

Beschaffungs- und Wartungskosten:

Die Beschaffungskosten können je nach System bis zu 25.000,- € betragen. Wartungs- und Betriebskosten sind gering.

4.1.5 Radardurchleuchtung von Objekten

Das im Projekt entwickelte System zur Radardurchleuchtung von Objekten (z.B. angestellten Koffern) befindet sich im Labormusterstadium. Weitere Informationen befinden sich im Abschlussbericht der Maxconic GmbH im Anhang.

4.2 Einbindung der Messsysteme in die Sicherheitsarchitektur

Einbindung von Detektionssystemen in die Risikobewertung:

In Rahmen des Projektes wurde diskutiert, inwieweit Verfügbarkeit und Nutzung von Detektionstechnologien bei der Risikobewertung von Häfen berücksichtigt werden sollten. Es kann argumentiert werden, dass ein mit vielen Sicherheits- und Kontroll-

technologien ausgestatteter Hafen aufgrund der Abschreckungswirkung und der Möglichkeit Angriffe vorzeitig aufzudecken eine geringere Gefährdung aufweist. Andererseits könnten diese Schutzmaßnahmen die Aufmerksamkeit besonderes professioneller Gruppierungen auf Häfen als kritische Infrastruktur lenken. Detektionstechnologien weisen in Regel Fähigkeitslücken auf, die dann für einen Angriff genutzt werden könnten, während auf Seiten des Sicherheitspersonals ein falsches Gefühl von Sicherheit erzeugt wird.

Das im Projekt auf Basis des ISPS-Codes von Projektpartnern entwickelte Verfahren zur Erstellung von Risikobewertungen ist statisch und zu grob für eine an den aktuellen Stand der Technik angepasste Berücksichtigung von Sicherheitstechnologien. Auf deren Berücksichtigung in der Risikobewertung wurde daher verzichtet.

Einbindung von Messsystemen in den Kontrollprozess und in die Kommunikation:

Die Einbindung von Detektionssystemen in Kontrollprozess und Kommunikation wird im nachfolgenden schematisch in Anlehnung an die erweiterte, ereignisgesteuerte Prozesskette (eEPK) dargestellt. In der eEPK werden unter anderem die in Abbildung 14 dargestellten Objekte zur Visualisierung von Prozessen genutzt:

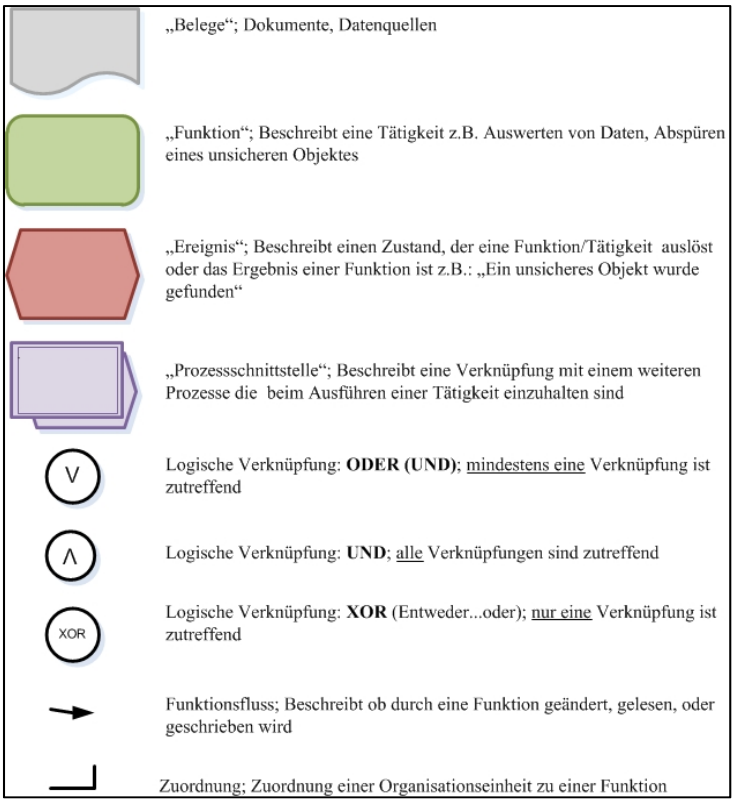


Abbildung 14: Ausgewählte Objekte und Symbole der eEPK

Örtliche Lage, Art der zu kontrollierenden Objekte und Struktur einer Zugangskontrollstelle zu einem Fährhafen variieren nicht nur von Hafen zu Hafen. Größere Häfen weisen mehrere Zugangspunkte auf, bei denen, je nach Art der dort abzufertigenden Kontrollobjekte und Ausführenden, deutlich unterschiedliche Maßnahmen getroffen werden (z.B. Zugang von Hafenpersonal und vorangemeldeten Frachten bekannter sicherer Versender; Zugang von unangemeldeten Personen und Frachten; Ausführung durch Sicherheitsdienstleister des Hafen oder Polizei).

Die nachfolgenden Inhalte sind aufgrund von Vertraulichkeitsvereinbarungen mit den Endnutzern nicht im öffentlichen Teil des Berichts aufgeführt worden, da sie ggf. in die nicht-öffentlichen Gefahrenabwehrpläne aufgenommen werden können. Die Informationen können auf Nachfrage Behörden oder mit behördlichen Aufgaben versehenen Stellen zur Verfügung gestellt werden.

Die Handspektrometer (TruDefender, FirstDefender, siehe Kapitel 4.1.3) können bei der Suche nach weiteren Verdachtsmomenten zum Einsatz kommen, wenn in den kontrollierten Fahrzeugen verdächtige Substanzen gefunden werden. Aufgrund der besseren Ergebnisse würden unbekannte, nicht zu dunkle Stoffe zunächst mit dem Raman-Gerät untersucht werden. Ist ein wiederholter Identifikationsversuch nicht erfolgreich wird die Substanz mit dem FT-IR Gerät untersucht. Ist dies nach einer

wiederholten Messung ebenfalls nicht erfolgreich können die gemessenen Spektren, sofern grundsätzlich auswertbar, ausgelesen und eine Expertenstelle weitergeleitet werden. Innerhalb des Projektes wurden hierfür von Projektpartnern ein webbasiertes Datenaustausch-Tool zum mobilen Austausch der Daten sowie ein Auswerteprogramm entwickelt. Ziel ist es einem Experten über mobile Endsysteme (z.B. Smartphone) unklare Daten zuzuschicken und kurzfristig auswerten zu lassen. Entwicklung und Test von Datenaustausch-Tool und Auswerteprogramm wurde durch die Hochschule durch die Bereitstellung von Messdaten unterstützt. Durch die Untersuchung einen kleinen Menge der unbekannten Substanz mittels Sprengstoffspurendetektor kann für eine Reihe der üblichen Explosivstoffe festgestellt werden, ob diese eventuell ganz oder teilweise in der unbekannten Substanz enthalten sind. Auf die Einbindung der Handspektrometer in das dargestellte Schema des Kontrollprozesses wurde verzichtet, da der routinemäßige Einsatz dieser Geräte in einer Kontrollstelle gegenwärtig nicht zu erwarten ist.

Abweichungen zu den üblichen Kommunikationsmustern einer Kontrollstelle ergeben sich aus Meldungen zum Betriebszustand der Geräte, durch die von den Messgeräten erzeugten (Fehl-)alarmen und deren Bearbeitung. Diese Abweichungen wurden an den für die Überarbeitung der Kommunikationsprozesse zuständigen Projektpartner weitergeleitet und sollten im den Gefahrenabwehrplan berücksichtigt werden.

5 Einbindung von Detektionssystemen – Schiff

Als wesentliche Einsatzszenarien für mobile Detektionstechnologie wurden die von Schiffspersonal regelmäßig durchgeführten Sicherheitsronden, sowie Gefahrstoffunfälle und Brände identifiziert (siehe Kapitel 3.2).

5.1 Evaluierung der Messsysteme

Die Evaluierung der Messsysteme erfolgte auf Basis der im Labor durchgeführten Tests (siehe auch Kapitel 4.1 und die folgenden Unterkapitel) und Testläufen an Bord der Fährschiffe MS Mecklenburg-Vorpommern und der MS Transrussia.

5.1.1 Detektion flüchtiger Gefahrstoffe

Ein mögliches Gefährdungsszenario an Bord ist die absichtliche oder unabsichtliche Freisetzung flüchtiger Gefahrstoffe. Quellen hierfür können eingeschmuggelte Substanzen, Betriebsmittel des Schiffes oder die im erheblichen Umfang durchgeführten Gefahrguttransporte (siehe hierzu auch den Bericht des Projektpartners ISV) sein. Die relevanten Bereiche verfügen über Brandmeldetechnik und im Falle der Parkdecks über eine eingeschränkte Videoüberwachung. Eine Freisetzung von Gefahrstoffen ohne Rauchentwicklung auf den Parkdecks, könnte daher lange unentdeckt bleiben.

Es wurde daher untersucht, ob das Mitführen eines kontinuierlich arbeiteten, breitbandigen Gasphasendetektors ein praktikabler Weg zur Verbesserung der Sicherheit an Bord darstellen könnte. Im Rahmen von Sicherheitsronden an Bord der MS Mecklenburg-Vorpommern wurde die Einsatzfähigkeit eines handgetragenes PID (Mini-RAE 3000) und eines Multisensorgasphasendetektor (GDA 2) getestet.

Robustheit/Bedienbarkeit:

Der GDA 2 erwies sich aufgrund seines Gewichtes und der größeren Dimensionen als deutlich unhandlicher als das kleinere und leichtere PID. Die Unterschiede kamen in engen Niedergängen in einem solchem Ausmaß zum Tragen, dass beim routinemäßigen Einsatz eine Beschädigung des GDA 2 nicht ausgeschlossen werden kann.

Fazit Sicherheitsgewinn:

Der chemische Hintergrund an Bord ist lokal starken Schwankungen unterworfen (siehe Abbildung 15). Die Schwankungsbreite der einzelnen Messkanäle des GDA 2

übersteigt die bei unauffälligen LKW beobachtete Schwankungsbreite (rote Linie in der Abbildung) deutlich. Der starke, lokal wechselnde chemische Hintergrund stammt z.B. von den Treibstoffen des Schiffes, den Treibstoffen und Betriebsmitteln der transportieren Fahrzeuge, Korrosionsschutzarbeiten am Schiff, sowie von den von Passagieren konsumierten alkoholischen Getränken und benutzen Kosmetika (Parfüm).

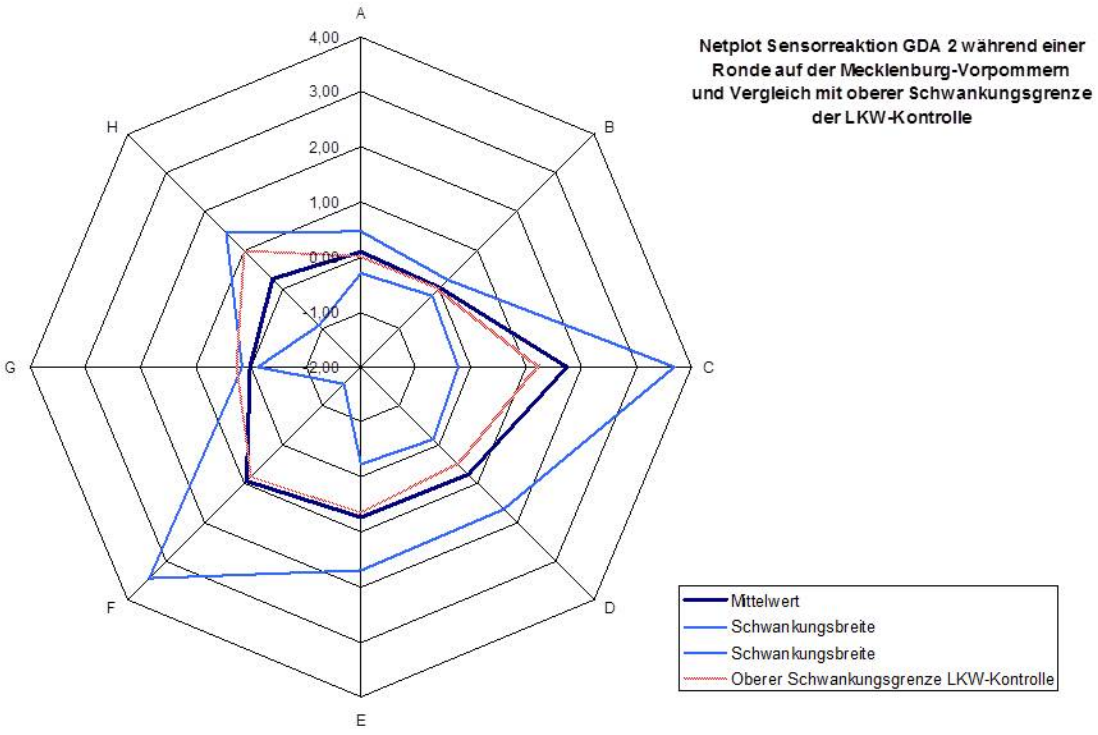


Abbildung 15: Schwankungsbreite der Anzeigen der Messkanäle des GDA 2 an Bord der MS Mecklenburg-Vorpommern (in Blautönen) und obere Grenze der Schwankungsbreite bei der Kontrolle von Ladeflächen unauffälliger LKW (rot)

Bei einer Ronde werden die unterschiedlichsten Bereiche eines Schiffes betreten. In Tabelle 2 sind die ortsabhängigen Anzeigen von GDA 2 und PID dargestellt, die im Rahmen einer Ronde auf der Mecklenburg-Vorpommern auftraten. Rot markiert sind alle Orte bei denen die Anzeigen des GDA 2 die für LKW – Kontrollen ermittelten obere Schwankungsbreite (siehe **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**Abbildung 11 und Abbildung 15) überschritten wurde. Der wechselnde chemische Untergrund führte mehrfach zu einer Überladung des GDA 2, der daraufhin für eine längere Zeit nicht mehr für Messungen eingesetzt werden konnte. Als besonders sensibel erwies sich das im Gerät verbaute IMS. Mit dem PID hingegen

überstiegen die Messwerte auch in offensichtlich belasteten Bereichen (z.B. in der Schwerölaufbereitung oder in der Nähe kürzlich ausgeführter Korrosionsschutzarbeiten) 0,3 ppm (bezogen auf Isobuten) nicht (siehe Tabelle 2). Das PID detektiert verglichen zum GDA 2 eine kleinere Palette an Stoffen und erscheint allgemein als zu unempfindlich.

Fazit Sicherheitsgewinn:

Dem GDA 2 bereiten der wechselnde chemische Hintergrund und die beengten räumlichen Verhältnisse an Bord Probleme. Insbesondere das verbaute IMS ist zu empfindlich. Das MiniRAE3000 ist den Bedingungen an Bord hingegen gewachsen. Das Gerät ist aber nur für eine deutliche eingeschränktere Stoffpalette sensitiv. Hochtoxische Stoffe (z.B. Kampfstoffe, Chlorgas, Fluor- und Chlorwasserstoffsäure) werden nicht oder mit nicht ausreichender Sensitivität angezeigt. Der Detektor gibt als Summendetektor keinerlei Hinweise auf die Chemie der detektierten Stoffe.

Das Mitführen eines einfachen, robusten, wenn auch in den Fähigkeiten eingeschränkten, Gasphasendetektor bei Rondengängen könnte dennoch zu einem Sicherheitsgewinn führen.

Tabelle 2: Messwerte (GDA 2, MiniRAE3000) bei einer Ronde auf der MS Mecklenburg-Vorpommern. Rot markiert sind Schiffsbereiche mit Anzeigen des GDA 2 oberhalb der für die Kontrolle von LKW festgelegten oberen Schwankungsbreite (Alarmschwelle bei LKW-Kontrolle)

Ort:	GDA 2								PID
	Maximal Ausschlag Kanäle in "Balken" im betretenem Bereich								
	A	B	C	D	E	F	G	H	[ppm]
Start: Flure Besatzungs- und Passagierbereich	0	0	0	0			0	0	0-0,1
Flure Passagierbereich	0	0						0	0-0,1
Flure Passagierbereich	0	0					0	0	0-0,1
Flure Passagierbereich	0	0					0	0	0-0,1
Flure Passagierbereich	0	0					0	0	0-0,1
Schiffsdeck außen	0	0					0	0	0-0,1
Innentreppe zu Lade/Fährdeck	0	0					0	0	0-0,1
oberstes, offenes Lade/Fährdeck (H5)	0	0					0	0	0-0,1
Innentreppe zu Lade/Fährdeck	0	0					0	0	0-0,1
mittleres, teiloffenes Fährdeck (H4) teilweise durchschnitten	0	0					0	0	0-0,1
Raum mit Brandbekämpfungsausrüstung	0	0					0	0	0-0,1
Ladedeck H4	0	0					0	0	0-0,1
Bugräume auf Höhe H4 mit Ankerwinde und Zwischenschott/Raum	0	0					0	0	0-0,1
Bugräume auf Höhe H4 mit Ankerwinde und Zwischenschott/Raum	0	0					0		0-0,1
Bugräume auf Höhe H4 mit Ankerwinde und Zwischenschott/Raum	0,5	0					0	0	0-0,1
Bugräume auf Höhe H4 mit Ankerwinde und Zwischenschott/Raum	0	0				2	0	0	0-0,1
Laderaum H4	0	0					0	0	0-0,1
Lagerraum auf Höhe H4 mit Metallteilen	0	0					0	0	0-0,1
Laderaum H4	0	0					0	0	0-0,1
Lagerraum auf Höhe H4 mit Metallteilen, uns Schleppösen	0	0					0	0	0-0,1
Laderaum H4	0	0					0	0	0-0,1
Innentreppe zu Lade/Fährdeck	0	0					0	0	0-0,1
unterstes, geschlossenes Fährdeck/Eisenbahndeck (H3)	0						0		0-0,1
Bugräume auf Höhe H3	0						0		0-0,1
Raum mit Brandbekämpfungsausrüstung in Bug auf Höhe H3	0	0				4	0		0-0,1
Bugräume auf Höhe H3	0	0					0	0	0-0,1
Bugräume auf Höhe H3 mit kleine Zwischenräume, Bugstrahlmotoren, Elektromotoren (Wasser)	0	0		3			0		0-0,1
Bugräume auf Höhe H3 leer	0	0					0	0	0-0,1
Laderaum H3	0	0		3		4	0		0-0,1
Innentreppe zu Lagerräumen	0	0					0	0	0-0,1
Lagerräume mit haltbaren Lebensmitteln (Getränke, etc)	0	0					0		0-0,1
Lagerräume mit haltbaren Lebensmitteln (Getränke, etc)	0	0					0	0	0-0,1
Aufzug nach H4	0	0					0	0	0-0,1
Laderaum H4	0	0					0	0	0-0,1
Aufzug	0	0					0	0	0-0,1
Werkstatträume mit Werzeugen und Ersatzteilen	0	0					0	0	0-0,1
Raum mit Abwasserbehandlung	0,5	0				0	0	0	0-0,1
Raum mit Abwasserbehandlung u. CO2-Tank	0	0					0	0	0-0,1
Treibstoffbunker und Schwerölaufbereitung /Erwärmung u. Filter	0	0					0		0,3
Wellengeneratoren (Stromerzeugung)	0,5	0					0	0	0-0,1
Schwerölschiffsmotoren (erste Ebene)	0,5	0					0	0	0-0,1
Schwerölschiffsmotoren (zweite Ebene)	0,5	0					0	0	0-0,1
Schwerölschiffsmotoren (zweite Ebene)	0,5	0					0	0	0-0,1
Innentreppe	0,5	0					0	0	0-0,1
Treppenhaus Passagierbereich	0,5	0					0	0	0-0,1
Lagerraum H3	0	0		3			0		0-0,1
Treppenhaus Innen	0	0					0	0	0-0,1
Passagierbereich/Kojen	0	0					0		0-0,1

5.1.2 Identifizierung unbekannter Stoffe

Eine schnelle Identifizierung unbekannter Stoffe an Bord ist im Falle absichtlich oder unabsichtlich herbeigeführter Gefahrgut/Gefahrstofffreisetzungen von Interesse, da an Bord kurzfristig keine externen Einsatzkräfte verfügbar gemacht werden können. Die Erstbekämpfung von Bränden und Gefahrstofffreisetzungen obliegt der Mannschaft an Bord.

Zur Identifizierung unbekannter Stoffe bieten sich IR- und Raman-Handspektrometer an. Weitere Informationen auch zur Leistungsfähigkeit und zum Sicherheitsgewinn der Geräte befinden sich im Abschnitt 4.1.3.

Fazit Sicherheitsgewinn:

Die Handspektrometer können einen wichtigen Beitrag bei der Identifizierung unbekannter Stoffe leisten die absichtlich oder unabsichtliche an Bord freigesetzt wurden. Mit Kenntnis der Gefahr können dann die geeignetsten Bekämpfungs- und Schutzmaßnahmen ausgewählt werden. Die Geräte sind in der Anschaffung vergleichsweise teuer und benötigen – wie bereits an anderer Stelle ausgeführt – einen sachkundigen Nutzer welcher von der relativ kleinen mit vielen unterschiedlichen Aufgaben betrauten Mannschaft gestellt werden müsste. Rückfragen bei den SSOs der beteiligten Reeder ergab, dass bisher an Bord keine Vorfälle mit unbekannten Gefahrstoffen beobachtet wurden. Es kann also diskutiert werden, ob eine Ergänzung der Ausstattung an Bord mit Messgeräten zur Identitätsbestimmung gering-flüchtiger Stoffe verhältnismäßig ist, zumal selbst die in Deutschland stationierten Schadstoffbekämpfungsschiffe wie der MS Arkona nicht mit solchen Geräten ausgestattet sind.

5.1.3 Überwachung des Fahrzeugdecks hinsichtlich austretender Gefahrstoffe.

Im Projekt VESPER^{Plus} wurde ein Rauchgasansaugsystem zur Detektion von Bränden auf Fahrzeugdecks aufgebaut und getestet. Dieses Arbeitspaket wurde vom Projektpartner ISV verantwortet, die Hochschule Bonn-Rhein-Sieg hat sich während der Projektlaufzeit an dem Arbeitspaket beteiligt, um neben der Rauchgaserkennung ein multisensorielles Gaswarnsystem zu integrieren und zu evaluieren. Das Gaswarnsystem wurde in mehreren gemeinsamen Messkampagnen in der Hochschule Bonn-Rhein-Sieg sowie an Bord von zwei Fährschiffen bezüglich seiner Leistungsfähigkeit getestet. Parallel zum Gasmesssystem der Hochschule Bonn-Rhein-Sieg hat das ISV zwei Sensor- Arrays der Firma EADS RST Rostock zusätzlich eingesetzt, so dass ein direkter Vergleich der Systeme möglich war. Innerhalb der Versuchsreihen

wurde evaluiert, inwieweit das System der Hochschule Bonn-Rhein-Sieg auf eine Auswahl von Substanzen reagiert, die in Zusammenarbeit mit dem ISV aus deren Gefahrstoffanalyse ausgewählt wurden. Zum Einsatz kamen Gase, in nachfolgender Tabelle 3 aufgezählt, die in den Gasanalysen durch besonders hohe Transporthäufigkeit auffielen. Resultierenden Produkten, die bei der Verbrennung oder bei Kontakt mit Wasser, bei diesen Stoffen auftreten wurden ebenfalls erfasst. Isooktan und Toluol wurden als Vertreter einfacher Kohlenwasserstoffe und Inhaltsstoffe von Kraftstoffen ausgewählt. Formaldehyd und Ethanol werden häufig transportiert und sind Gleichzeitig häufig Produkte die bei der Verbrennung von anderen Stoffen freiwerden. Kohlenmonoxid und Stickstoffmonoxid sind Abgaskomponenten und könne bei normalbetrieb auf dem Fährdeck von fahrenden Fahrzeugen aber auch vom Schiff selbst emittiert werden und bilden damit Störgrößen die es zu erfassen gilt. Allerdings tauchen beide Gase auch bei anderen Brandprozessen auf und sind damit Marker für das Branderkennungssystem. Als letzter Vertreter wurde Chlorwasserstoff ausgewählt. Dieser wird bei der Verbrennung chlorhaltiger Verbindungen (z.B. Polyvinylchlorid PVC) frei und stellt durch seine ätzende Wirkung eine besondere Gefahrenquelle dar.

Tabelle 3 Verwendete Testgase. Auswahl aus den Gasanalysen des Projektpartners ISV.

Testgas	**Anmerkung**
Isooktan	Benzin
Toluol	Benzolderivat/ Verbrennungsprodukt
Formaldehyd	Verbrennungsprodukt
Ethanol	Alkohol/ Hydrolyse- und Verbrennungsprodukt
Kohlenmonoxid	Abgas- und Verbrennungsprodukt
Stickstoffmonoxid	Abgas- und Verbrennungsprodukt
Chlorwasserstoff	Verbrennungsprodukt

Neben der Nachweisbarkeit der Modellsubstanzen und der Erfassung von Basiskenndaten des Systems wurde weiter ein Onlineklassifikationsverfahren erarbeitet, welches neben der reinen Detektion einer Anomalie auch eine erste Klassifizierung der Substanzen erlaubt.

5.1.3.1 Aufbau des Sensorsystems:

Für die Integration weiterer Sensoren in das Ansaugsystem des ISV wurde ein modulares Sensorsystem mit elektrochemischen Zellen, Halbleitergassensoren und einem PID realisiert. Zusätzlich wurden das Multisensorsystem GDA 2, ein zusätzlicher Photoionisationsdetektor (PID, MiniRAE 3000) und ein FT-IR-Gasanalysator (FT-IR, Gasmet DX 4000) in den Versuchsaufbau integriert. Mit diesem System konnten gleichzeitig Messungen an unterschiedlichsten Sensoren vorgenommen werden und deren Eignung auf die Verwendbarkeit getestet werden.

Aufgebaut ist diese Box aus einem Aluminiumgehäuse, in der eine aktiv belüftete Messstrecke zur Integration unterschiedlicher Sensoren realisiert ist (siehe Abbildung 16). Außerhalb der Messstrecke befinden sich die Datenerfassung sowie die Stromversorgung und die Regelsteuerung der Belüftung. Um auch externe Geräte wie den GDA2 integrieren zu können wurde ein sekundärer Ausgang über einen Teflon Schlauch verbaut. Über diesen lassen sich mittels Swagelok- Verbindungen unterschiedliche Geräte in die Messstrecke integrieren. Gesteuert wird das ganze System von einer hierfür entwickelten LabView Software, die in zwei Versionen realisiert wurde.

In der ersten Softwareversion wurden alle Funktionen zum Steuern des Sensorsystems und zur Aufnahme und Speicherung aller Messdaten integriert. Parallel hierzu wurde eine offline Variante eines Auswerteprogramms getestet, welches dazu genutzt wurde, die verschiedenen Verfahren der Merkmalsextraktion und Mustererkennung der Messdaten zu erproben. In der zweiten Version der Software wurden beide Teile, Datenaufnahme und Auswertealgorithmus, in einer Programmversion zusammengefasst, so dass eine lauffähige online Klassifizierung während der zweiten Messkampagne an Bord getestet werden konnte.

Abbildung 16 zeigt den schematischen Aufbau des Sensorsystems. In einer Aluminiumkiste befindet sich ein abgetrennter Strömungskanal, der von einem Gebläse mit Luft versorgt wird und in den die Sensorik integriert ist. Weiter befindet sich alle benötigte Steuer- und Regelungselektronik in der Box. Das Design ist so ausgelegt, dass für den Betrieb der Box lediglich ein 220V Anschluss Vorhandensein muss. Die Speicherung und Auswertung der Daten erfolgt über einen separaten Laptop.

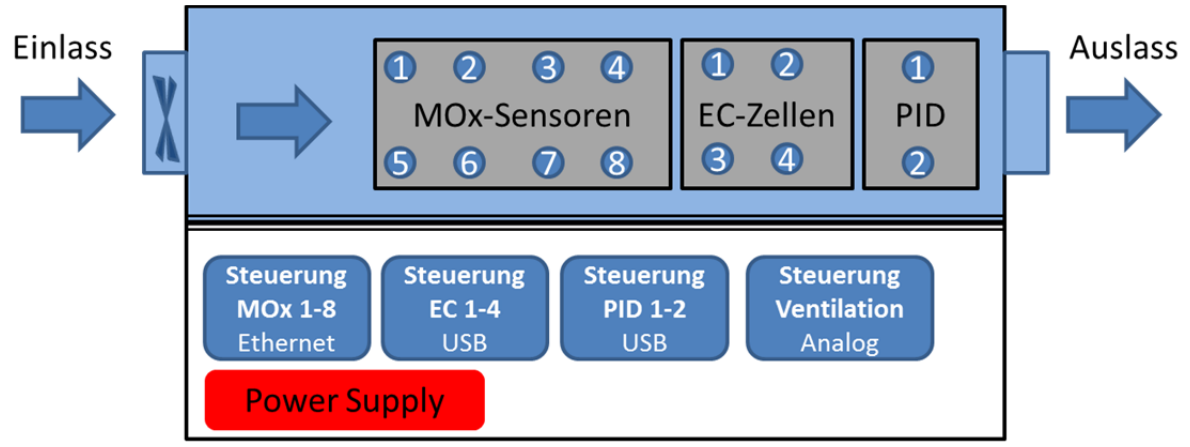


Abbildung 16: Schematischer Aufbau des Sensorsystems. Neben der eigentlichen Sensorik sind auch Stromversorgung und Steuer- und Regeleinheiten innerhalb der Box untergebracht.

Tabelle 4 Auflistung der im System verbauten Sensoren. Die Auswahl der Sensoren deckt ein weites Spektrum von Zielgasen ab. Neben der breitbandigen Erfassung verschiedener Kohlenwasserstoffe sind spezielle Sensoren für den Nachweis von NO, NO_2 sowie CO vorgesehen.

	Sensor	Heizspannung	Zielgas
1	UST 1333	5 V	Breitband Sensor
2	UST 3430	3,5 V	Kohlenwasserstoffe UEG- Überwachung
3	UST 5430	1 V	Ozon + NO_2
4	UST 7333	2,3 V	NO_2
5	AS-MLK	2,7 V	Methan
6	AS-MLC	2,3 V	Kohlenmonoxid
7	Fig 02	5 V	VOC
8	Fig 20	5V	Alkohol + Lösungsmittel
EC 1	NO		
EC 2	CO		
EC 3	CO		
EC 4	NO_2		
PID	PID A1		
PID	PID AH		

Für die Versuche in Zusammenarbeit mit dem ISV wurde die Ventilation an das ISV-System angepasst und die in Tabelle 4 genannten Sensoren in das Messsystem integriert. Es handelt sich hierbei um eine Auswahl von kommerziell erhältlichen Halbleitergassensoren, elektrochemischer Zellen und Photoionisationsdetektoren. Hier-

durch kann sichergestellt werden, dass sich bei einem erfolgreichen Test des Systems leicht ein markfähiges System entwickeln lasst.

Nachfolgendes Schema (Abbildung 17) verdeutlicht den Versuchsaufbau der in den Messkampagnen genutzt wurde. Auf einer Länge von ca. 43 m wurde das Rohrleitungssystem des Rauchansaugsystems an der Wand in einer Höhe von 160 cm angebracht an dessen Ende sich das Pumpsystem der RAS-Einheit befindet. Die über das System eingesaugte Luft wird innerhalb des Pumpsystems über einen optischen Streulichtsensor auf Rauchpartikel hin untersucht und anschließend zu den Gasmesssystemen weitergeleitet. In direkter Linie nach dem RAS-System befindet sich der von ISV eingesetzte kommerzielle Sensorarray an den sich das H-BRS- Sensorsystem anschließt. Aus dem Sensorsystem heraus werden der GDA 2 das FT-IR sowie das PID, welche jeweils über interne Pumpsysteme verfügen mit Gas versorgt. Für die ersten Versuche wurde mittels einer Gasspritze jeweils 1l der verwendeten Testgase in die Ansaugöffnungen eingespritzt um die Grundsätzliche Nachweisbarkeit der einzelnen Gase sowie die Leistungsfähigkeiten der einzelnen Messsysteme zu Charakterisieren.

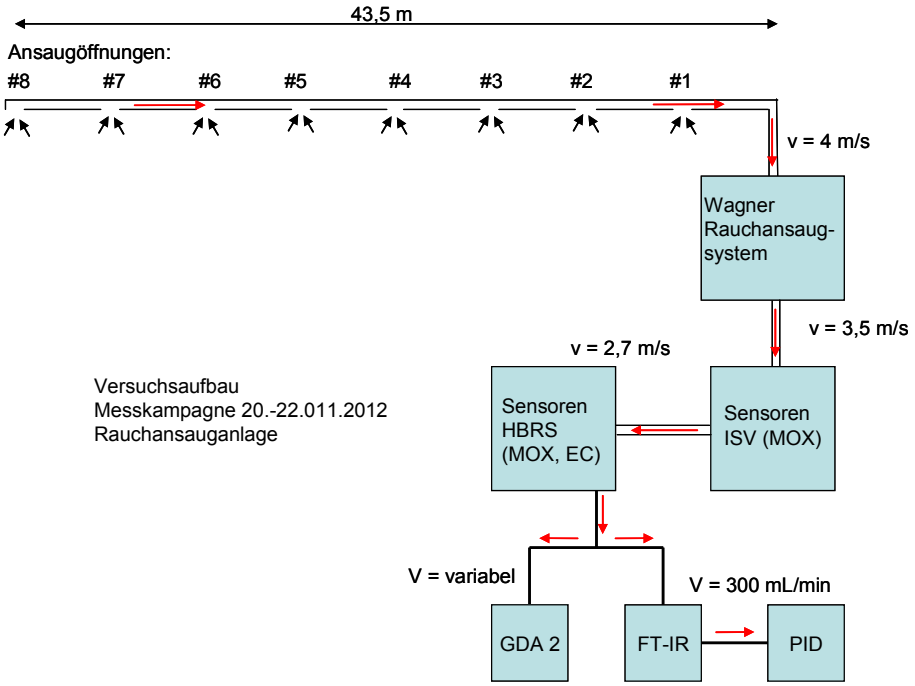


Abbildung 17: Versuchsaufbau des Rauchgasansaugsystem für die ersten Laborversuche.

Im nachfolgenden Kapitel sind die Wichtigsten Ergebnisse des Arbeitspaketes zusammengefasst und die Funktionsweise der Onlineklassifikation erläutert.

Ergebnisse:

Auswertung Photoionisationsdetektor MiniRAE 3000 und des FT-IR-Gasanalysator innerhalb der ersten Labormesskampagne:

Die vom PID im Sensorsystem gemessenen Analytkonzentrationen für die verschiedenen in das System eingespritzten Testgase lagen im Bereiche von 0,1 – 2 ppmV. Da sich die Nachweisgrenze des Gerätes in diesem Konzentrationsbereich befindet war eine eindeutige Unterscheidung zwischen dem Auftreten eines Signales nach der Injektion der Gase und dem typischen Rauschen des Sensorsignals nicht eindeutig möglich. Mit dem FT-IR waren keine Konzentrationsmessungen möglich, da bei dem Gerät erst ab Gaskonzentrationen > 5 ppmV mit auswertbaren Signalintensitäten zu rechnen ist. In den weiteren Messkampagnen wurde daher auf eine Integration dieser beiden Geräte verzichtet.

5.1.3.2 Kalibrierung des Systems unter Laborbedingungen

Um die Sensoren zu kalibrieren wurde am Ende des Ansaugsystems eine Einheit zur zu Dosierung von Testgasen in den Luftstrom integriert (Abbildung 18). Hierfür wurden über einen Mass Flow Controller (MFC) Testgase (CO, NO, Aceton) in das System eigebracht. Aus den Verhältnissen von Testgasstrom und Luftstrom, der durch das RAS-System angesaugt wurde, konnten die Gaskonzentrationen in einem Bereich von 0 bis 8 ppm eingestellt werden. Zur Bestimmung der Konzentration wurden eine elektrochemische Zellen sowie das PID genutzt, da diese einen nahezu lineare Konzentrationsabhängigkeit aufweisen.

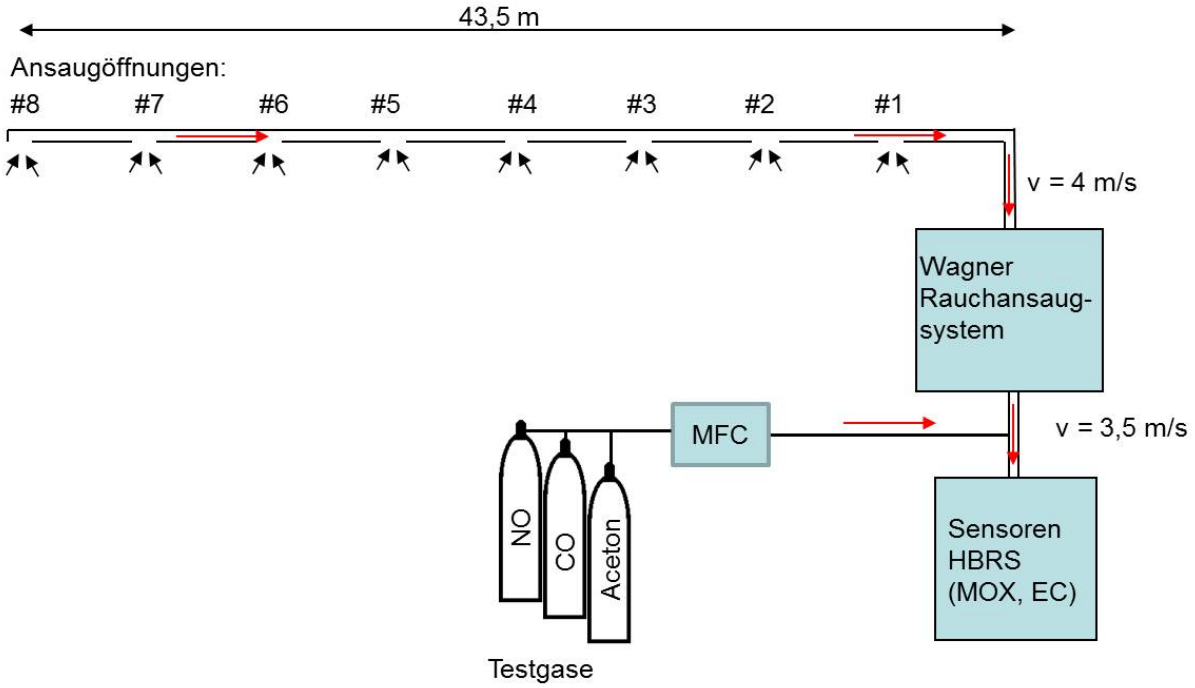


Abbildung 18: Versuchsaufbau zur Kalibrierung des Sensorsystems.

Nachfolgende Abbildung 19 und Abbildung 20 zeigen beispielhaft die Kalibrierung für NO und Aceton.

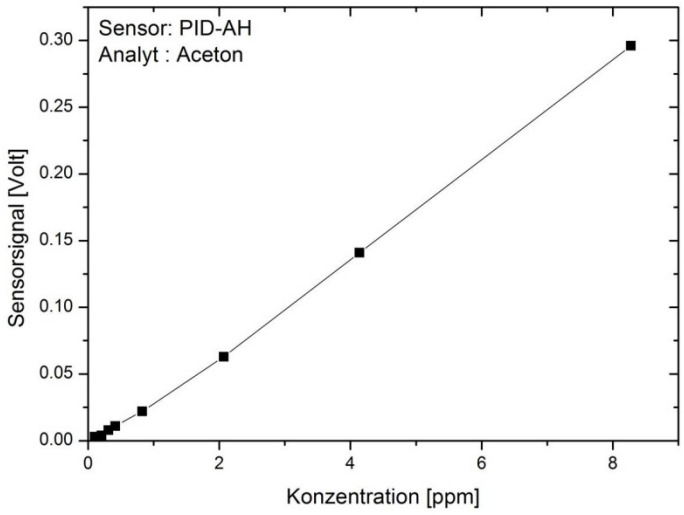


Abbildung 19: Kalibrierung des Sensors PID AH mit Aceton im Konzentrationsbereich von 0,1 bis 8ppm.

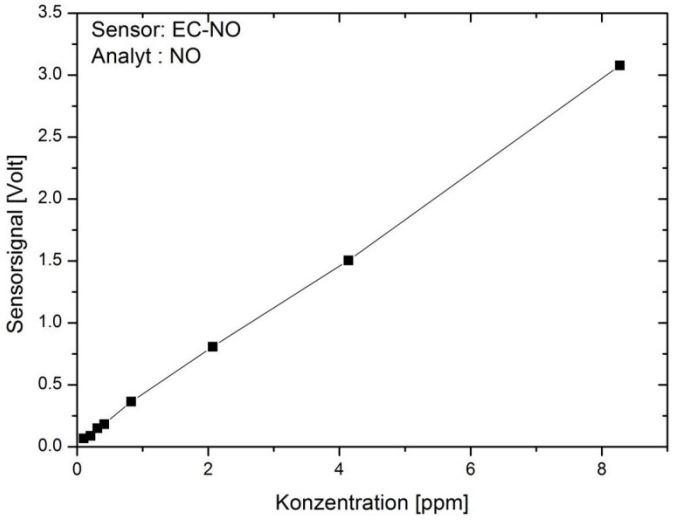


Abbildung 20: Kalibrierung der elektrochemischen Zelle EC-NO mit Stickstoffmonoxid im Konzentrationsbereich von 0,1- 8ppm.

Die Nachweisgrenzen bewegen sich für diese Sensoren im Bereich von ca. 100 ppb und ermöglichen damit auch bei starker Verdünnung von Testsubstanzen während immer noch zuverlässig eine Konzentrationsbestimmung.

5.1.3.3 Bestimmung der Verdünnungsfaktoren innerhalb des Ansaugsystems

Durch ein weiteres Experiment, bei dem kontinuierlich eine Konzentration von 500 ppm CO an verschiedenen Ansaugöffnungen in das Rohrleitungssystem eingeleitet wurden, konnte unter zu Hilfenahme der Kalibrierung eine Abschätzung der Verdünnung der Analytkonzentrationen innerhalb des Systems vorgenommen werden. Es wurden hierzu exemplarisch die Experimente am Ende (Öffnung 8) in der Mitte (Öffnung 3) und in die erste Öffnung (Öffnung 1) nahe dem Ansaugsystem durchgeführt.

Abbildung 21 zeigt die gemessenen Konzentrationen bei diesen Versuchen. Es konnte festgestellt werden, dass sich unabhängig von der Ansaugöffnung ein Verdünnungsfaktor von ca. 50 einstellt.

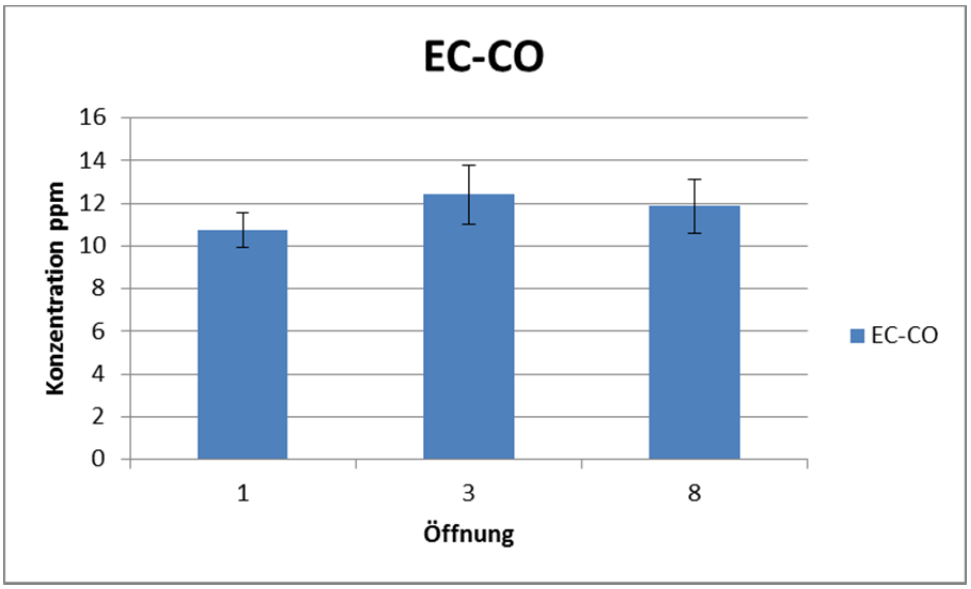


Abbildung 21: Gemessene Konzentration zur Bestimmung der Verdünnung innerhalb des Ansaugsystems

Nimmt man für einen sicheren Nachweis einer Substanz ein Detektionslimit der Sensoren von 100 ppb an, muss es zu einer Exposition von mindestens 5 ppm der Analytkonzentration vor einer Ansaugöffnung kommen, um eine sichere Anzeige garantieren zu können.

5.1.3.4 Bestimmung der Reaktionszeiten des Systems nach Analytexposition

Ein weiterer wichtiger Parameter zur Charakterisierung des Gesamtsystems ist die Reaktionszeit der Sensoren nach einer Analytexposition. Diese setzt sich aus drei Teilzeiten zusammen: Reaktionszeit des Sensors, Verweildauer des Analyten innerhalb des Rohrleitungssystems und der Zeit die der Analyt vom Expositionsort bis zur Ansaugöffnung benötigt. Hierbei spielt die Reaktionszeit des eigentlichen Sensors keine Rolle, da diese im Bereich von wenigen Millisekunden liegt, und damit um Größenordnungen kleiner ist als die beiden anderen Einflussfaktoren.

Um die Verweildauer innerhalb des Leitungssystems und die Zeit, die der Analyt vom Expositionsort bis zum Rohrleitungssystem benötigt, zu bestimmen wurden Experimente unter Laborbedingungen und auf beiden Messkampagnen unter realen Bedingungen durchgeführt. Eine Analytquelle wurde durch ein 20x20cm großes mit Aceton getränktes Gewebetuch simuliert. Dieses wurde für die Bestimmung der internen Verzögerung vor die Ansaugöffnungen eins, drei und acht verbracht. Es wurde die Zeit bestimmt bis die Sensoren ein eindeutiges Signal zeigten (Als Kenngröße der eindeutigen Signalantwort wurde das Rauschen des Sensors bestimmt und bei einer Überschreitung um das zehnfache der Zeitpunkt für die Verzögerung gemessen).

Nachfolgendes Diagramm in Abbildung 22 zeigt die Ergebnisse dieser Messung auf einer der beiden Messkampagnen auf der Transrussia.

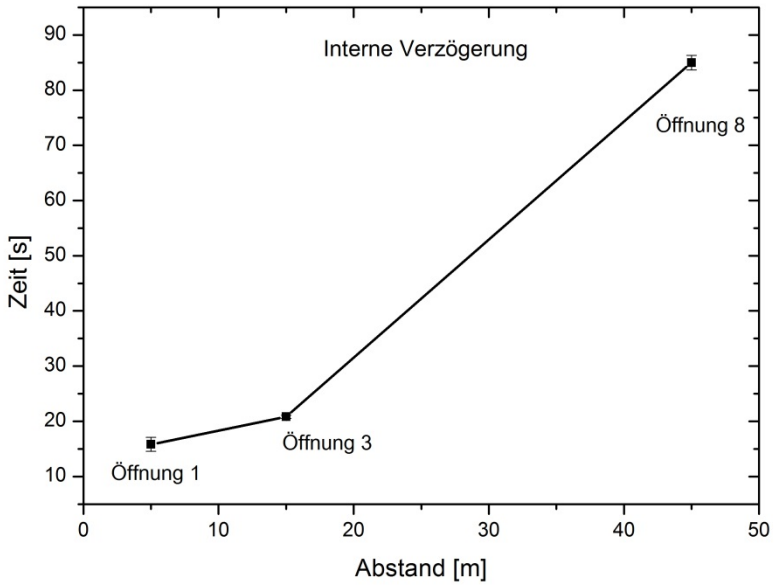


Abbildung 22: Zeit bis zur eindeutigen Anzeige eines Analyten nach Exposition direkt vor Ansaugöffnung eins, drei und acht

Die Bestimmung der Zeit, die der Analyt vom eigentlichen Expositionsort bis zum Ansaugsystem benötigt ist wesentlich schwerer zu bestimmen, da bedingt durch unterschiedliche Luftströmungen innerhalb der Ladedecks nur eine Momentaufnahme während der Versuche bestimmt werden kann. Allgemein hat der Beladungszustand, die Art des Ladedecks (geschlossen, halboffen) sowie die Belüftung unterschiedliche Einflüsse auf diese Größe. Innerhalb der Messkampagnen konnte hierbei nicht alle Größen durch und in einzelnen Versuchsreihen untersucht werden. Exemplarisch zeigt Abbildung 23 die Verzögerungen die bei Versuchen der ersten Messkampagne auf einem Halboffenen Deck bei einer Umgebungstemperatur von ca. 20 °C erfolgten. Innerhalb dieser Messkampagne konnten durch Wiederholungsversuche bei unterschiedlichem Beladungsgrad immer ähnlich Zeiten erzielt werden. Innerhalb der zweiten Messkampagne auf einem geschlossenen Fahrzeugdeck variierten die Ergebnisse wesentlich stärker was auf eine mangelnde Luftströmung innerhalb des Ladedecks zurückgeführt wurde.

Aus den Versuchen lassen sich somit die Reaktionszeiten nur grob abschätzen und variieren in Abhängigkeit vom Abstand und weiterer Umgebungsbedingungen im Bereich von ca. 2-10 min.

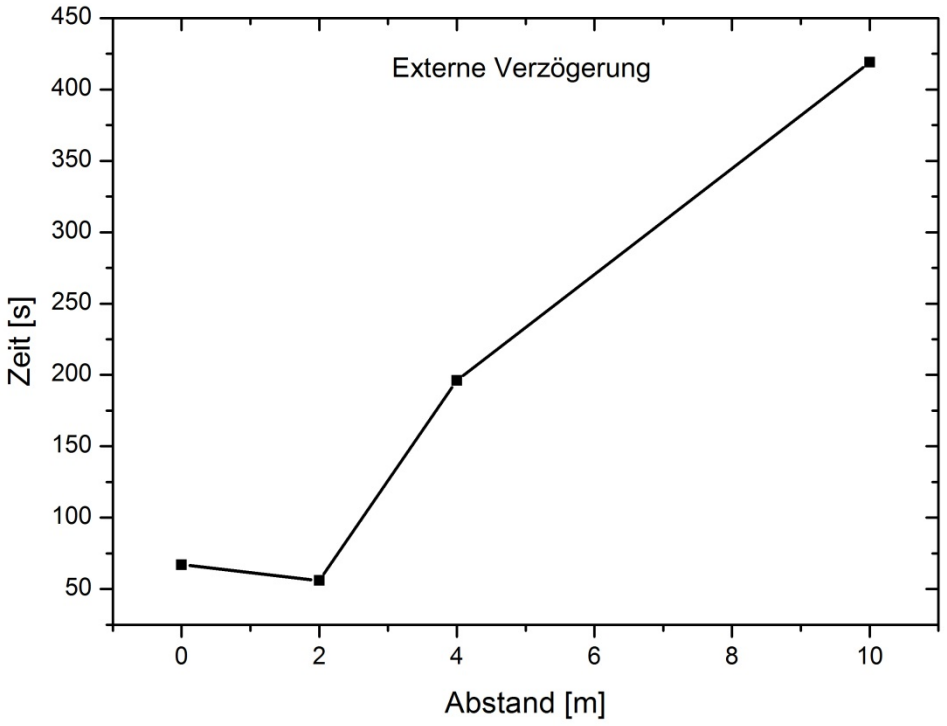


Abbildung 23: Zeit bis zur eindeutigen Analytexposition bei unterschiedlicher Entfernung der Analytquelle auf Höhe von Ansaugöffnung 3

5.1.3.5 Klassifikation der Sensorsignale

In allen Experimenten konnte mittels der Sensoren ein Signalmuster erzeugt werden, welches mittels des statistischen Verfahrens der Hauptkomponenten Analyse (PCA) ausgewertet wurde. Hierzu wurde aus den Signalen der einzelnen Sensoren jeweils zwei Merkmale (Signal Maximum und Minimum) beim Auftreten eines Analyten extrahiert. Das Verfahren wurde analog auf die Sensorkanäle des GDA 2 angewandt.

Die Analyse zeigt, dass eine Klassifizierung der einzelnen Substanzen unter den gegebenen Versuchsparametern möglich ist (Abbildung 24). Somit lässt sich sagen, dass über ein einfaches System aus Sensoren neben der Branderkennung auch eine Detektion von Gasen möglich ist.

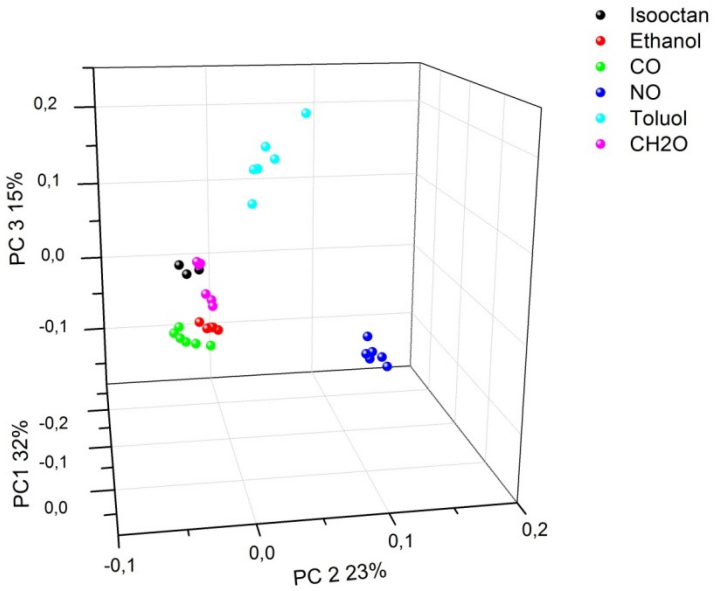


Abbildung 24: Hauptkomponentenanalyse der Sensorsignale aller verwendeten Sensoren. Die in Punktwolken zusammenliegenden Messungen einer Substanz sprechen für die gute Separierung der Stoffe untereinander.

Auswertung GDA 2:

In allen Experimenten, in denen der GDA 2 zum Einsatz gekommen ist (Alle Laborversuche, erste Messkampagne auf der Fähre), konnte mittels der Sensorkanäle des GDA 2 ein Signalmuster erzeugt werden. Die Auswertung (siehe Abbildung 25) zeigt, dass auch mit dem GDA 2 unter den Versuchsbedingungen eine Unterscheidung der einzelnen Analyten möglich ist. Einen wesentlichen Beitrag zur Unterscheidung der einzelnen Verbindungen leistet hier das im Gerät integrierte Ionenmobilitätsspektrometer (IMS), welches aber während der Versuche aufgrund seiner hohen Sensitivität auf Ausgasungen aus den im Versuchsaufbau verbauten Materialien reagierte und des Öfteren Überladungsprobleme zeigte. Diese Überladungsprobleme zeigten sich noch deutlicher beim Einsatz des GDA 2 unter realen Bedingungen auf dem Fährdeck. Bei den Versuchen wurde deutlich, dass die verbaute IMS- Technologie deutlich zu empfindlich für die raue Umgebung des Ladedecks war.

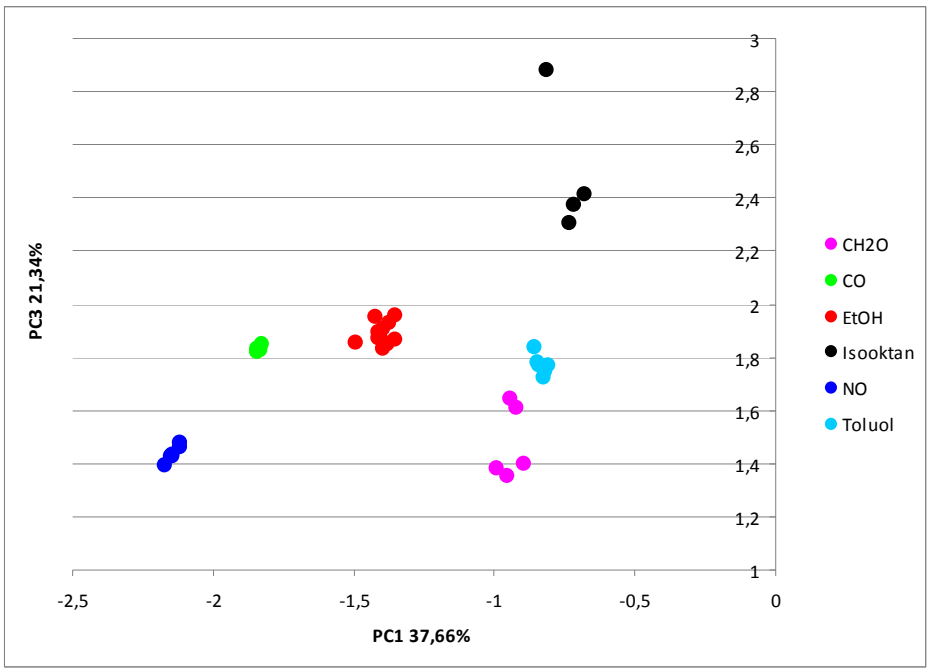


Abbildung 25: Hauptkomponentenanalyse der Sensorkanäle des GDA 2

5.1.3.6 Entwicklung eines Onlineklassifikators

Die Onlineklassifikation beruht auf einem einfachen lernenden Algorithmus, der mittels Vergleich von Referenzdaten einzelne Stoffklassen identifizieren soll. Der gesamte Algorithmus setzt sich aus mehreren Teilschritten zusammen. Nach der Erfassung der Signale werden diese über eine Funktion transformiert und es werden 24 stoffspezifische Merkmale extrahiert. Diese Merkmale werden in einem sogenannten „feature Vektor“ zusammengefasst und können als Fingerabdruck einer Substanz-Klasse verstanden werden. Um weitere Rechenschritte zu vereinfachen werden die 24 dimensionalen feature Vektoren mittels des Verfahrens der Hauptkomponentenanalyse auf drei Dimensionen reduziert. Durch den Aufbau einer Stoffbibliothek, in der durch Referenzmessungen die Stoffe als derartige drei dimensionale Vektoren hinterlegt sind, lässt sich eine neu gemessene Substanz anhand eines Klassifikationsverfahrens in eine Gruppe der zuvor erlernten Substanzen einordnen. Für diesen letzten Schritt der Klassifizierung wird der „k-nearest-neighbor“ – Algorithmus [Bicego2002] angewandt. Nachfolgendes Ablaufschema in Abbildung 26 zeigt die Teilschritte der Klassifizierung die im weiterem näher erläutert werden.

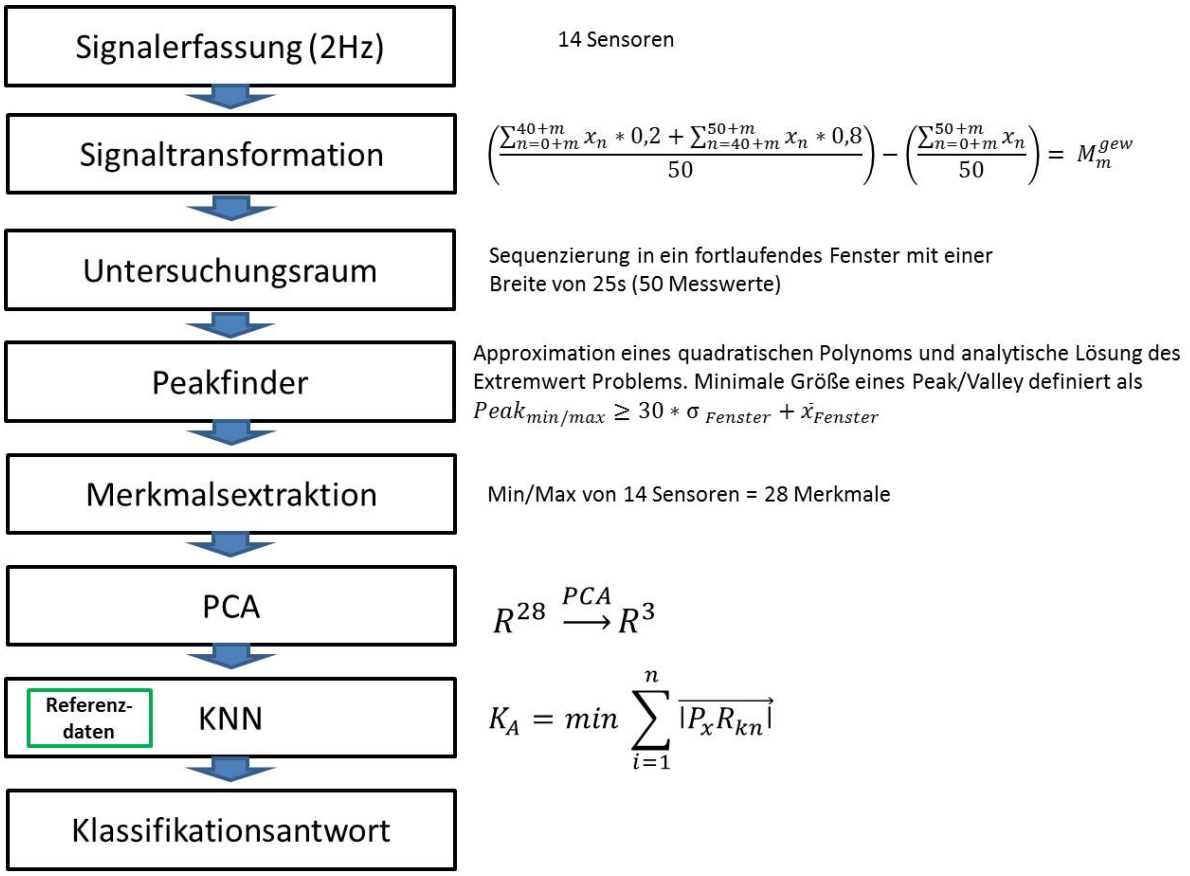


Abbildung 26: Ablaufschema des Klassifikationsalgorithmus. Links: die im Einzelnen ablaufenden Schritte der Klassifizierung. Rechts: Kurzanmerkungen und Erläuterungen.

Signaltransformation:

Für die Transformation wurde innerhalb eines Fensters, bestehend aus 50 Messwerten, die Differenz aus einem gewichteten Mittelwert und dem arithmetischen Mittel gebildet wobei die letzten 20% der aufgenommenen Werte (entspricht 10 Werten) im Verhältnis 5:1 gewichtet wurden. Hierdurch treten Änderungen innerhalb des Signalverlaufs deutlich stärker hervor. Durch Subtraktion des arithmetischen Mittelwertes kann das Signal zusätzlich normiert werden und gleicht den Drift von Sensoren über längere Zeiträume aus. Mit nachfolgender Formel (1) wird die Transformation berechnet. M_m^{gew} ist dabei der transformierte Wert aus den zurückliegenden 50 Messwerten und ersetzt den aktuellen Messpunkt. x_n ist jeweils der Messwert an der Stelle n des Fensters der letzten 50 Werte, wobei m für den Index des aktuellen Messpunktes steht gerechnet ab Beginn der Messung mit Index 0.

$$\left(\frac{\sum_{n=0+m}^{40+m} x_n * 0{,}2 + \sum_{n=40+m}^{50+m} x_n * 0{,}8}{50}\right) - \left(\frac{\sum_{n=0+m}^{50+m} x_n}{50}\right) = M_m^{gew} \quad (1)$$

Peakfinder/ Merkmalsextraktion:

Zur Bestimmung aussagekräftiger Merkmale wird das transformierte Eingangssignal auf Extremwerte hin untersucht. Die Extremwerte des transformierten Signals sind dabei ein Maß für das Maximum der Änderung eines Signals über der Zeit oder anders ausgedrückt ein Maß für die maximale Steigung innerhalb des untersuchten Signalbereichs. Hierzu wird innerhalb eines Fensters von 25s eine Peak /Valley suche durchgeführt. Zur Bestimmung von Extremwerten wird hierzu an das Eingangssignal eine quadratische Funktion angepasst und diese analytisch über die 1. und 2. Ableitung gelöst. Da auf diese Weise für jede approximierte Funktion Extremwerte gefunden werden können gilt es einen Schwellwert zu definieren, welcher als Maß für eine Detektion gilt.

Dieser Schwellwert wird definiert als:

$$\mathbf{Peak_{min/max}} \geq \mathbf{30} * \boldsymbol{\sigma}_{\mathbf{Fenster}} + \bar{\mathbf{x}}_{\mathbf{Fenster}} \quad (2)$$

Dabei berechnet sich mit Formel (2) die minimale Höhe eines Peaks/Valleys aus dem Mittelwert $\dot{x}_{Fenster}$ des Fensters plus der 30fachen Standardabweichung $\sigma_{Fenster}$.

Der Schwellwert wird für jedes zu untersuchende Signalfenster neu gebildet und wirkt dadurch zusammen mit der Signaltransformation dem Sensordrift über Längere Messzeiten entgegen. Die so erhaltenen Merkmale werden in einen Merkmalsvektor zusammengefasst (P_x).

Hauptkomponentenanalyse:

Die Hauptkomponentenanalyse (PCA) ist ein gängiges Verfahren der multivariaten Statistik zur Datenreduktion und Auswertung hochdimensionaler Daten. Nachfolgend soll an dieser Stelle nur eine kurze Darstellung des zu Grunde liegenden Funktionsprinzips gegeben werden. Weitere Informationen sind in der Fachliteratur zu entnehmen (Mitrovics2004, Kessler2007). Die durch die Merkmalsextraktion erhaltenen Daten (Objekte) sind gegeben durch Merkmalsvektoren der Form: $P_x = (x_1, x_2, \ldots, x_n)$. Die Elemente x_i des Vektors P_x stellen dabei die Merkmale also Kenndaten R_x dar, die aus einer Messung extrahiert werden.

Für die Mustererkennung lässt sich eine Matrix $\underline{\underline{X}}$ erstellen, welche die Vektoren der einzelnen Testmessungen beinhaltet. In $\underline{\underline{X}}$ stehen also zeilenweise die Informationen über durchgeführte Testmessungen und spaltenweise jeweils die Informationen

über eingesetzten Merkmale.

$$\underline{\underline{X}} = \begin{pmatrix} \vec{x}_1 \\ \vec{x}_2 \\ \dots \\ \vec{x}_m \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1n} \\ x_{21} & \dots & & \dots \\ \dots & & \dots & \dots \\ x_{m1} & \dots & \dots & x_{mn} \end{pmatrix}$$

Diese Matrix spannt den Untersuchungsraum über alle Sensoren auf und ist im angewendeten Fall 28-dimensional.

Die PCA ist nun als Lösungswerkzeug zu verstehen, welches nach den n-Hauptkomponenten, also den n unkorrelierten Linearkombinationen der Matrix $\underline{\underline{X}}$ mit maximaler Varianz sucht. Zur Lösung dieses Problems werden die Eigenwerte und Eigenvektoren der Kovarianz- bzw. Korrelationsmatrix von $\underline{\underline{X}}$ gesucht.

Durch dieses Verfahren werden die Ausgangsdaten so projiziert, dass im Idealfall durch die ersten zwei oder drei Hauptkomponenten ein Großteil der Varianz des Datensatzes und damit des Informationsgehalts des Datensatzes abgebildet wird.

Für ein besseres Verständnis ist die geometrische Betrachtung der PCA in Abbildung 27 für den 2-dimensionalen Fall verdeutlicht. Die Suche der Linearkombinationen mit maximaler Varianz lässt sich als Rotation des Koordinatensystems innerhalb des Untersuchungsraumes verstehen, wodurch sich im nachfolgenden Beispiel der 2-dimensionale Raum auf eine Dimension abbilden lässt. Hierbei ist in A die Ausgangslage der Datenmatrix dargestellt. Durch die PCA wird das Koordinatensystem gedreht wobei die Hauptkomponenten die neunen Achsen x´ und y´ bilden. Wie leicht zu erkennen ist wird das System durch die Achse x´ im gedrehten Koordinatensystem fast gänzlich beschreiben, so dass ohne größeren Informationsverlust y´ vernachlässigt werden kann. Auf diese Weise lässt sich der zweidimensionale Raum (R^2) in den eindimensionalen Raum (R^1) abbilden.

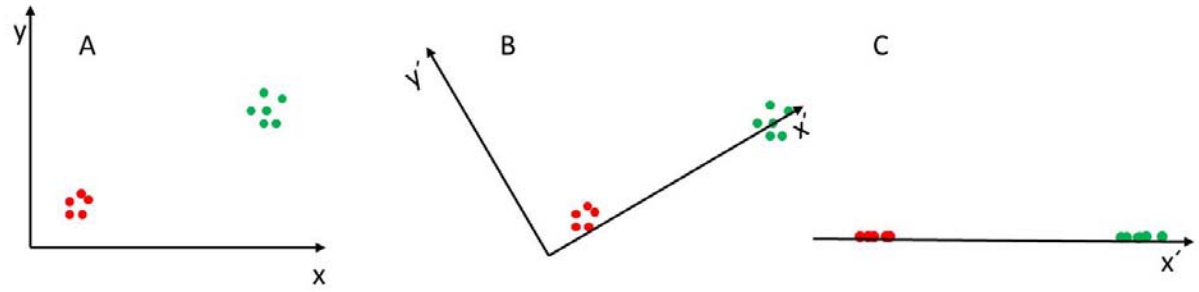


Abbildung 27: Geometrische Betrachtung der PCA. A: Ausgangsdaten, B: gedrehtes Koordinatensystem, C: Elimination nicht benötigter Hauptkomponenten (Achsen)

K-nearest-neighbor- Algorithmus (KNN-Algorithmus) und Klassifikationsantwort

Um eine endgültige Klassifikationsantwort zu erhalten wird der KNN-Algorithmus verwendet.

Eine durch die Sensoren detektierte Anomalie und der daraus resultierende Merkmalsvektor P_x werden mit Hilfe dieses Verfahrens mit zuvor erlernten Trainingsdaten (R_{kn}) verglichen, wobei die Indizierung k für die zugehörige Klasse und n für das jeweilige Einzelelement der Klasse steht. Das bedeutet, dass der Abstand von P_x zu allen Elementen einer Klasse wird aufsummiert wird. Es wird dabei angenommen, dass P_x zu der Klasse zu zählen ist, zu welchem er den geringsten Abstand besitzt. Nachfolgende Formel vereinfacht und verdeutlicht das Verfahren nochmals.

$$\mathbf{K_A = min \sum_{i=1}^{n} |\overrightarrow{P_x R_{kn}}|} \quad (3)$$

Der KNN- Algorithmus ist dabei als robuste und einfach zu berechnender Klassifikator zu verstehen, der allerdings auch Nachteile besitzt. So wird zwar für jeden Punkt P_x eine Klassifikationsantwort gefunden, allerdings ist es schwierig, ein Vertrauensintervall für die Antwort zu bestimmen, da zwar eine Rangfolge der Abstände bestimmt wird, aber der Abstand selbst nicht weiter betrachtet wird. Für den im Projekt bearbeiteten Anwendungsfall überwiegen allerdings die positiven Eigenschaften dieses Verfahrens, so dass ein Vergleich mit weiteren Klassifikationsverfahren nicht weiter verfolgt wurde.

5.1.4 Linearer Brandmelder

Das im Projekt entwickelte Labormuster eines linearen Brandmelders wurde vom Unterauftragnehmer GTE GmbH erstellt. Nähere Informationen befinden sich im Abschlussbericht der GTE im Anhang

5.1.5 Entwicklung eines Systems zur Luftüberwachung auf orts-untypische Gase

5.1.5.1 Erfassung der Gasemissionen bei Selbstlaboraten

Im Sinne einer Machbarkeitsstudie soll untersucht werden, ob mittels einfacher Sensorsysteme, das Auftreten orts-untypischer Dämpfe, wie sie bei der Herstellung von Selbstlaboraten auftreten können, detektiert werden. Es wurde neben einer Literaturrecherche zum Thema „TATP- Synthese“ ein GC-MS sowie LC-MS-Verfahren für TATP und DADP entwickelt bzw. aus Literaturangaben adaptiert welches für die analytische Begleitung der Versuche benötigt wird. Die Synthese findet in Anlehnung an Robert Matyáš et al. [Matyas2010] statt. Die Reaktionsbedingungen werden wie bei Matyáš et al. übernommen und zusätzlich in den Versuch die Möglichkeit integriert die Gasphase über dem Reaktionsgemisch mittels IR- Spektroskopie zu untersuchen. Abbildung 28 zeigt den schematischen Aufbau des Experiments.

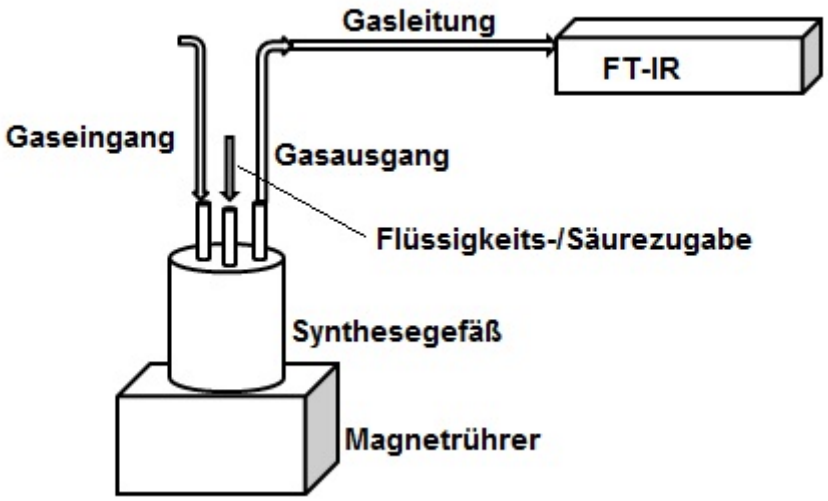


Abbildung 28: Aufbau der Syntheseapparatur für TATP

Der Syntheseansatz wird auf eine theoretische Ausbeute von 2,5 g TATP berechnet. Hierzu wird Aceton (2,5 ml) vorgelegt und mit einer entsprechenden Menge 35% H_2O_2-Lösung (4,35 ml) gemischt. Um die Reaktion zu starten wird als Katalysator 31% Schwefelsäure (6,8 ml) im molaren Verhältnis 0,5 beigegeben. Das resultierende Produkt wird per GC/MS und LC/MS analysiert. Es zeigt sich, dass auch ohne weitere Reinigung durch Rekristallisation TATP bereits in hoher Reinheit vorliegt (ca. 99%).

Nach mehrmaliger Synthese zeigt sich eine reproduzierbare Gasemission innerhalb

der ersten Stunde der Reaktionszeit. Dominiert wird diese von Aceton. Anhand der aufgenommenen Spektren (Abbildung 29) ist zu erkennen, dass mit dem Fortschritt der Reaktion eine stetige Abnahme der Acetonkonzentration auch in der Gasphase einhergeht, welche durch den Umsatz von Aceton zu TATP zu erklären ist. Dabei ist die Abnahme deutlich an den Banden bei ca. 1400 cm^{-1} und den CH-Valenzschwingungen zu erkennen. Die übrigen Banden sinken nicht, da sie wesentlich intensiver sind als die absinkenden Banden und immer noch den Messbereich des IR-Spektrometers überschreiten. Deutliche Anzeichen der synthetisierten Sprengstoffkomponente sind bei der eigentlichen Synthese in der Gasphase nicht zu erkennen, da sie von der dominierenden Aceton Atmosphäre überlagert werden. Es konnte festgestellt werden, dass während der Synthese nur das zeitliche Verhalten der Präkursorsubstanz Aceton als Marker für eine Synthese genutzt werden kann. Hierbei dominiert klar das Verhalten des leicht flüchtigen Acetons weitere Reaktionsprodukte konnten nicht identifiziert werden. Um ein explosives Produkt zu erhalten muss das gewonnene TATP allerdings getrocknet werden. Dadurch wird mit der Zeit Restaceton eliminiert. Dies führt zu einem dualen Ansatz der Detektion einer Synthese: Im ersten Schritt soll eine kontinuierlich abdampfende Lösemittelquelle erkannt werden. Da die Synthese länger dauert als übliche Expositionen von Störsubstanzen wie Kosmetika beinhaltet dieser Schritt bereits den ersten Hinweis auf eine Anomalie innerhalb des zu überwachenden Objektes (Kabine). Da nach der Trocknung des Syntheseproduktes dieses in ausreichendem Maße abdampfen kann soll zusätzlich mittels des gleichen Sensorsystems eine selektive Detektion von TATP möglich sein. Auf Grund dieser ü Ergebnisse bestand der Fokus der weiteren Untersuchungen darauf, mittels Halbeleitergassensoren die Detektion von Lösemitteln und einer gleichzeitigen Detektion von TATP vorzunehmen, da sich mit diesen Sensoren kostengünstige Systeme realisieren lassen, die in größerer Stückzahl produzieren lassen und die flächendeckend in alle geschlossenen Räume eines Schiffs integriert werden können..

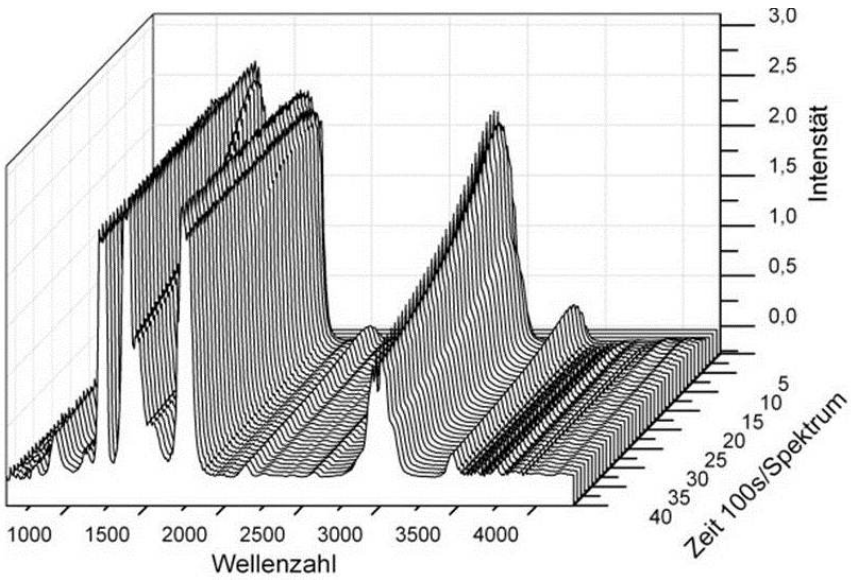


Abbildung 29: Spektren Verlauf zur Synthese von TATP. Das Spektrum wird über die gesamte Messzeit von den Banden des Acetons dominiert. Charakteristisch sind die Banden im Fingerprintbereich bis 1500 cm^{-1}, die Carbonylbande bei ca. 1750 cm^{-1}, sowie die charakteristische doppelte CH-Valenzschwingungen oberhalb von 3000 cm^{-1}.

5.1.5.2 Sensorischer Lösungsansatz zu Detektion organischer Peroxide

Detektionsmöglichkeiten für TATP mittels Halbleitergassensoren sind bereits in der Literatur beschrieben. Dort wird zwar auf die Möglichkeit der Detektion eingegangen, doch scheint die Selektivität der Sensoren für die angedachte Anwendung nicht spezifisch genug zu sein. Aus diesem Grund wurde ein neuartiger Ansatz gewählt, bei dem die Selektivität solcher Sensoren durch Ausnutzung der intramolekularen Funktionalität organischer Peroxide gesteigert werden kann. Organische Peroxide leiten sich in Ihrer Grundform vom Wasserstoffperoxid (H-O-O-H) ab mit der Grundformel R_1-O-O-R_2 wobei mindestens ein Wasserstoff des H_2O_2 durch einen organischen Rest ersetzt wird. Im Fall des Triacetontriperoxids (siehe Abbildung 30) wird eine Ringstruktur gebildet, wobei sich zwischen den Peroxidgruppen jeweils Isopropyl-Gruppen befinden. Betrachtet man das so aufgebaute Molekül erkennt man die beiden für die Detektion mittels Halbleitergassensoren entscheidenden Funktionalitäten: erstens die Peroxid- Gruppen, die einen oxidierenden Charakter besitzen, und zweitens die Alkylreste, die auf der Sensoroberfläche reduzierend wirken. Aus der Literatur ist über die Funktionsweise von Halbleitergassensoren ist bekannt, dass die Sensoren in Abhängigkeit der Anwesenheit von oxidierenden Molekülen mit einer Widerstandserhöhung und in Anwesenheit von reduzierenden Molekülen mit einer Widerstandserniedrigung reagieren. Die Klasse der organischen Peroxide sollte also am Sensor beide Reaktionen zeigen.

Für eine Selektivitätssteigerung wurde deshalb ein temperaturzyklischer Sensorbetrieb konzipiert, der durch Nutzung zweier unterschiedlicher Sensortemperaturen einmal den oxidierenden Charakter des Moleküls anzeigt und auf der zweiten Temperaturstufe das reduzierende Verhalten zur Anzeige bringt. So kann der einzigartige Charakter des Moleküls mittels eines Sensors herausgearbeitet werden und ermöglicht damit ein Merkmal für diese Molekülklasse, welches zum selektiven Nachweis genutzt werden kann. Darüber hinaus soll als alternative Möglichkeit die Entwicklung katalytisch wirkender Filter untersucht werden. Ziel dieses Teilarbeitspaketes soll es sein, bei unzureichender Selektivitätssteigerung durch den vorgeschlagenen temperaturzyklischen Betrieb durch die katalytische Wirkung des Filters zusätzliche Empfindlichkeits- und Selektivitätssteigerungen zu erreichen. Weiter sollen die Experimente mit katalytisch wirkenden Filtern dazu dienen, neue Sensormaterialien zu identifizieren und die an den Oberflächen der Sensoren ablaufenden Reaktionen besser zu verstehen.

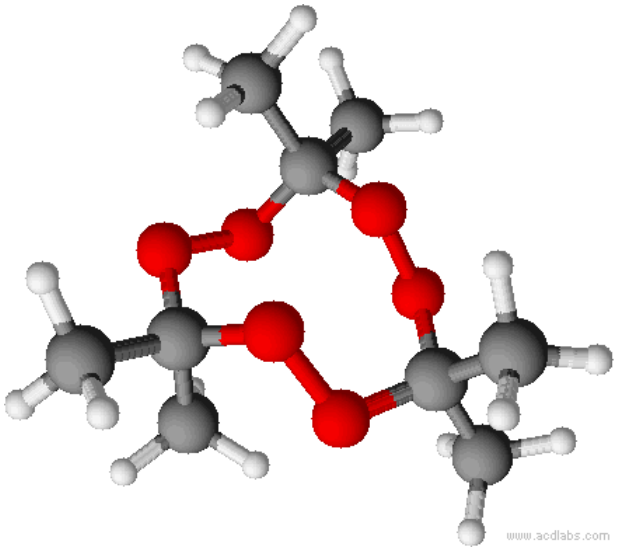


Abbildung 30: Molekülstruktur Triacetontriperoxid

5.1.5.3 Aufbau eines automatisierten Sensorprüfstands

Im Projekt wurde ein Aufbau eines Sensorprüfstandes eine Gasmischanlage (Hardware sowie Software) zur Sensorevaluierung von Halbleitergassensoren realisiert. Diese ist in der Lage unterschiedliche Gase in verschiedenen Konzentrationen bei variabler Luftfeuchtigkeit zu mischen und gleichzeitig die Signale von bis zu 16 Sensoren aufzunehmen. Weiter wird direkt vor der Messkammer und in der Messkammer zusätzlich Temperatur und Luftfeuchte gemessen. Eine automatisierte Steuerung erlaubt es, bis zu vier Gase in unterschiedlichen Konzentrationen zu mischen und diese als Testgemisch den Sensoren unter definierter Luftfeuchte anzubieten.

Die Software erlaubt es darüber hinaus, Langzeitmessungen durchzuführen, in denen durch eine automatisierte Steuerung die Konzentration der Testgase, die Luftfeuchtigkeit, sowie die Heizspannung der einzelnen Sensoren variiert werden kann.

Der schematische Aufbau der Anlage ist in Abbildung 31 dargestellt.

Für die Durchführung von Referenzmessungen ist es möglich, den Gasstrom vor der Sensormesskammer zu entkoppeln und einem FTIR- Spektrometer sowie einem Adsorbens (TENAX) zuzuführen.

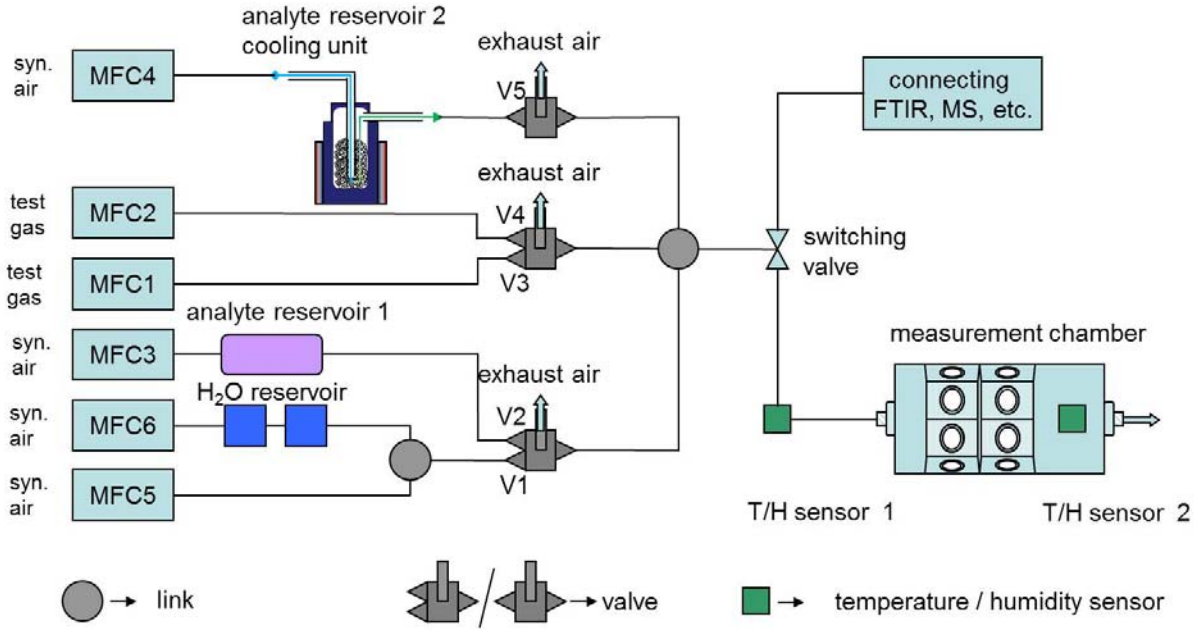


Abbildung 31: Schematischer Aufbau der Gasmischanlage

In einem Erweiterungsschritt wurde ein temperiertes Analytdepot (Abbildung 32) realisiert, welches die Aufgabe von Flüssigkeiten und Feststoffen erleichtert und durch Abkühlung der Probe das Einstellen geringer Gaskonzentrationen erlaubt. Das System besteht aus einer austauschbaren Glaskammer, welche mit Analyt befüllt werden kann. Durch die Probe wird ein Gasstrom geleitet der sich mit Analyt sättigen kann. Das gesamte System ist in einem Aluminiumgehäuse untergebracht welches über zwei Peltierelemente auf die gewünschte Temperatur gekühlt werden kann.

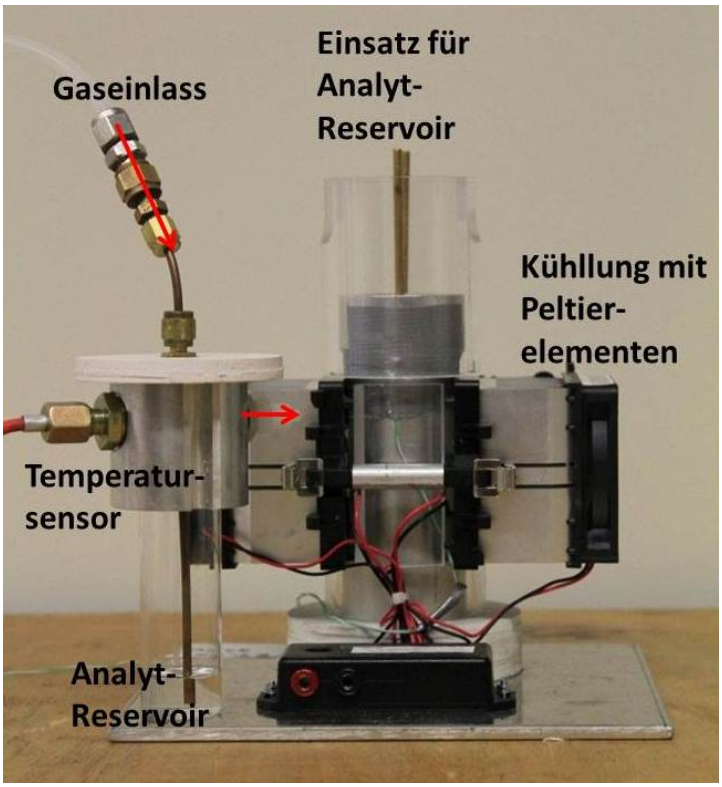


Abbildung 32: Temperiertes Gas durchströmtes Analytdepot mit Peltierkühlung.

5.1.5.4 Entwicklung einer modularen Elektronik zum Betrieb von Halbleitergassensoren

Um den temperaturzyklischen Betrieb von Halbleitergassensoren zu ermöglichen, wurde eine Steuer- und Auswerteelektronik benötigt (Abbildung 33). Das System kann modular durch weitere Schaltungskomponenten, z.B. Temperatur/Luftfeuchte-Sensor, erweitert werden und der Betrieb über einen PC sowie auch als stand-alone Device ist möglich. Im PC-Betrieb dient die USB-Schnittstelle zu Programmierung der gewünschten Funktionen sowie zur Übertragung von Parametern für Heizleistungen und Auslesetechniken. Die benötigte Energie zum Betrieb kann ebenfalls über die Schnittstelle bereitgestellt werden. Der Mikrocontroller übernimmt die zeitliche Steuerung der Temperaturzyklen und sendet nach Abschluss jedes Einzelzyklus die gewonnenen Daten an den PC zur weiteren Datenauswertung.

Für den stand-alone Betrieb besitzt der Mikrokontroller ausreichenden Speicher um Messprogramme dauerhaft zu Speichern und Daten eines Messzyklus zwischen zu speichern bevor diese auf eine Mikro-SD-Karte übertragen werden.

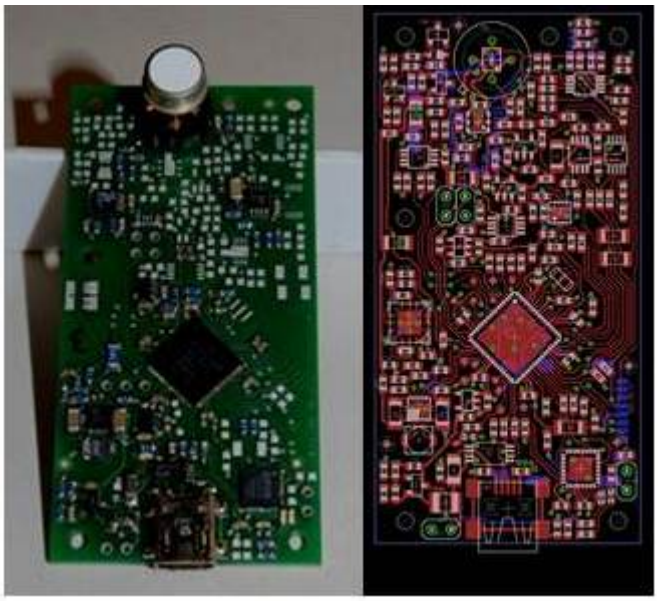


Abbildung 33: Elektronik für temperaturzyklischen Betrieb von Halbleitergassensoren (links Bild einer bestückten Platine, rechts Platinen Layout)

Die beiden wichtigsten Teile der Schaltung sind zum einen die Ansteuerung der Leistungselektronik zum Betrieb der Sensorheizung und zum anderen die Messung des Widerstandes der sensitiven Schicht. Die einfachste Variante zur Steuerung der Heizung ist über die Anpassung einer PWM (Puls-Weiten-Modulation), die die Leistungszufuhr in die Heizschicht des Sensors regelt. Nachteil dieser Methode ist der Pulsbetrieb, der sich auf andere Schaltungsbestandteile übertragen kann und somit zu einem erhöhten Rauschen führen kann. Vorteil dieser Betriebsart gegenüber den beiden nachfolgenden ist der geringere Energieaufwand. Eine zweite Möglichkeit ist der Betrieb über einen Spannungsregler. Hierbei wirkt sich nachteilig aus, dass entsprechende Bauteile die Eingangsspannung nur bis auf ca. 1 V herunter regeln können und damit, abhängig von dem Aufbau der Heizstruktur des Sensors, niedrige Temperaturen schwer realisierbar sind. Als dritte Variante wurde ein Power OpAmp angedacht mit dem es möglich ist, auch geringe Heizspannungen und damit Temperaturen zu realisieren. Wie bereits oben beschreiben wird die überschüssige Energie, die bei der Abwärtsregelung der Spannung frei wird, als Wärme über das Bauteil abgegeben, was einen deutlich erhöhten Energieverbrauch bedeutet. Es werden zusätzlich Spannung und Strom für die Heizerstruktur des Sensors gemessen, um den Leistungseintrag zu kontrollieren und ggf. dessen Temperatur über den Widerstand zu bestimmen.

Zur Messung des Widerstandes der sensitiven Schicht steht ein Spannungsteiler mit elektronisch verstellbarem Referenzwiderstand zu Verfügung, was die Messung über

einen weiten Messbereich erlaubt. Weiter ist eine Messung mit konstanter Spannung möglich, eine Methode die für das Vermessen von MOx-Sensoren weit verbreitet ist [Becher2010]. Als weitere Methoden stehen eine gepulste Messung sowie eine Möglichkeit der Umpolung der Messspannung zu Verfügung. Die beiden letzteren Varianten wurden zwar vorgesehen und implementiert, fanden aber innerhalb des Projektes keine Anwendung. Sie können aber bei einer weiteren zukünftigen Verwendung des Sensorbords von Relevanz sein. In Abbildung 34 ist ein Blockschaltbild der Elektronik gezeigt, in der die wichtigsten Komponenten aufgeführt sind.

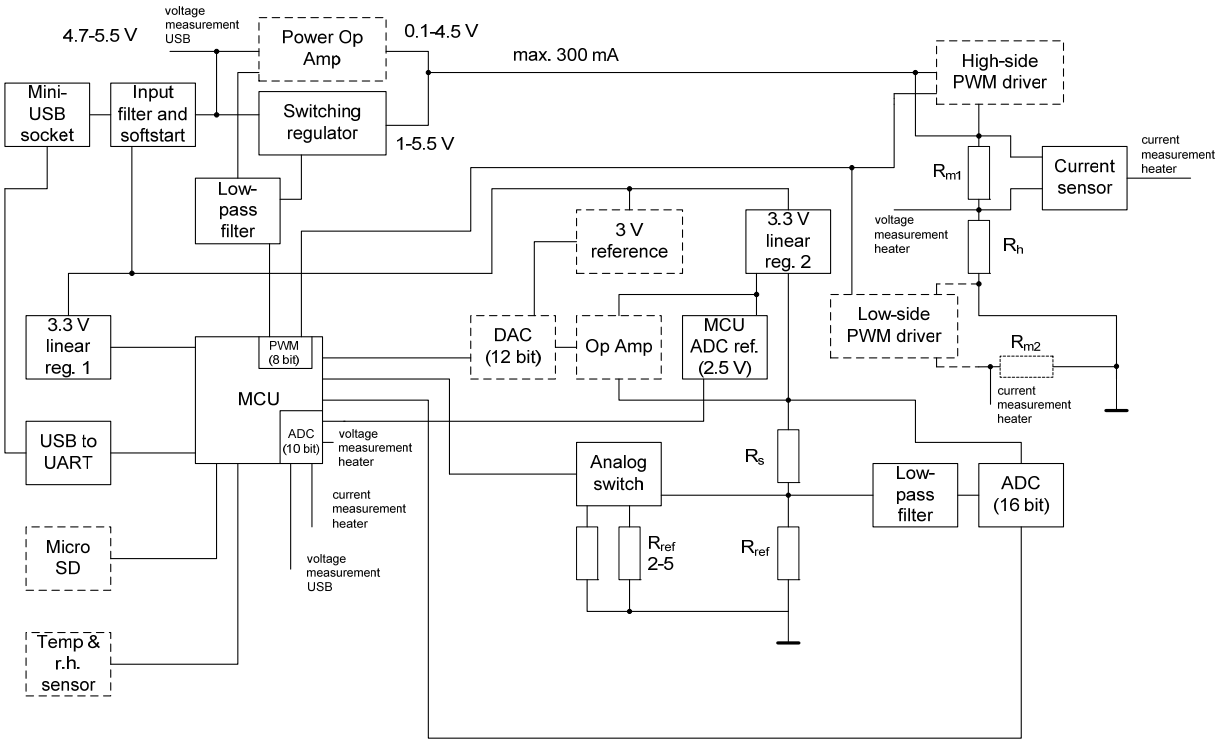


Abbildung 34: Blockschaltbild der modularen Sensorelektronik für die Sensorik für TATP und Explosivstoff-Präkursorsubstanzen.

5.1.5.5 Evaluation von geeigneten kommerziell erhältlichen Sensoren für den Gasphasennachweis von TATP

Für die Evaluation geeigneter kommerzieller Halbleitergassensoren wurde auf Erfahrungen aus vergangenen Projekten zurückgegriffen [Becher2010]. Auf Basis dieser Erfahrungen wurden Sensoren der Firmen UST GmbH (UST) sowie Applied Sensors (AS) und Figaro eingesetzt. Die Sensoren der einzelnen Firmen zeichnen sich jeweils durch unterschiedliche Vorzüge aus. Sensoren von AS sind durch Miniaturisierung und spezielles Chipdesign auf geringsten Energieverbrauch getrimmt. UST zeichnet sich durch eine große Vielfalt an erhältlichen Sensoren aus, die so modifiziert sind, dass die Selektivität auf eine Vielzahl spezielle Gasspezies gesteigert wurde. Figaro,

als einer der ersten Hersteller derartiger Sensoren, blickt auf eine jahrzehntelange Erfahrung zurück. Dies schlägt sich vor allem in Stabilität und Empfindlichkeit der Sensoren nieder.

Ziel war es zu evaluieren, welche dieser Sensoren für den Einsatz in einer Detektionseinheit in Frage kommt und wie eine mögliche Kombination aussehen könnte, um eine sichere Detektion von Selbstlaboraten und deren Präkursorsubstanzen zu garantieren.

Die Selektivität des Halbleitergassensors wird in hohem Maße von der Temperatur der sensitiven Schicht bestimmt, weshalb eine genauere Analyse des Einflusses der Temperatur auf die Sensorreaktion für unterschiedliche Analyten (Tabelle 5) durchgeführt wurde. Die ausgewählten Analyten repräsentieren den gesuchten Sprengstoff TATP, den niederen Homologen Diacetondiperoxid DADP sowie eine Vergleichssubstanz aus der Klasse der organischen Peroxide Di-tert-butylperoxid (DTBP), sowie als Vertreter der Präkursorsubstanzen Aceton.

Tabelle 5: Untersuchte Analyten und untersuchte Konzentrationen für den Nachweis der Substanzen mit Halbleitergassensoren

Analyt	**Konzentration [ppm]**
Diacetondiperoxid (DADP)	1
Di-tert-butylperoxid (DTBP)	ca. 20
Triacetontriperoxid (TATP)	1
Aceton	1

Aus dem Bestand an kommerziell erhältlichen Sensoren wurden die Sensoren, die in Tabelle 6 gelistet sind, näher untersucht. Dabei stand im Vordergrund, die unterschiedlichen Sensoren auf ihrer Reaktion gegenüber TATP zu bewerten. In einem zweiten Schritt wurden ausgewählte Sensoren auch auf Ihre Querempfindlichkeit gegenüber DADP und DTBP als weitere Vertreter organischer Peroxide sowie auf Aceton als Präkursor untersucht. Die Sensoren der Firma UST Umweltsensortechnik GmbH sind in verschiedene Chipgrößen erhältlich wobei in Vorversuchen gezeigt wurde, dass für die gegebenen Aufgabenstellung Sensoren der kleinsten Chipgröße ausreichend sind. Diese zeigen bei gleichzeitig geringstem Energieverbrauch aufgrund der gegenüber anderen Baureihen geringsten thermischer Masse fast identische Leistungsmerkmale. Für den temperaturzyklischen Betrieb der Sensoren ist eine geringe thermische Masse ein wichtiger Vorteil, da der Sensor seine Endtempe-

raturen schneller und mit geringerer elektrischer Leistung erreichen kann.

Nachfolgend wird daher nur auf die Ergebnisse der Sensoren mit geringster Chipgröße (1,5 x1,5 mm^2) eingegangen. Für die Auswertung wird das Sensorsignal normiert um eine bessere Vergleichbarkeit aller Nachfolgender Ergebnisse zu erhalten. Zur Normierung wird die folgende Formel (4) verwendet:

$$\mathbf{S} = \frac{\mathbf{R_0}}{(\mathbf{R_0} - \mathbf{R_{min/max}})} \quad (4)$$

S ist dabei der normierte Sensorwert, R_0 der Sensorwert in synthetischer Luft vor jeder Einzelmessung und $R_{min/max}$ der jeweilige stationäre Sensorwert bei Exposition des Zielgases. R_0 und $R_{min/max}$ werden dabei über einen Zeitraum von mindestens 30s gemittelt um den Einfluss des Sensorrauschens zu minimieren.

Tabelle 6: Untersuchte Sensoren mit Herstellerangaben zur Betriebstemperatur und Anwendungsfall

Sensortyp	**Heizspannung [V]**	**Temperatur [°C]**	**Zielgas**
UST Umweltsensortechnik GmbH			
GGS 1533	3,6	450	Breitband Sensor
GGS 2533	3,2	400	CO-, H_2- und C_2H_5OH-Empfindlichkeit, geringe CH_4-Empfindlichkeit
GGS 3533	3,4	420	Kohlenwasserstoffe UEG- Überwachung
GGS 4533	3,8	470	NH3-Detektion, geringe CH4-, CO- und H2-Querempfindlichkeit
GGS 5433	2,3	275	Ozon + NO_2
GGS 7333	1,8	200	NO_2
Applied Sensors			
AS-MLK	2,7	320	Methan
AS-MLC	2,3	270	CO
AS-MLN	2,3	270	CH_4
AS-MLV	2,7	320	VOC
Figaro			
Fig 02	5	k.a.	VOC

5.1.5.6 Entwicklung eines Verfahrens zum selektiven Nachweis von Organischen Peroxiden

Um den im vorrangegangenen Kapitel vorgeschlagenen Sensornachweis zur Selektivitätssteigerung zu erbringen, wurde nach einem geeigneten Sensor gesucht der das gewünschte reduzierende und oxidierende (RedOx)- Verhalten für die Detektion von organischen Peroxiden zeigt.

Hierzu wurde in einem ersten Schritt das Verhalten der Sensoren bei unterschiedlichen Temperaturen (100- 400 °C) auf die Reaktion gegenüber TATP (1ppm), DADP (1ppm), DTBP (20ppm) sowie Aceton (1ppm) untersucht. Die abweichend erhöhte Konzentration bei Versuchen mit DTBP ist dem im Vergleich extrem hohen Dampfdruck der Substanz geschuldet, so dass trotz Kühlung und Verdünnung mittel GMA eine minimale Konzentration von 20ppm erreicht werden konnte. Aceton hat zwar einen noch höheren Dampfdruck, stand aber als verdünntes Testgas zur Verfügung.

Das nachfolgende Diagramm in Abbildung 35 zeigt exemplarisch vergleichend die Ergebnisse zweier Sensoren bei Beaufschlagung mit TATP bei verschiedenen Temperaturen. Beide unterscheiden sich im Material der sensitiven Schicht: Der Sensor GSS 5533 basiert auf Wolframtrioxid (WO_3)während der Sensor GGS 1533 auf Basis von Zinndioxid (SnO_2) realisiert wurde. Auf jeder Temperaturstufe wurde der Sensor jeweils drei Mal mit TATP beaufschlagt. Zur Erholung der Sensoren wurde daraufhin das System jeweils mit synthetischer Luft (50% rel. Luftfeuchte) gespült.

Wie aus Abbildung 35 zu erkennen ist, reagiert der Sensor GGS 5533 auf die gewünschte Weise. Im unteren Temperaturbereich bis 150 °C zeigt der Sensor eine Widerstandserhöhung und reagiert damit auf die oxidierenden Anteile innerhalb des Moleküls. Zu höheren Temperaturen dominierten die reduzierenden Anteile des Moleküls und es ist ein Widerstandsabfall zu beobachten. Im Gegensatz dazu zeigt der Zinnoxid basierende Sensor über den gesamten Temperaturbereich nur das reduzierende Verhalten des Moleküls.

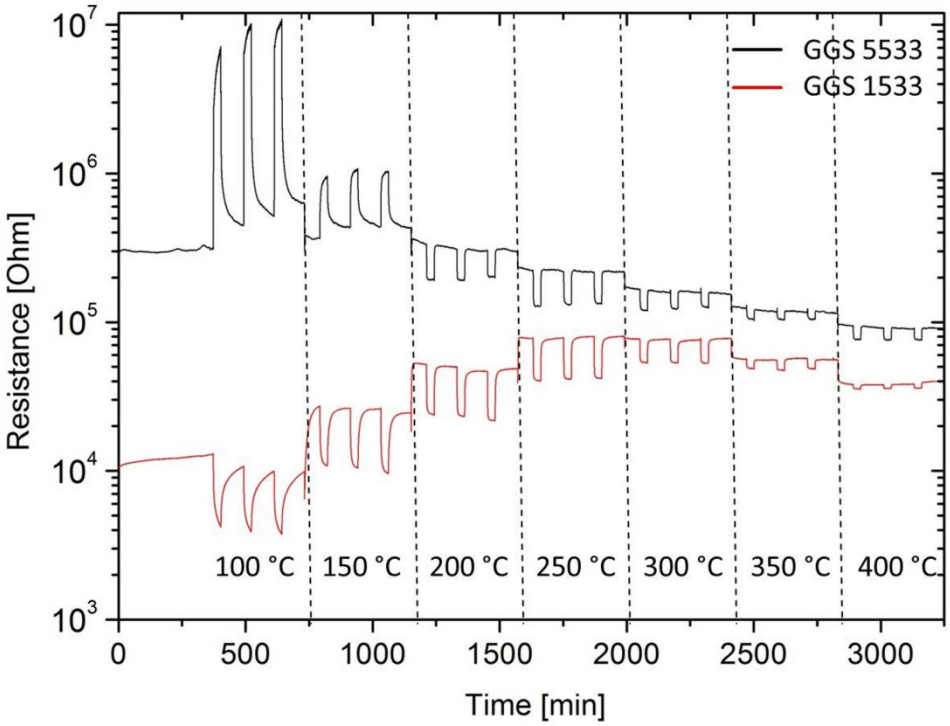


Abbildung 35: Reaktion von 1ppm TATP auf die Sensoren GGS 1533 (SnO_2) sowie GGS 5533 (WO_3) bei verschiedenen Sensortemperaturen.

Eine Zusammenfassung der Reaktion ausgewählter Sensoren auf die Testsubstanzen ist in den nachfolgenden Diagrammen (Abbildung 36 bis Abbildung 41) zu finden. Dargestellt ist jeweils das normierte Sensorsignal S gegen die Temperatur.

Es konnte anhand der Auswertung gezeigt werden, dass das gewünschte duale reduzierende und oxidierende Verhalten einzig beim WO_3- basierten Sensor GGS 5533 auftritt. Da die meisten kommerziell erhältlichen Sensoren auf Basis von SnO_2 aufgebaut sind konnte das gewünschte Verhalten lediglich bei einem weiteren Sensor der Firma Applied Sensor (AS MLN) nachgewiesen werden. Auf Grund einer allgemein besseren Performance hinsichtlich Empfindlichkeit und Stabilität wurde für alle weiteren Ursuchungen der Sensor GGS 5533 genutzt.

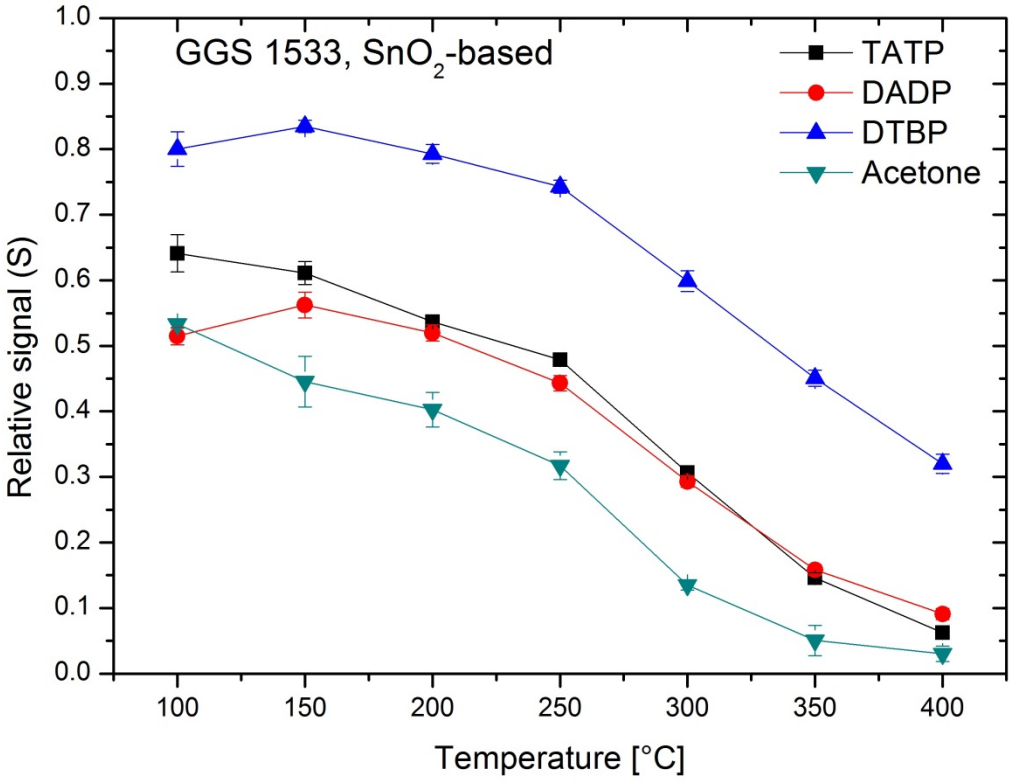


Abbildung 36: Sensorreaktion des Sensors GGS 1533 auf TATP, DADP, DTBP und Aceton.

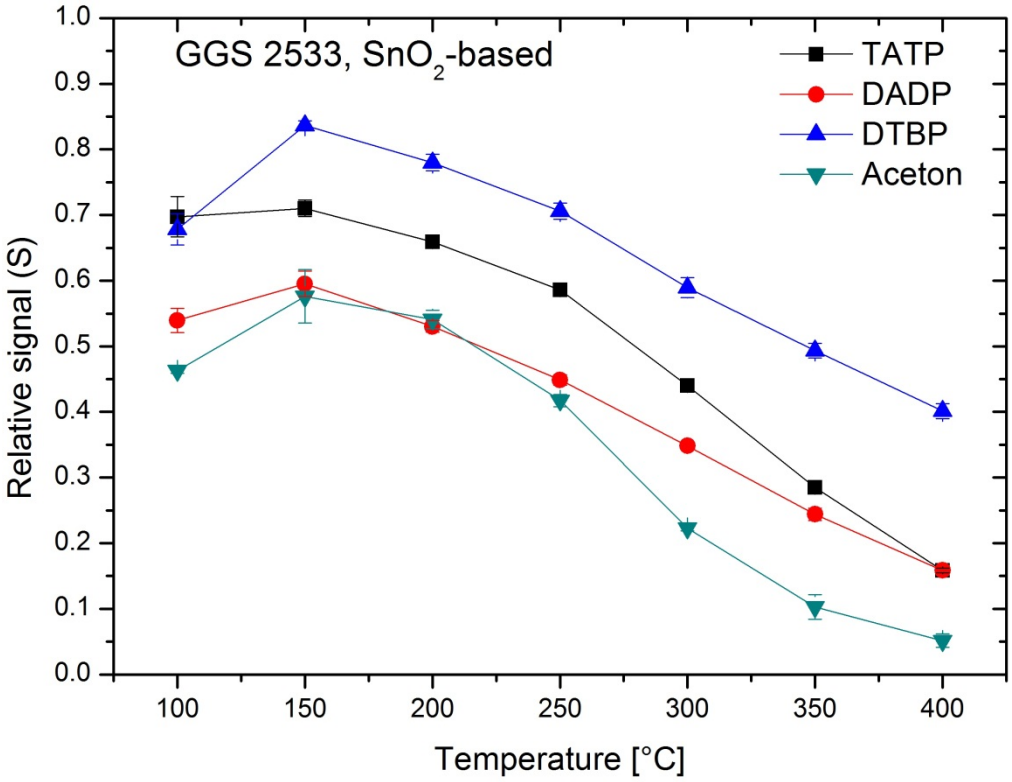


Abbildung 37: Sensorreaktion des Sensors GGS 2533 auf TATP, DADP, DTBP und Aceton.

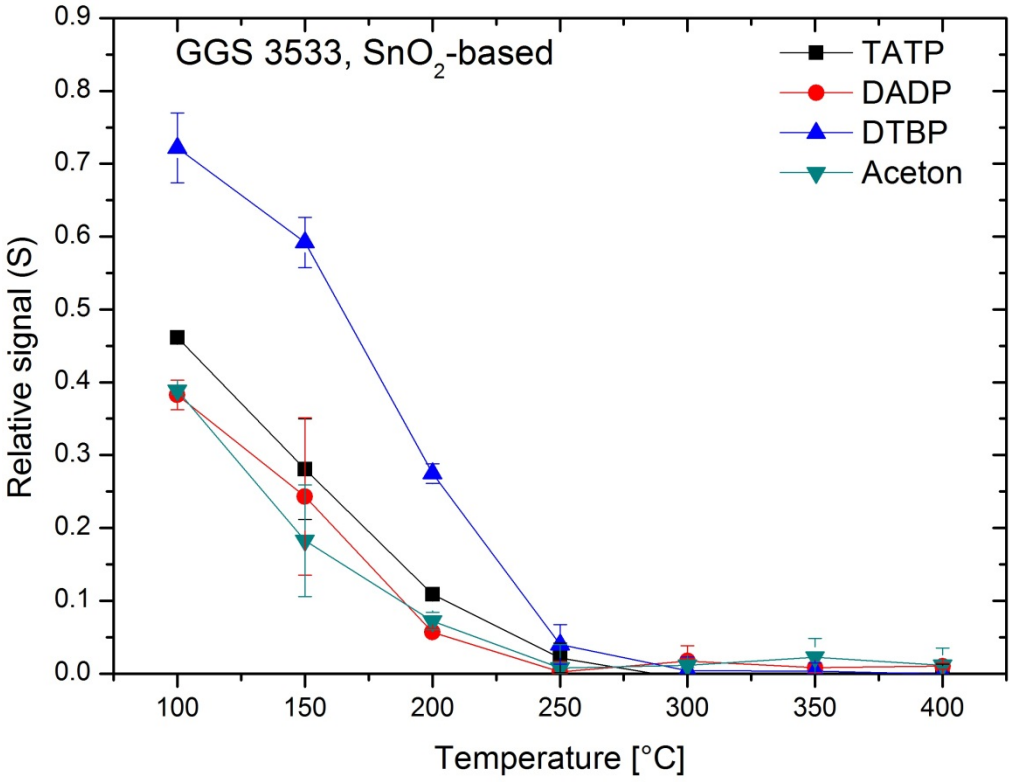


Abbildung 38: Sensorreaktion des Sensors GGS 3533 auf TATP, DADP, DTBP und Aceton.

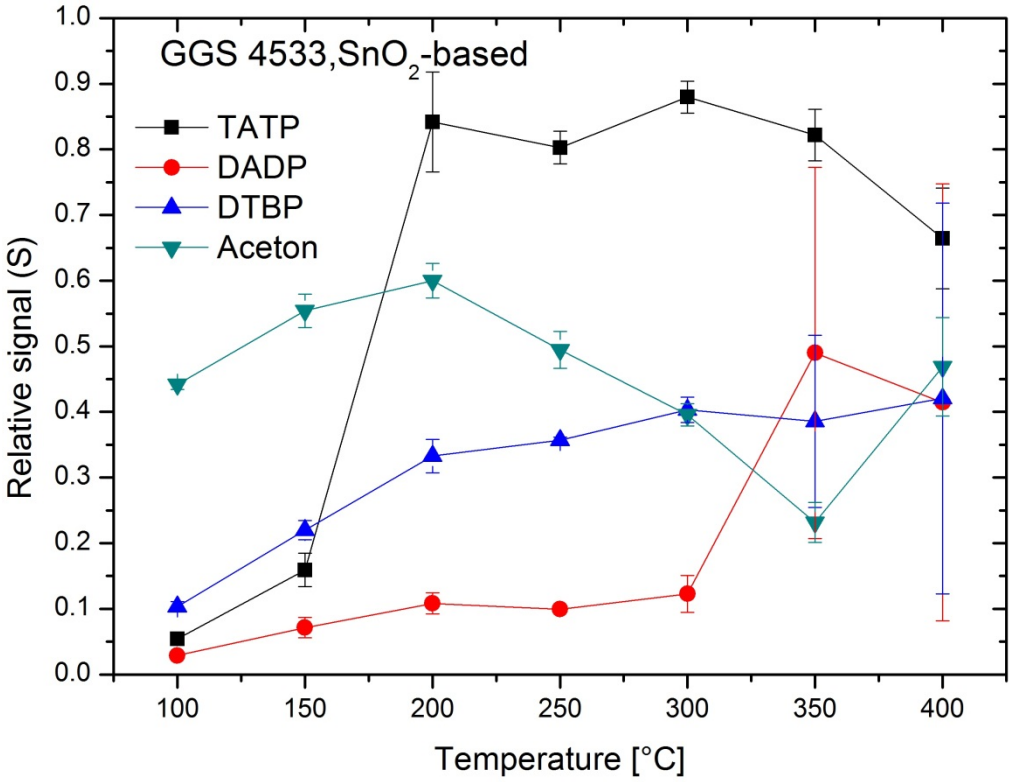


Abbildung 39: Sensorreaktion des Sensors GGS 4533 auf TATP, DADP, DTBP und Aceton.

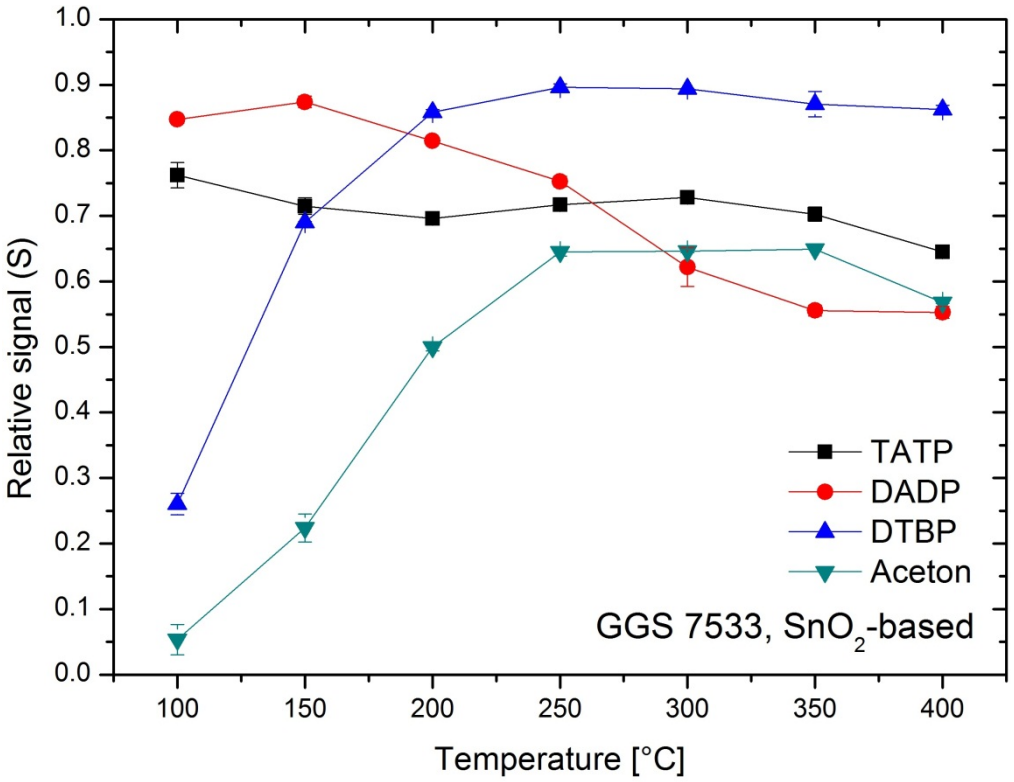


Abbildung 40: Sensorreaktion des Sensors GGS 7533 auf TATP, DADP, DTBP und Aceton.

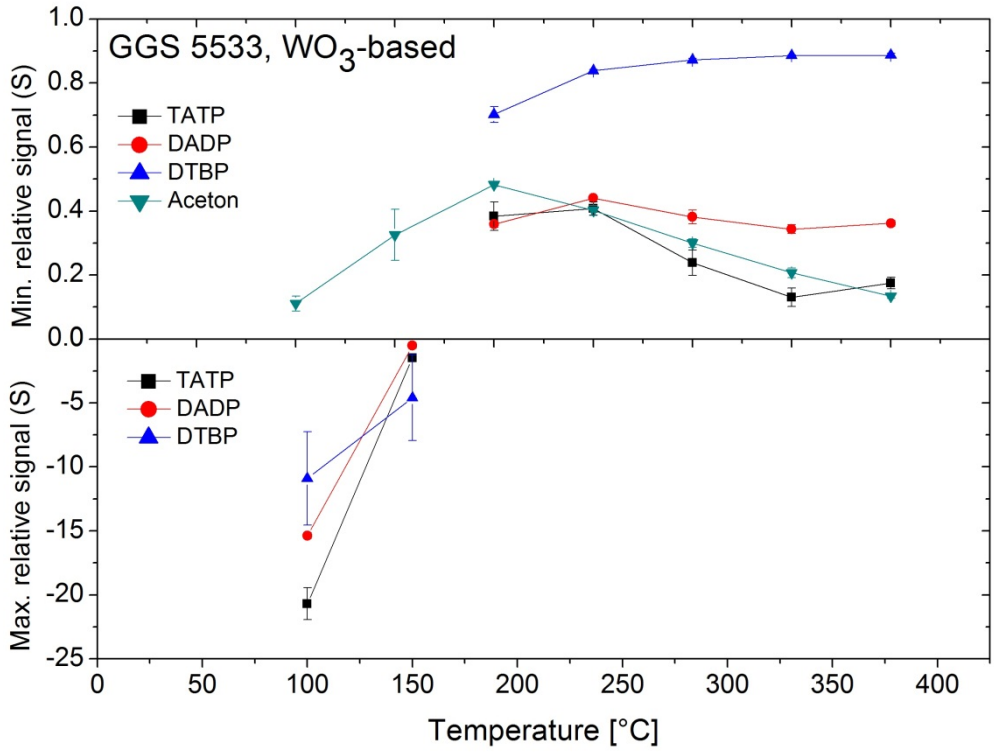


Abbildung 41: Sensorreaktion des Sensors GGS 5533 auf TATP, DADP, DTBP und Aceton. Die oxidierende Reaktion ist jeweils im unteren und die reduzierende im oberen Teil der Grafik dargestellt.

5.1.5.7 Einfluss der Luftfeuchtigkeit

Beim Einsatz der Sensorik zur Raumluftüberwachung spielt der Parameter der Luftfeuchtigkeit eine entscheidende Rolle, da dieser durch Nutzung von Sanitäranlagen (z.B. Dusche) oder wechselnde Wetterbedingungen im erheblichen Maß schwanken kann. Zur Untersuchung dieses Parameters wurden die Sensoren bei 25, 50 und ca. 99 % rel. Luftfeuchtigkeit jeweils ca. 1 ppm TATP ausgesetzt. Die Temperatur der sensitiven Schicht Lag bei ca. 150 °C. Exemplarisch sind in Abbildung 42 die Ergebnisse dieser Untersuchung für die Sensoren GGS 1533 und GGS 5533 aufgeführt. Während der SnO_2 basierte- Sensor GGS 1533 leicht an Signalintensität einbüßt steigt diese für den WO_3 basierte- Sensors zu höheren Luftfeuchten stetig an. Für den Einsatz an Bord mit höheren Luftfeuchten zu rechnen ist wirkt dieser Parameter also nicht störend.

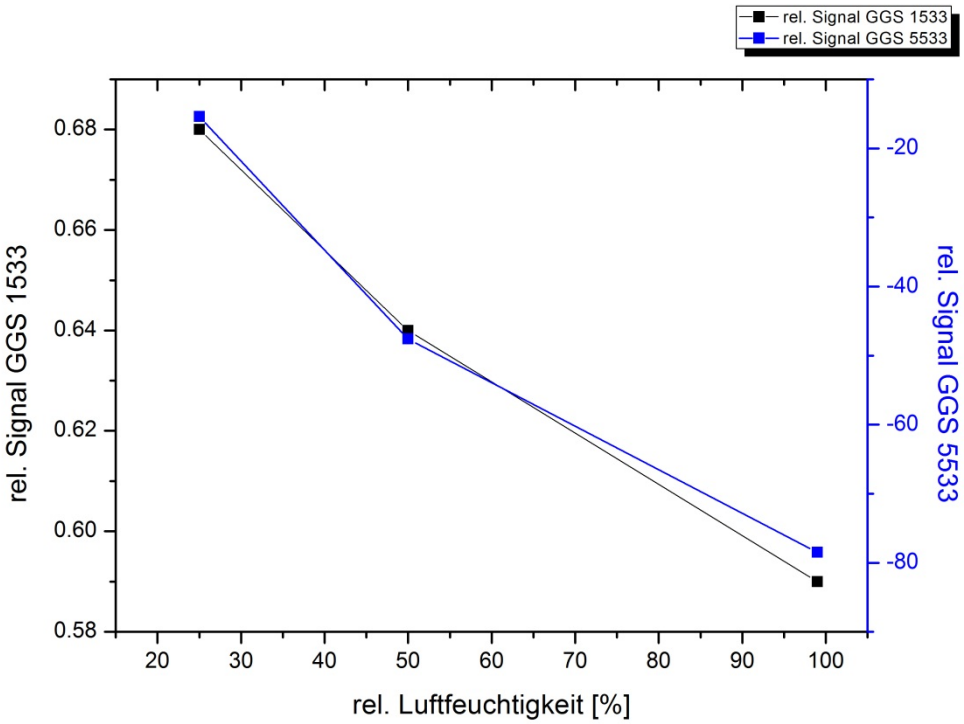


Abbildung 42: relatives Signal der Sensoren GGS 1533 und GGS 5533 bei unterschiedlicher Luftfeuchtigkeit

5.1.5.8 Nachweisempfindlichkeit der Verwendeten Sensoren

Alle verwendeten Halbleitergassensoren erlauben einen Nachweis von TATP bis in den sub-ppm-Bereich. Abbildung 31 und Abbildung 32 zeigen beispielhaft Kalibrierungen für den Sensor GGS 1533 und GGS 5533.

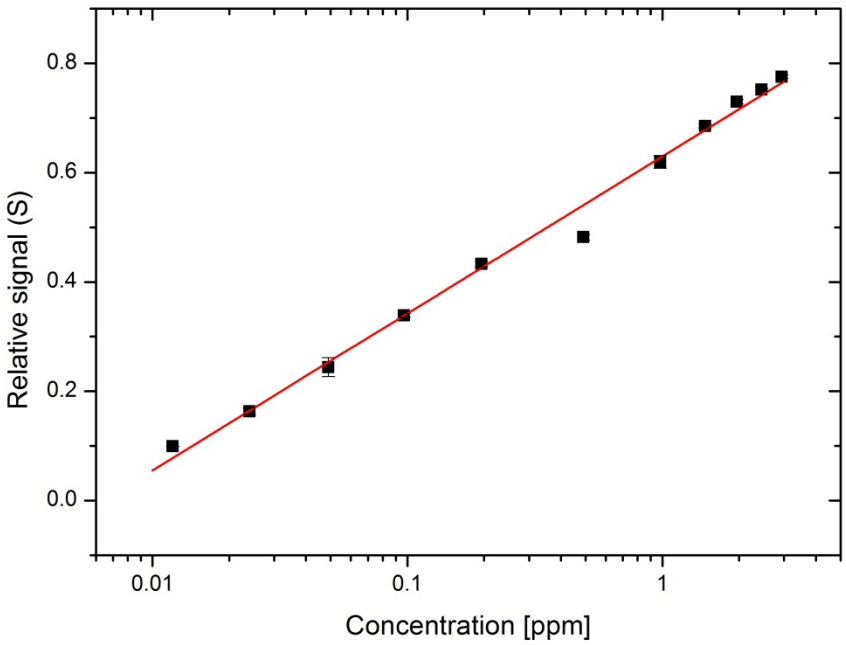


Abbildung 43: Sensorantwort des Sensors GGS 1533 bei 100 °C gegen Konzentration im Bereich 12ppb bis 3ppm

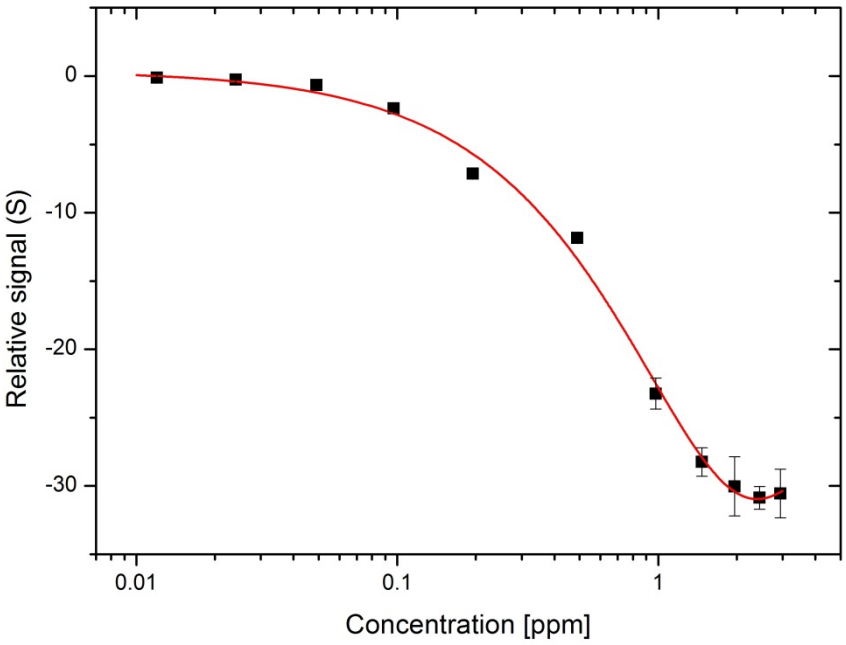


Abbildung 44: Sensorantwort des Sensors GGS 5533 bei 100 °C gegen Konzentration im Bereich 12ppb bis 3ppm

Eine tatsächliche Nachweisgrenze der Sensoren zu bestimmen ist aufgrund der aufgenommenen Kennlinien schwierig, da die Sensoren kein einheitliches Verhalten zeigen. Daher wurde darauf verzichtet, aus den angefitteten Kurven Nachweisgrenzen anzugeben. Aus den gewonnen Daten lässt sich allerdings ein Nachweis bis in den einstelligen ppb- Bereich ableiten, was eine Detektion von TATP bis zu einer Verdünnung um den Faktor 10.000 ermöglicht (Der Dampfdruck von TATP bei 25 °C

6,39 Pa, dies entspricht einer Konzentration von ca. 63 ppm).

5.1.5.9 Temperaturzyklische Detektion von TATP

Zur Realisierung eines einfachen und kostengünstigen Sensorsystems zum Nachweis von TATP wurde eine sensorische Lösung angedacht, bei der mittels des Halbleitergassensors GGS 5533 im temperaturzyklischen Betrieb der Nachweis von TATP in der Gasphase erbracht werden kann.

Aus den Experimenten zur Reaktion der Sensoren auf TATP bei unterschiedlichen Temperaturen wurde in zwei Schritten ein Temperaturzyklus entwickelt mit dem es möglich ist, das charakteristische reduzierende und oxidierende Verhalten für den Nachweis von TATP sowie gleichzeitig auch die Anwesenheit typischer Lösemitteldämpfe zu detektieren. Hierzu wurde im ersten Schritt der Sensor auf zwei Temperaturen alternierend zwischen 100 °C und 300 °C betrieben und die einzelnen Temperaturstufen jeweils fünf Minuten gehalten. Auf der niedrigen Temperaturstufe soll der oxidierende Charakter des Moleküls nachgewiesen werden wohingegen der Sensor auf 300 °C auf reduzierende Gase reagieren soll. Ausgehend von der Sensorreaktion in synthetischer Luft wurde dem Sensor nacheinander erst 1 ppm TATP, 5 ppm Aceton und ein Mix aus beiden angeboten. Zum Vergleich ist in Abbildung 45 die Reaktion des Sensors GGS 1533 dargestellt. Wie zu erwarten reagiert der Sensor in synthetischer Luft bei geringen Sensortemperaturen mit einem rapiden Anstieg des Schichtwiderstandes und verhält sich damit typisch für einen Halbleiter. Bei Zugabe der Testgase ist jeweils nur das erwartete reduzierende Verhalten durch das Sinken des Widerstandes zu beobachten.

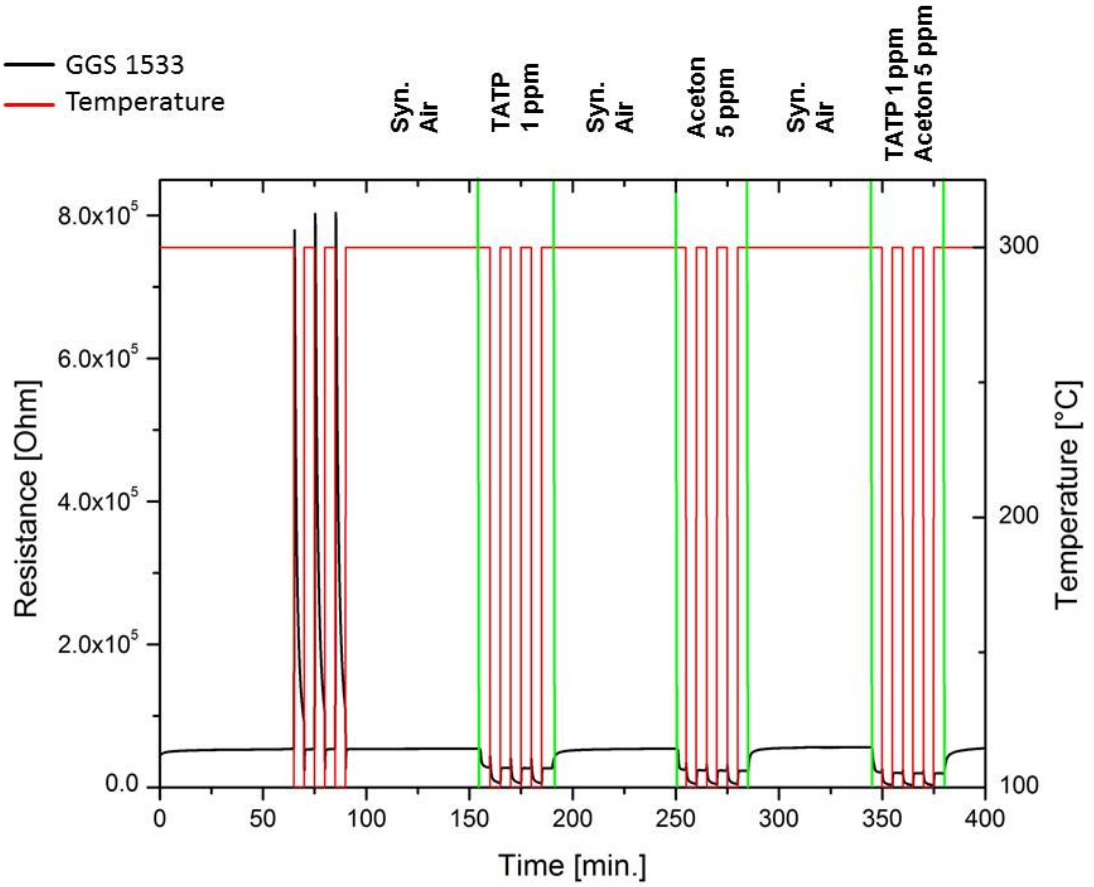


Abbildung 45: Temperaturzyklischer Betrieb des Sensors GGS 1533 (SnO_2- basiert). Dargestellt ist in Rot das Temperaturprogramm des Sensors und in Schwarz der Widerstand der sensitiven Schicht.

In Abbildung 46 Ist die Reaktion des favorisierten Sensors GGS 5533 dargestellt. Wie erwartet lässt sich der duale reduzierende und oxidierende Charakter des TATPs mittels Temperaturzyklus nachweisen. Aceton reagiert auf beiden Temperaturstufen reduzierend und lässt sich damit gut von TATP unterscheiden. In der abschließenden Betrachtung des Gasgemisches zeigt sich, dass der oxidierende Charakter zwar nicht mehr so stark ausgeprägt ist wie zuvor. Allerdings reicht es auch bei Zugabe der fünffachen Menge an Aceton immer noch aus, das Vorhandensein von TATP nachzuweisen.

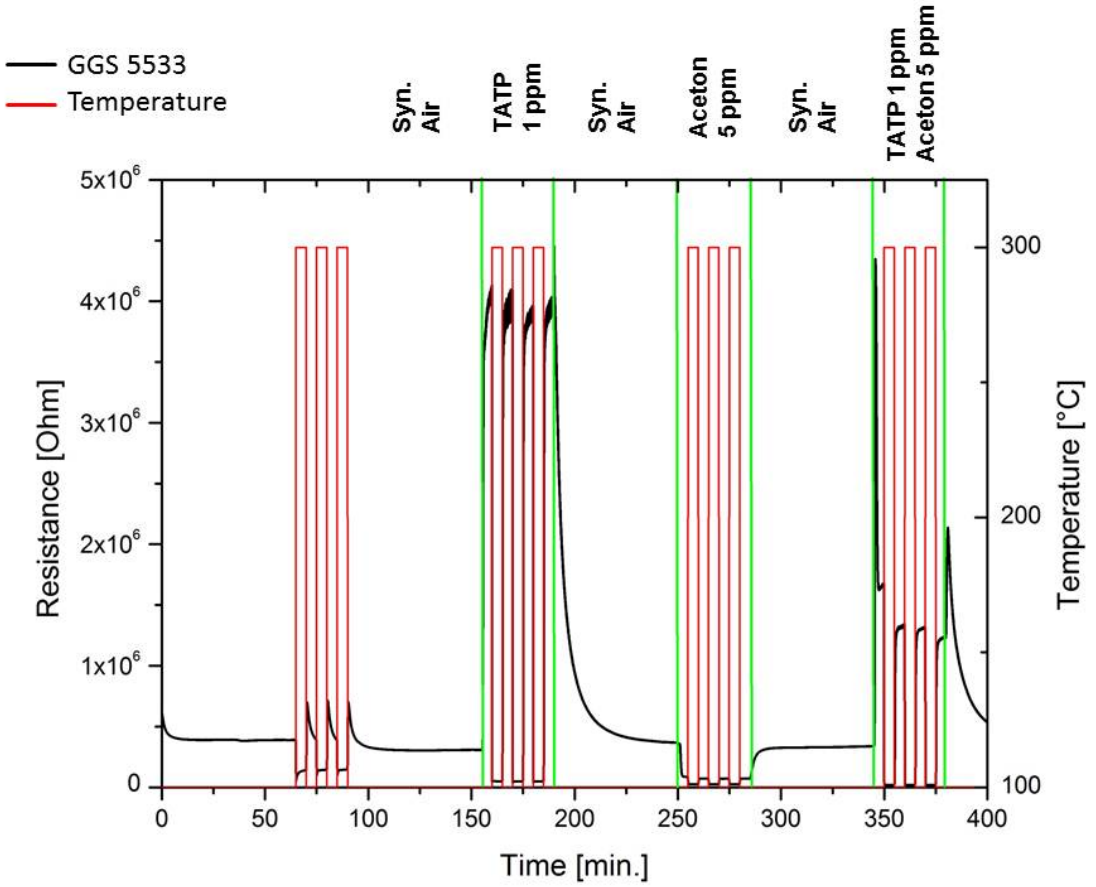


Abbildung 46: Temperaturzyklischer Betrieb des Sensors GGS 5533 (WO_3- basiert). Dargestellt ist in Rot das Temperaturprogramm des Sensors und in Schwarz der Widerstand der sensitiven Schicht.

Für den zweiten Schritt der Entwicklung des Temperaturzyklus wurde in einer iterativen Prozedur das Temperatur- Zeit Verhalten des Sensors so angepasst, dass für den gewählten Sensor bei minimaler Zykluszeit immer noch das gewünschte Sensorverhalten zur Detektion von TATP erzielt werden kann. Der beschränkende Einflussparameter ist dabei vor allem die thermische Masse des Sensors, die die Aufheizgeschwindigkeit sowie insbesondere das Abkühlen des Sensors zeitlich behindert. Der Zyklus beginnt dabei mit ausgeschaltetem Heizer. Nach 10 s wird der Heizer Sprunghaft auf 3,26 V geschaltet, was einer Sensortemperatur von ca. 390 °C entspricht. Diese Spannung wird 10 s gehalten und der Heizer danach wieder für abgeschaltet. Für die Übertragung der Daten an den Messrechner sind weitere zwei Sekunden am Ende des Temperaturzyklus integriert. Insgesamt beläuft sich damit die Zeit für einen Zyklus auf 22 s. Nachfolgende Abbildung 47 zeigt exemplarisch die Sensorreaktion während des zyklischen Betriebs des Sensors. Die Reaktion in Luft kann hierbei als Normzustand angesehen werden. Der Widerstand des Sensors steigt bis zum einschalten des Heizers (bei 10 s) kontinuierlich an und sinkt dann mit

steigender Temperatur wieder. Im Vergleich dazu liegt der Widerstand bei der Messung von Aceton dauerhaft unterhalb der Messung in Luft, was den reduzierenden Charakter des Moleküls anzeigt. Bei Tests mit TATP zeigt sich der erwartete duale Charakter des Moleküls. Zu Beginn und zum Ende des Zyklus, wenn die Temperatur des Sensors am höchsten ist dominiert die reduktive Reaktion am Sensor. Klar zu erkennen ist aber auch der oxidierende Charakter im mittleren Bereich des Zyklus in dem der Widerstand um mehrere 10er Potenzen ansteigt.

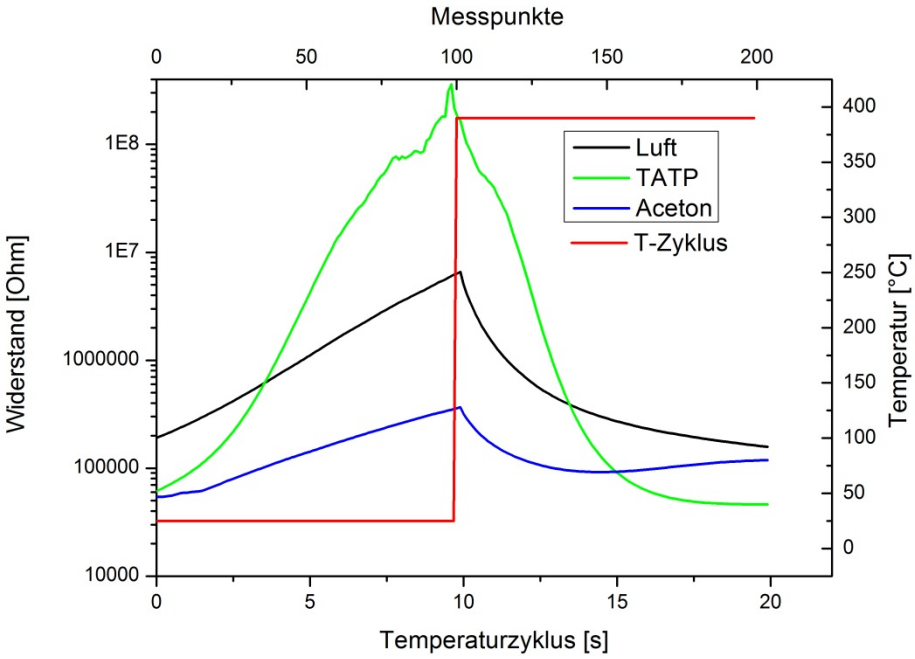


Abbildung 47: Exemplarische Sensorantwort auf den Temperaturzyklus mit Sensor GGS 5533 auf Luft, Aceton und TATP

5.1.5.10 Simulation eines geschlossenen Raums

Um die Sensorik unter simulierten Bedingungen eines geschlossenen Raumes zu testen, wurde eine geschlossene Versuchsbox aufgebaut in der es möglich ist, die Synthese von TATP durchzuführen und mit kontrollierter Lüftung zu beobachten. Hierzu wurde eine 95x80x135 cm (~1 m³) große Kammer (siehe Abbildung 48) aufgebaut. Im Gegensatz z.B. zu einer Kabine an Bord (200x200x110 cm) besitzt diese nur ca. ein Viertel des Volumens allerdings konnte auch im Labor die Synthese von TATP aus Sicherheitsgründen nur mit sehr geringen Mengen durchgeführt werden, so dass durch die Verkleinerung des Raumes eine bessere Anpassung an die Realität gegeben war, bei der davon ausgegangen wird, dass ein potentieller Attentäter für einen Anschlag größere Mengen der Substanz herstellen würde.

An der Oberseite der Versuchskammer ist ein regelbares Lüftungselement verbaut

um eine vergleichbar Strömungsgeschwindigkeiten mit der Belüftung an Bord einzustellen. Direkt oberhalb des Lüfters ist die Sensorik platziert. Neben der Sensorik zum temperaturzyklischen Betrieb werden parallel Halbleitergassensoren, je zwei Sensoren GGS 5533 bei 100 °C respektive 300 °C, bei konstanter Heizertemperatur zum Vergleich betrieben. Letzter Bestandteil ist ein Ansaugstutzen, der Luft in direkter Nachbarschaft zur Sensorik über eine Pumpe einem FTIR Spektrometer zuführt, welches als Referenzanalytik dient.

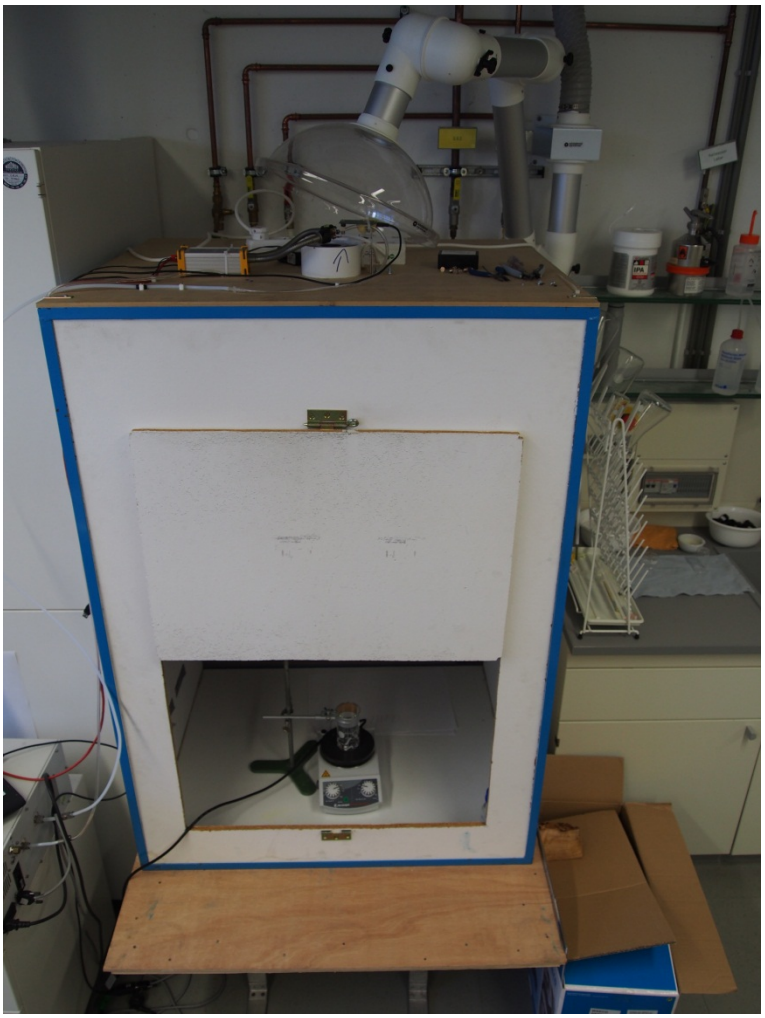


Abbildung 48: Versuchskammer zur Simulation eines geschlossenen Raums mit integrierter Lüftung und Sensorik

Für die Synthese wird der gleiche Ansatz gewählt wie bereits in Kapitel 5.1.5.1 beschrieben. Allerdings wird die Synthese in einem offenen Becherglas ohne zusätzliche Hilfsmittel durchgeführt, um die Herstellung an Bord besser nachzustellen, bei der sicherlich auch offene Gefäße benutzt werden. Nach einer Reaktionsdauer von 60 bis 70 min wird die Synthese unterbrochen und das Produkt abfiltriert und zum Trocknen innerhalb der Kammer offen ausgelegt. Die Kammer wird während dieser Zeit nur einmal kurz geöffnet und bleibt sonst geschlossen. Nachfolgende Analysen

des Produkts mittels GC/MS zeigen, dass trotz der minimalistischen Synthesebedingungen eine hohe Reinheit an TATP erreicht werden kann. Mit einer Ausbeute von 40-45 % der theoretisch berechneten wird nur ca. 10% weniger Produkt gewonnen als bei der herkömmlichen Synthese unter besseren Laborbedingungen. Dies zeigt, dass auch ohne aufwendige Laborapparatur die Synthese des Sprengstoffs in einer relativ kurzen Zeitspanne und in größeren Mengen möglich ist.

Die Ergebnisse der Sensormessungen sind in Abbildung 49 für konstante Temperatur und in Abbildung 50 für den temperaturzyklischen Betrieb dargestellt. Für den temperaturzyklischen Betrieb wurden aus den einzelnen Zyklen je sechs Werte extrahiert und über dem zeitlichen Syntheseverlauf dargestellt. Die sechs Werte (0, 10, 50, 100, 150, 199) stehen jeweils für einzelne Messpunkte (vgl. Abbildung 47) während des Zyklus wobei 0, 10, 50 100 in der Abkühlungsphase des Sensors liegen. Ab Messpunkt 101 wird der Heizer wieder angeschaltet, so dass Messpunkt 150 innerhalb der Aufheizphase liegt und Messpunkt 199 zum Zeitpunkt der höchsten Temperatur aufgenommen wird. In beiden Graphen ist der Beginn der Synthese klar ersichtlich. Die Sensoren reagieren auf die Anwesenheit des Lösemittels mit einem drastischen Abfall des Widerstandes. Während der Synthese stellt sich nach kurzer Zeit ein Gleichgewicht in der Gasphase des Raumes ein. Die Sensorsignale schwingen sich auf einem Niveau deutlich unterhalb des Ausgangswiderstandes ein. Dieses Verhalten kann als Indiz für eine dauerhaft emittierende Quelle des Lösemittels im Syntheseansatz interpretiert werden und deckt sich mit den in Kapitel 5.1.5.1 analytisch beobachteten Ergebnissen. Während des Abfiltrierens und Trocknens des Sprengstoffes tauchen Fluktuationen in den Signalen auf, die wahrscheinlich durch Eingreifen in den Prozess beim Filtrieren und anschließenden unterschiedlichen Abdampfraten des Trockengutes herrühren. Das Ende der Trocknungsphase lässt sich mit den temperaturzyklisch betriebenen Sensoren gut feststellen und zeigt sich in einer schnellen Erholung der Sensoren und Rückkehr des Widerstandes in die Größenordnung vor dem Beginn der Synthese. Im Betriebsmodus bei gleichbleibender Temperatur dauert die Erholung deutlich länger. Die im Zyklus erreichten Maximaltemperaturen scheinen die Regeneration der Sensoren deutlich zu verbessern.

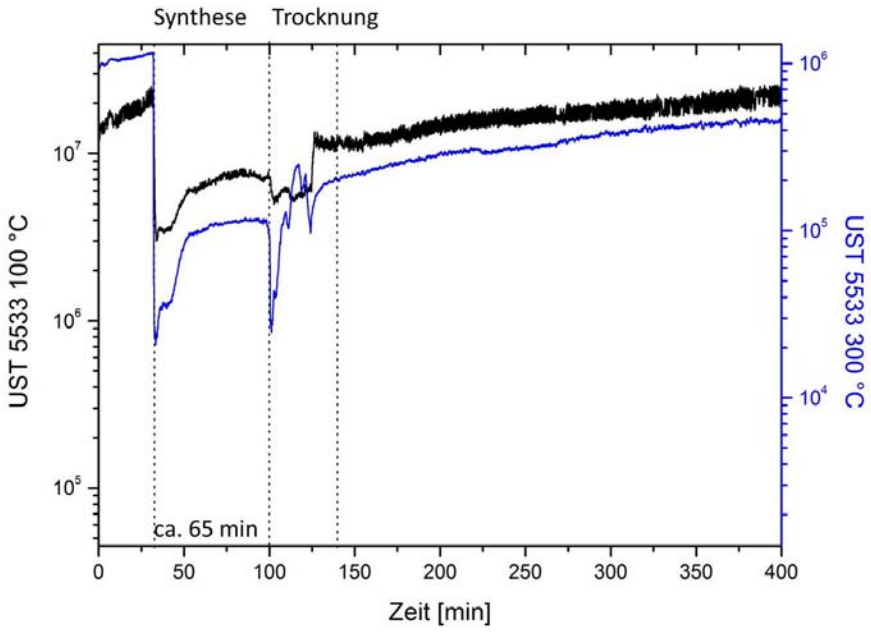


Abbildung 49: Signalverläufe der mit konstanter Temperatur betriebenen Sensoren UST5533 (100 °C, 300 °C) bei der Synthese von TATP.

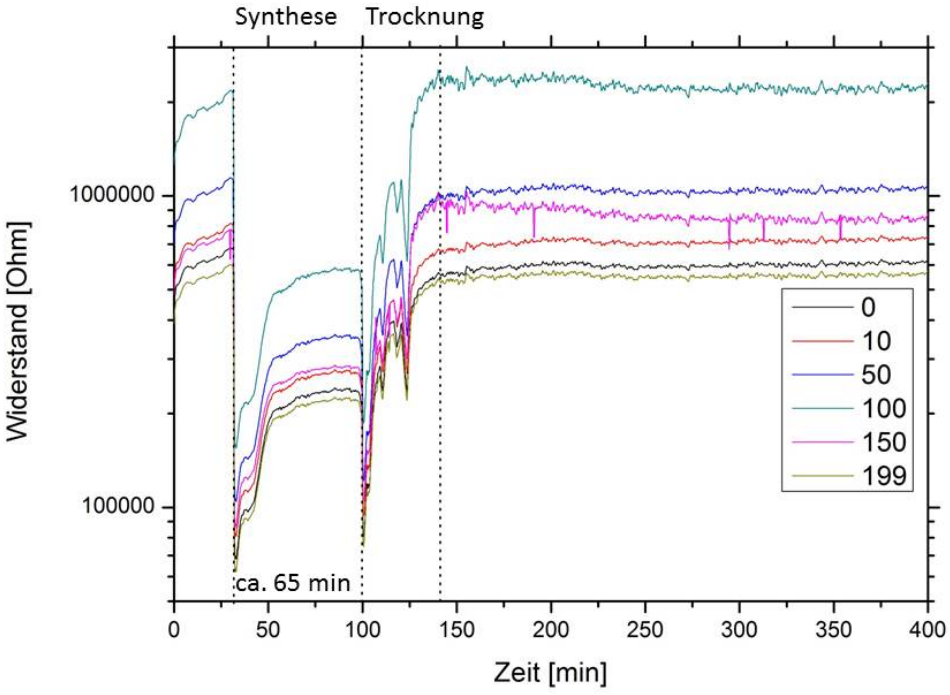


Abbildung 50: Aus dem temperaturzyklisch betriebenen Gassensor UST5533 extrahierte Signalverläufe bei der Synthese von TATP. Dargestellt sind sechs Datenpunkte (0, 10, 50, 100, 150, 199) die jeweils unterschiedliche Zeitpunkte innerhalb des Temperaturzyklus repräsentieren (vgl. Abbildung 47)

Das grundsätzliche Signalverhalten ließ sich in weiteren Versuchen bestätigen und damit die grundsätzliche Annahme, dass für die Detektion eines Syntheseansatzes

das zeitliche Verhalten der Sensoren zur Detektion kontinuierlich emittierender Analytquellen genutzt werden kann. Als zweites Merkmal sollte wie in Kapitel 5.1.5.2 beschrieben im Anschluss an die Synthese und den Trocknungsschritt mit einem Signalmuster für TATP erkannt werden. In keinem der durchgeführten Versuche konnte dieses allerdings bestätigt werden. Zurückgeführt wurde dies auf die geringen Mengen an Sprengstoff die aus Sicherheitsgründen nicht überschritten werden konnten. Um die Möglichkeit der Detektion trotzdem zeigen zu können wurde das aus den Synthesen erhaltene TATP durch das vorsichtige Mischen mit Korund phlegmatisiert und die so erhaltene Mischung großflächig auf einem Träger aufgebracht und innerhalb der Kammer näher an dem Sensorsystem positioniert um eine stärker abdampfende Quelle, entsprechend einer größeren Menge TATP, zu simulieren. Die Ergebnisse dieses Versuches sind in Abbildung 51 aufgeführt. Zu Beginn des Versuches wurde kurzzeitig ein Gefäß mit Aceton in die Kammer eingebracht, um die Funktionsweise des Sensorsystems zu testen und den Vergleich zum RedOx-Verhalten der Sensorik bei Anwesenheit von TATP zu verdeutlichen. Wie bereits in vorrangegangenen Laborversuchen gezeigt, eignet sich der Temperaturzyklus hervorragen das gewünschte Merkmal am Sensor zu erzeugen und zeigt die gleichen Charakteristika (vgl. Abbildung 47). Messpunkt 0, 10, 150 und 199 die Bereiche in denen der Sensor auf höheren Temperaturen betrieben wird zeigen einen Widerstandsabfall wohingegen es an Messpunkt 50 sowie 100 zu einer Widerstandserhöhung kommt.

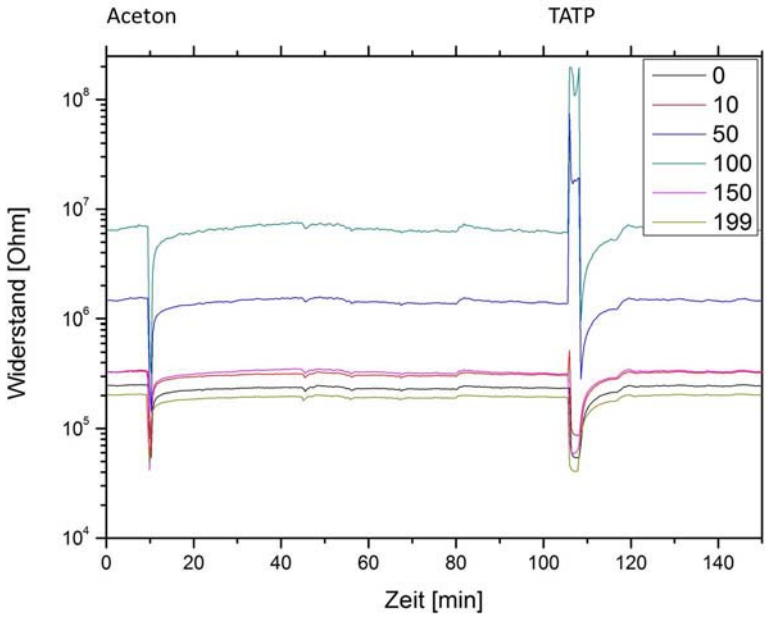


Abbildung 51: Test einer Aceton- und TATP-Quelle im Versuchstand Simulation eines geschlossenen Raumes. Dargestellt sind sechs Datenpunkte (0, 10, 50, 100, 150, 199) die je-

weils unterschiedliche Zeitpunkte innerhalb des Temperaturzyklus repräsentieren (vgl. Abbildung 47)

Die durchgeführten Experimente zeigen also, dass das grundsätzliche Prinzip der Detektion möglich ist. Bisher konnten nicht beide Merkmale in einem Experiment bewiesen werden. Allerdings ist es für eine Detektion unter realen Bedingungen notwendig, dass trotz der Verdünnung der TATP-Quelle durch Umgebungsluft und dem Auftreten von Störsubstanzen für eine Detektion eine ausreichende große Abdampfrate der TATP-Quelle vorliegen muss.

5.1.5.11 Messung unter realen Bedingungen an Bord

In einer Messkampagne an Bord über mehrere Tage wurde in drei Kabinen innerhalb der Nasszelle je ein Messsystem installiert, um den typischen Hintergrund während einer „normalen“ Nutzung aufzunehmen. Die Kabine ist ein mögliches Anwendungsbeispiel einer Luftüberwachung geschlossener Räume auf untypische Emissionen und unterliegt nicht zuletzt aufgrund der vielfältigen Aktivitätsmöglichkeiten (Essen, Trinken, Schlafen, Nutzung der sanitären Einrichtungen, der Dusche und Freisetzung von Chemikalien aus Kosmetikartikeln) häufig wechselnden Bedingungen. Die dazu aufgebauten Messboxen bestehen aus einem robusten Aluminiumgehäuse, in dem sich neben der eigentlichen Sensoreinheit auch die Energieversorgung befindet, so dass die Sensoren ohne zusätzlichen Messrechner betrieben werden können. Die Sensoreinheit bietet dafür die Möglichkeit, alle Messdaten direkt auf einer SD-Speicherkarte abzulegen. Um die Elektronik vor Spritzwasser und Kondensation zu schützen, dient ein in den Deckel eingelassener Sintermetallfilter. Bei geschlossenem Deckel wird die Box von außen über das Einsetzen bzw. Entfernen der elektrischen Sicherung gestartet und gestoppt. Über das Programm des Mikrokontrollers werden dabei alle Initialisierungs- und Speicherroutinen (vgl. Kapitel 5.1.5.4) gesteuert.

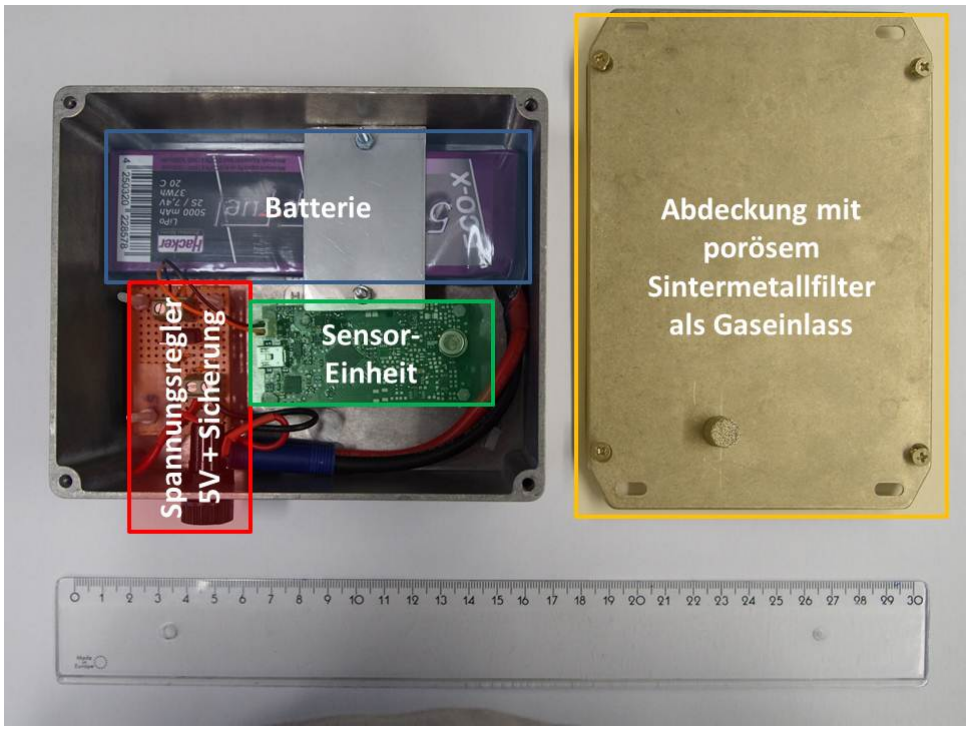


Abbildung 52: Mobile Sensoreinheit zur Kabinenluft Überwachung

Neben der Erfassung des Hintergrundes wurde an Bord eine Sprengstoffsynthese simuliert, indem eine Acetonquelle nicht wie bei der Synthese mit H_2O_2 sondern mit Wasser versetzt wurde. Ziel war es, das Verhalten der kontinuierlich abdampfenden Quelle zu simulieren, um dies mit typischen Störgrößen bei Kabinennutzung zu vergleichen. Hierzu wurde ca. 200 ml Aceton mit ca. 400 ml Wasser verdünnt und im Waschbecken der Nasszelle positioniert und um eine Kühlung zu simulieren das Gefäß kontinuierlich mit Wasser umspült. Der so gewählte Ansatz entspricht einer Nettoausbeute von ca. 200 g TATP, welche als IED bereits verehrende Auswirkung haben kann. Das Sensorsystem wurde bei diesem Versuch in der Nähe der Abluftöffnung innerhalb der Nasszelle positioniert und die Tür während der Simulation geschlossen. In Abbildung 53 ist die Simulation der Synthese dargestellt. Wie erwartet ist das zeitliche Verhalten der Sensoren wie bereits in der Simulation im Labor ähnlich ausgeprägt. Zum Vergleich wurde im Anschluss an die Simulation eine größere Menge Deodorant in der Nasszelle freigesetzt, um den Unterschied zwischen einer einmal auftretenden Analytquelle durch normale Nutzung der Kabine und der kontinuierlich abdampfenden Quelle einer Synthese zu verdeutlichen.

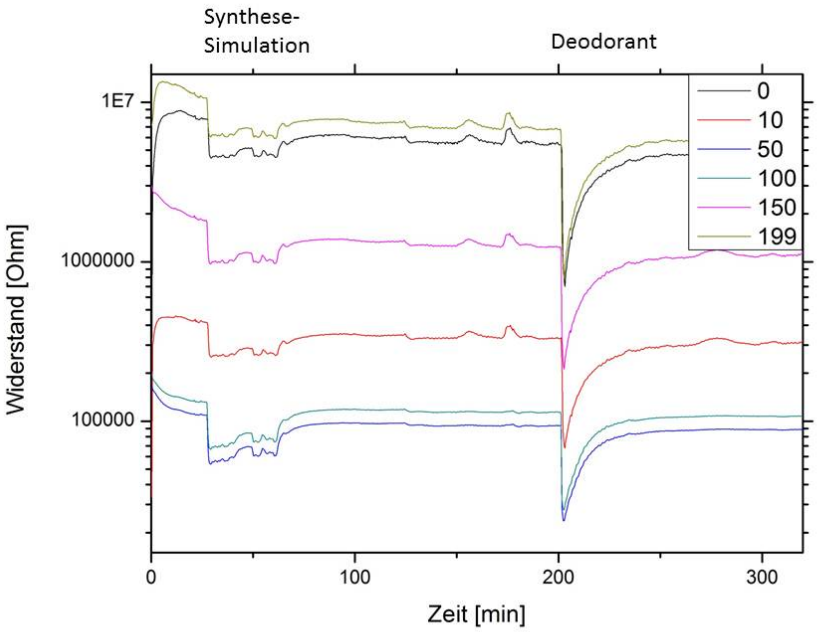


Abbildung 53: Simulation einer Synthese innerhalb der Kabine an Bord und Vergleich mit einem typischen Ereignis der Deodorantbenutzung in der Waschkabine.

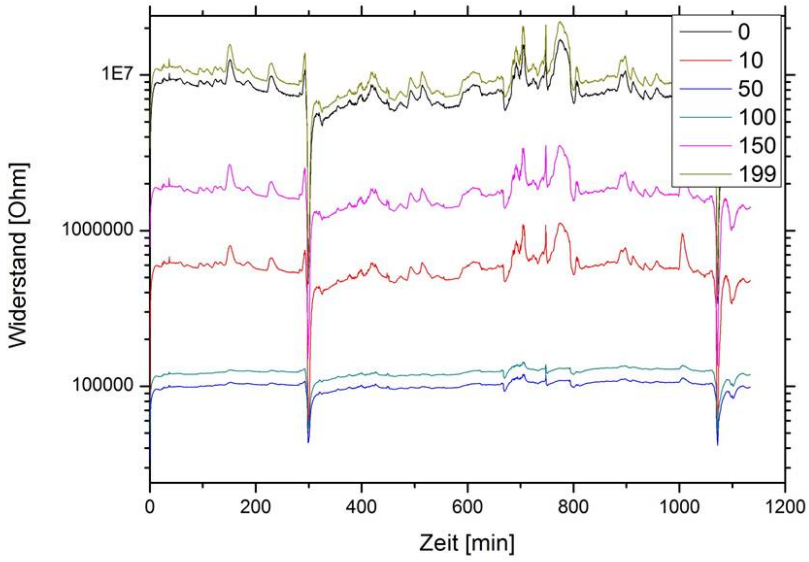


Abbildung 54: Hintergrundbelastung während der normalen Nutzung der Kabine an Bord über ca. 18 Stunden

Im Verlauf der normalen Nutzung der Kabine (exemplarisch Abbildung 54) lassen sich zwar mehrere Ereignisse die auf eine Änderung der Gasatmosphäre schließen lassen identifizieren (z.B. Nutzung der Dusche, WC, Waschbecken, Deodorant), allerdings gleicht keines einer kontinuierlichen abdampfenden Quelle. In den durchgeführten Messkampagnen konnten zwar nicht alle möglichen Nutzungsszenarien

durchgespielt werden es zeigt sich aber, dass das gewählte Merkmal durchaus zur präventiven Erkennung anomalen Verhalten in der Kabine genutzt werden kann.

5.1.6 Evaluierung von Sensoren auf Basis verschiedener Metalloxide

Um die in der Literatur vorgeschlagenen Metalloxide zur Detektion von TATP auf Ihre Leistungsfähigkeit hin zu überprüfen und Vergleichsdaten gegenüber kommerziell erhältlicher Sensoren zu erhalten, wurden Sensoren der ausgewählter Metalloxide hergestellt und anschließend auf ihr Verhalten bei TATP Exposition hin vermessen.

5.1.6.1 Herstellung metalloxidischer Sensoren

Für die Herstellung von Referenzsensoren auf Basis reiner Metalloxide wurde das Verfahren des Dropcoatings in Anlehnung an [Reisert2012] verwendet, mit dem ohne großen Aufwand verschiedene Metalloxide in Form von Nanopartikeln auf die Oberfläche eines Substrates aufgetragen werden können. Beim Dropcoating wird ein in einem Suspensionsmittel dispergierter Feststoff mittels einer Mikroliter-Pipette auf das Trägersubstrat aufgebracht. Als Träger für die sensitiven Schichten dient ein industriell gefertigtes Substrat der Firma UST Umweltsensortechnik GmbH mit einer Größe von 2,0x2,3 mm (Abbildung 55) und einer Wirkfläche von ca. 0,7x1,1 mm. Die darauf aufgebrachte Interdigitalstruktur zum Auslesen des Widerstandes besteht aus ca. 20 µm dicken Platin-Elektroden mit einem Abstand von ca. 30 µm. Beheizt wird der Keramikträger über einen Platinheizer auf der Rückseite des Chips.

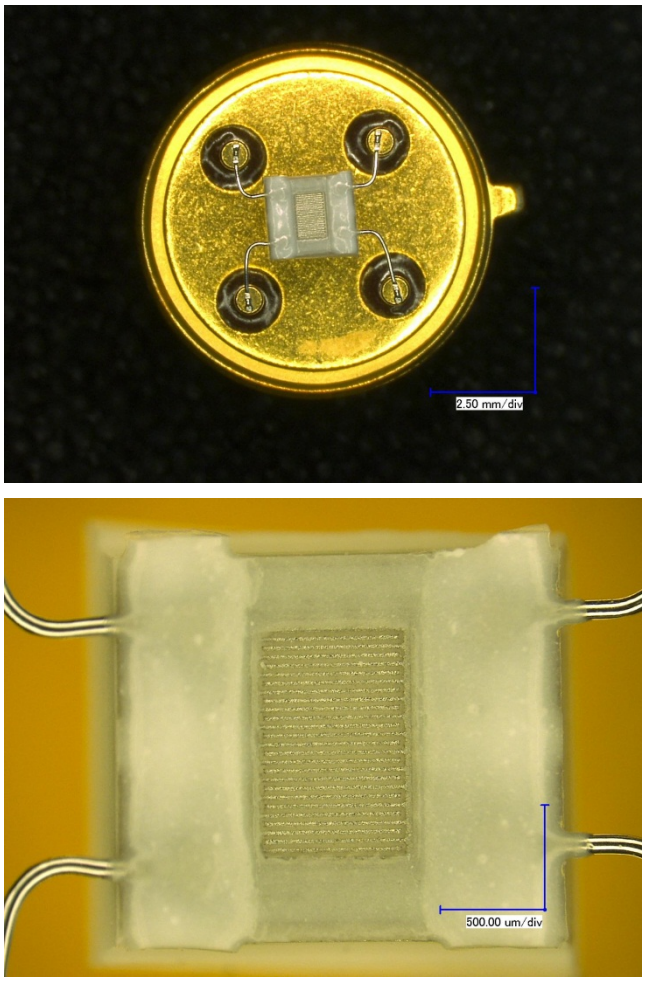


Abbildung 55: Oben: Sensorchip auf TO39 Sockel Unten: Nahaufnahme eines unbeschichteten Sensorchips mit Interdigitalstruktur.

Durch Vorversuche wurde die für die Beschichtung verwendete Suspension optimiert sowie das zur Konsolidierung genutzt Sinterprofil angepasst. Gute Ergebnisse hinsichtlich Schichthomogenität und Signalverhalten konnten mit einer Suspension 100 mg/ml Metalloxid/H_2O erzielt werden, wobei die Sensoren mit 1 µl der Suspension beschichtet wurden.

Im nachfolgenden Diagramm (Abbildung 56) ist das Sinterprofil zur Konsolidierung der Metalloxide abgebildet. Das Profil gliedert sich in 3 Teilbereiche: Im ersten wird bis 200 °C das Lösemittel aus der Schicht ausgetrieben und es kommt zum Strukturaufbau der Schicht. Ein zweiter Aufheizschritt bis 400 °C dient zur Eliminierung in der Schicht verbliebener Restorganik. Im letzten Schritt wird das Substrat bis auf 600 °C erhitzt und die Temperatur 20min gehalten. In dieser Phase beginnt eine Teilversinterung der Partikel. Da die verwendeten Metalloxide sehr unterschiedliche Schmelz- bzw. Sintertemperaturen besitzen (MoO_3 T_s ~ 800 °C bzw. Cr_2O_3 T_s~ 2400 °C) kann davon ausgegangen werden, dass die Partikel auf dem Substrat nur einen sehr losen

Verbund bilden. Allerdings konnte gezeigt werden, dass auch schon mit dem gewählten Temperaturprofil die aufgebrachte Schicht eine ausreichende Haftung auf dem Substrat besitzt, um die hergestellten Sensoren im Gasstrom vermessen zu können.

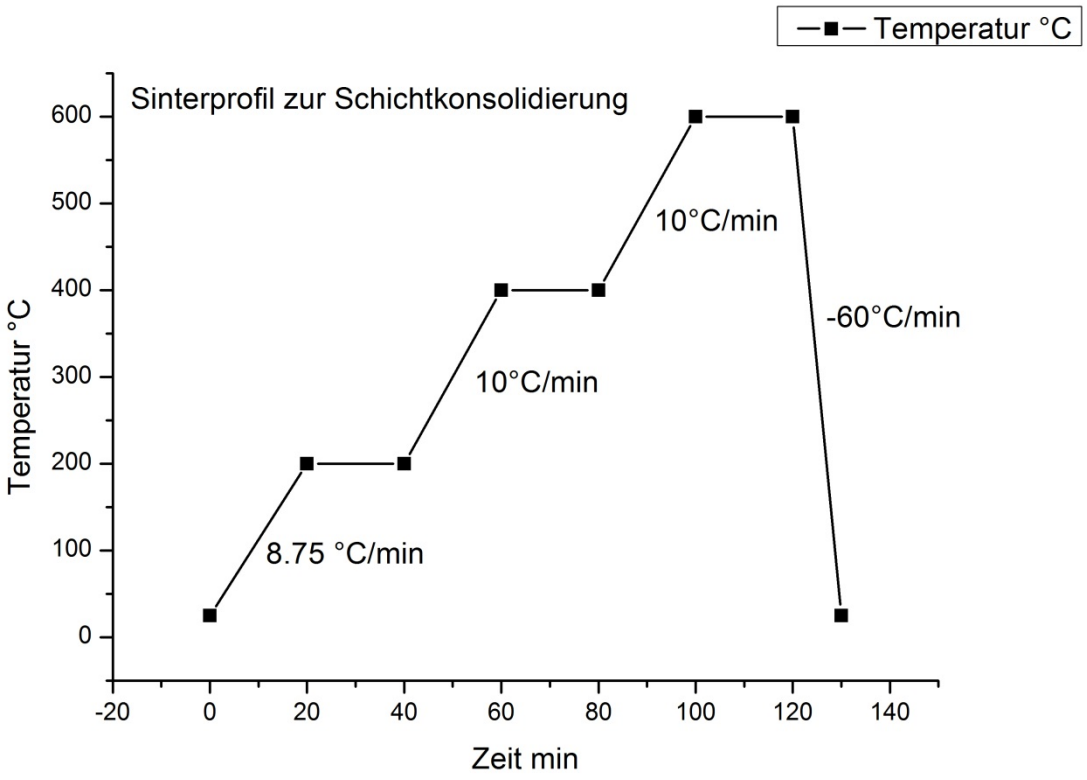


Abbildung 56: Sinterprofil zur Konsolidierung der Metalloxidschichten

Abbildung 57 zeigt Aufnahmen der mit dem oben beschriebenen Verfahren hergestellte Sensorschichten. Mit Ausnahme von Zinndioxid (SnO_2), bei dem es während des Sinterprozesses zu Splitterung und Teilablösung der Schicht gekommen ist, konnten für alle übrigen Metalloxide homogene Schichten erzeugt werden.

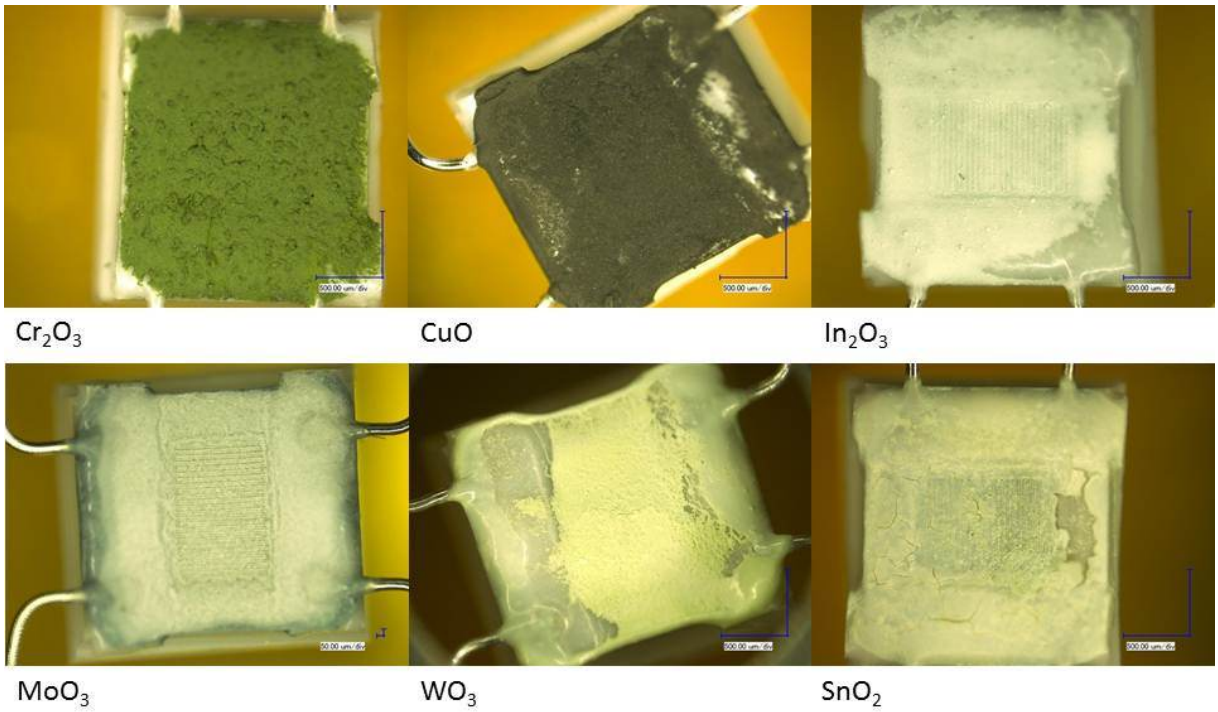


Abbildung 57: Lichtmikroskopische Aufnahmen der mit den unterschiedlichen Metalloxiden beschichteten Substrate.

5.1.6.2 Empfindlichkeiten der oxidischen Gassensoren gegenüber TATP

Die nach dem oben beschriebenen Verfahren hergestellten Sensoren wurden auf ihre Reaktion gegenüber 1ppm TATP bei 50% rel. Luftfeuchte untersucht. Hierbei wurde die Temperatur der Sensoren im Bereich von 100 °C -400 °C variiert und gegen die bei der Exposition von TATP gemessenen rel. Signale aufgetragen (Abbildung 58) Es konnte gezeigt werden, dass alle Sensoren mit Ausnahme von Molybdänoxid gut auf TATP reagieren. Ein duales RedOx-Verhalten, konnte wiederum bei WO_3 und in geringem Maße bei In_2O_3 festgestellt werden. Die beiden p-Halbleiter Cr_2O_3 sowie CuO reagieren zwar auch mit einer Widerstandserhöhung allerdings ist dies wie in der Literatur beschrieben bei Halbleitern dieses Typs die anzunehmende Reaktion auf reduzierende Gasspezies.

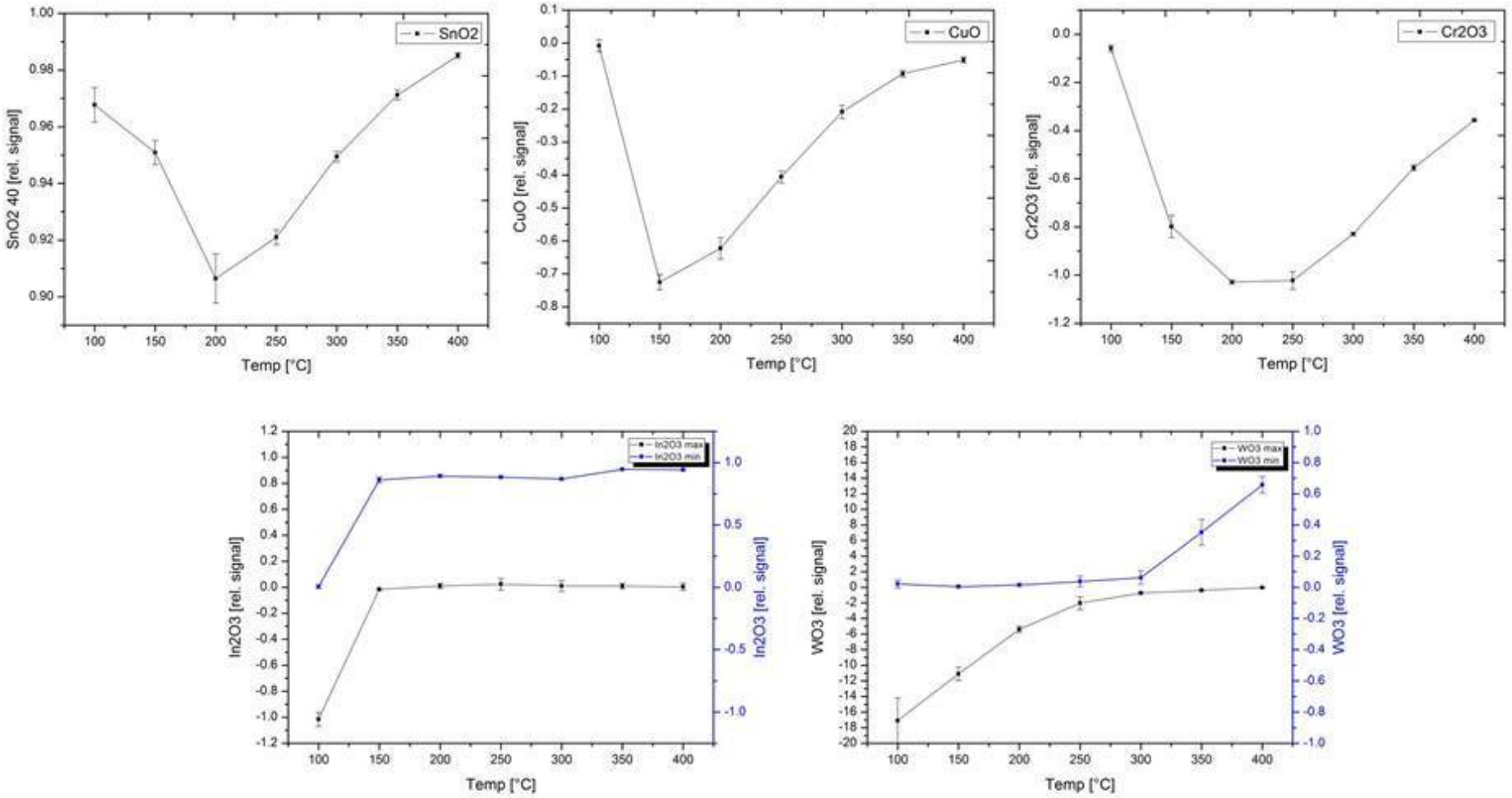


Abbildung 58: Relatives Sensorsignal der Hergestellten Metalloxidsensoren bei 1ppm TATP und 50% rel. Luftfeuchte im Temperaturbereich 100 °C- 400 °C

5.1.7 Entwicklung katalytisch wirkender Vorfilter zur Selektivitätssteigerung von Halbleitergassensoren

Neben der Sensortemperatur lassen sich auch katalytisch wirkende Vorfilter als selektivitätssteigernde Maßnahme einsetzen. Da sich im Laufe des Projektes gezeigt hat, dass der temperaturzyklische Betrieb eines WO_3-basierten Sensors im untersuchten Umfang ausreicht, um TATP selektiv nachzuweisen, wurden die synthetisierten Filtermaterialien vor allem genutzt, um weitere Materialien zu identifizieren, die für Sensoren in Frage kommen könnten und um die Frage zu klären, welche Reaktion möglicherweise am Sensor bzw. am Filter ablaufen.

Für diese Untersuchungen wurden Modelkatalysatoren hergestellt und diese auf ihre katalytische Aktivität gegenüber TATP untersucht. Aus der Literatur ist bekannt, dass sich Metalloxide wie Kupfer-, Zink-, Indium-, und Eisenoxid für die Zersetzung von TATP eignen [Dubnikova2011, Amani2012]. Ausgehend davon wurden über ein nass chemisches Beschichtungsverfahren Korundkugeln mit der jeweiligen aktiven Komponente beschichtet und anschließend in einem Teststand (Abbildung 59) auf ihre katalytische Aktivität hin untersucht. Im Teststand wird über einen Mass Flow Controller ein geregelter Strom aus synthetischer Luft (100 sccm) eingestellt und in die Apparatur eingeleitet. Der Volumenstrom ist so gewählt, dass er sich an den optimalen Analysebedingungen des FTIR-Spektrometers orientiert. Über einen Ventilblock in dem sich die TATP-Quelle befindet lässt sich der Volumenstrom auf drei Wege umleiten. Erster Weg: Durch die TATP-Quelle in den Reaktor innerhalb des Ofens; Zweiter Weg: reine Synthetische Luft durch den Reaktor; Dritter Weg: Am Ofen vorbei direkt in die Analysegeräte. Weg 1 ist für die eigentlichen Experimente zur Charakterisierung der Katalysatoren gedacht. Weg zwei und drei dienen zur Reinigung und Überprüfung des Systems. Als Reaktor dient ein gasdichtermit Aluminiumbehälter der von oben nach unten mit Gasdurchströmt wird. Der Reaktor verjüngt sich am Boden und wird dort mit Glaswolle befüllt, welche ein austreten des Katalysatormaterials verhindert aber gleichzeitig eine möglichst drucklose Durchströmung mit Gas ermöglicht. Zur Analyse der Zersetzungsprodukte dient ein FTIR-Spektrometer sowie ein Massenspektrometer, welches mittels Restriktor- Kapillare in den Gasstrom eingekoppelt wird. Im Laufe der Experimente zeigte sich allerdings, dass das Massenspektrometer, welches ursprünglich Teil eines GC/MS- Systems war für die angedachte Aufgabe nicht empfindlich genug was, so dass die erhaltenen Daten aus Mangel an Aussagekraft nicht mit in die Betrachtung der Gasanalyse mit einbezogen

wurden.

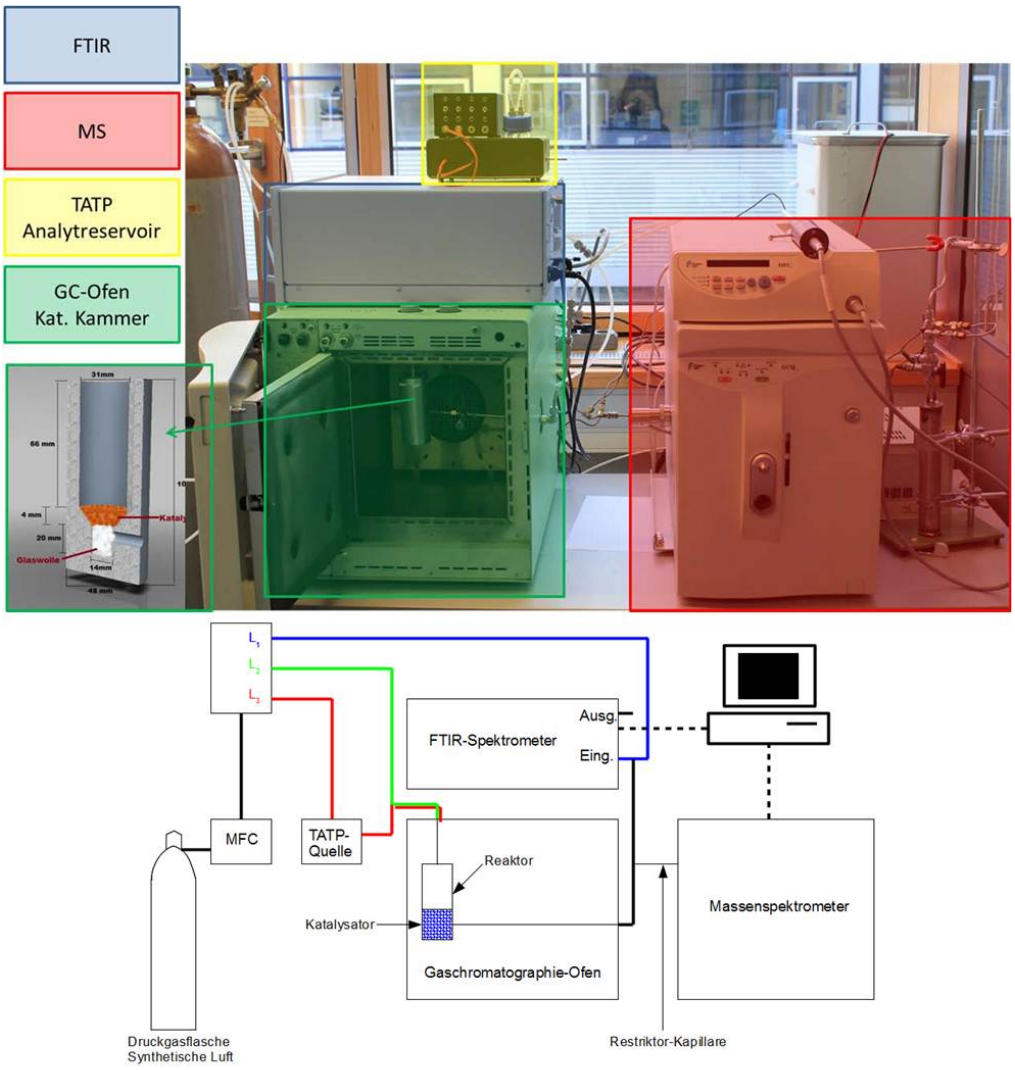


Abbildung 59: Oben: Bild des Katalysatorprüfstandes die einzelnen Bestanteile sind farblich hinterlegt. Unten: Schema des Prüfstandes bestehend aus geregelter Luftversorgung, Ventilblock und TATP-Quelle, Ofen zur Temperierung des Katalysators sowie Analyse Geräte (FTIR- und Massenspektrometer.

5.1.7.1 Herstellung der Katalysatoren durch Fällung schwerlöslicher Hydroxide

Bei Fällungsprozess wird die aktive Komponente aus einer wässrigen Lösung ausgefällt. Hierbei wird das jeweilige Metallsalz gelöst (hier als Nitrat) und der pH-Wert durch Zugabe einer Base solange verändert, bis ein Zustand der Übersättigung mit Überschreiten der Keimbildungsschwelle erzeugt wird und das Salz als Hydroxid ausfällt. Nach Filtrierung und anschließender Kalzinierung erhält man das Oxid, welches als Katalysator dient [Winnacker2006].

Um eine möglichst homogene Fällung des Hydroxids auf dem Trägermaterial (Korundkugeln [Al_2O_3] Ø 125- 200 µm) zu garantieren wird nicht mit einer direkt Zugabe

einer Base gearbeitet sondern die benötigten Hydroxidionen in situ innerhalb der Lösung durch die Zersetzung von Harnstoff erzeugt. Nachfolgende Bruttoreaktionsgleichungen verdeutlichen den Ablaufenden Mechanismus.

$$(NH_2)_2CO \rightarrow NH_4^+ + CNO^- \quad \text{langsam 70-90°C} \quad (5)$$

$$NH4^+ + CNO^- + 3H_2O \rightarrow 2NH_4^+ + CO_2 + 2OH^- \quad \text{schnell} \quad (6)$$

$$Mx^+ + xOH^- \rightarrow M(OH)x \quad \text{schnell} \quad (7)$$

Während der Arbeiten wurden Modelkatalysatoren der folgenden Metalloxide hergestellt und analysiert:

- CuO auf Al_2O_3
- In_2O_3 auf Al_2O_3
- Fe_2O_3 auf Al_2O_3
- SnO_2 auf Al_2O_3
- Cr_2O_3 auf Al_2O_3
- WO_3 auf Al_2O_3
- MoO_3 auf Al_2O_3

Für die Beschichtung wurden die Korundkugeln in das Reaktionsgefäß (Abbildung 60) vorgelegt und mit der oben beschriebenen Syntheseprozedur begonnen. Abweichend wurde für WO_3 und MO_3 abgewandelte Synthesewege gewählt, da beide keine schwerlöslichen Hydroxide im basischen bilden. Für WO_3 wurde in Anlehnung an [Supothina2007] eine Säure-Base-Fällung ausgehend von Ammoniumparawolframat durchgeführt. Für die Synthese von MO_3 wurden mehrere Methoden getestet, alle auf Basis eines Sol-Gel-Prozesses ausgehend von Ammoniumheptamolybdat. Die Methoden die von Ramana [Ramana2009] und Jiao [Jiao2005] vorgeschlagen führten nicht zum gewünschten Ergebnis. Gut beschichtete Kugeln konnten erst mit einem Citrat-Sol-Gel-Prozess nach Ganguly [Ganguly2007] erzielt werden.

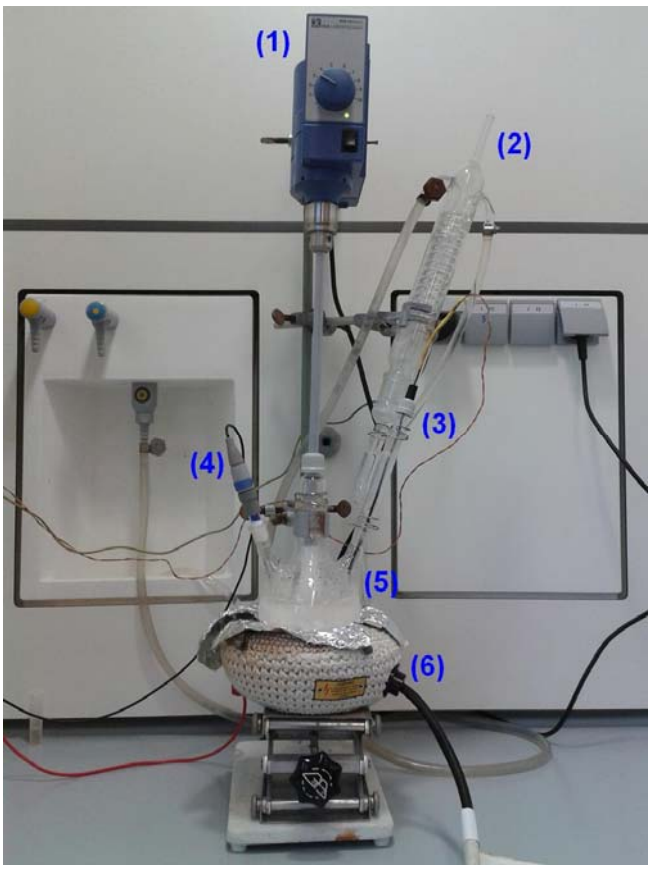


Abbildung 60: Apparatur zur Beschichtung der Korundkugeln: 1) KPG-Rührer, 2) Rückflusskühler, 3) Pt100-Temperaturfühler, 4) pH-Elektrode, 5) Drehalsrundkolben, 6) Heizpilz

Abbildung 61 zeigt beispielhaft die hergestellten Modelkatalysatoren. Über die gewählten Beschichtungsprozesse konnten die Korundkugeln mit Erfolg beschichtet werden, was im Anschluss an die Synthesen anhand von mikroskopischen Aufnahmen (Auflicht, REM) bestätigt wurde. Messungen mittels XRD, EDX bestätigen die Ergebnisse und zeigen, dass die Metalloxide in der gewünschten Oxidationsstufe vorliegen.

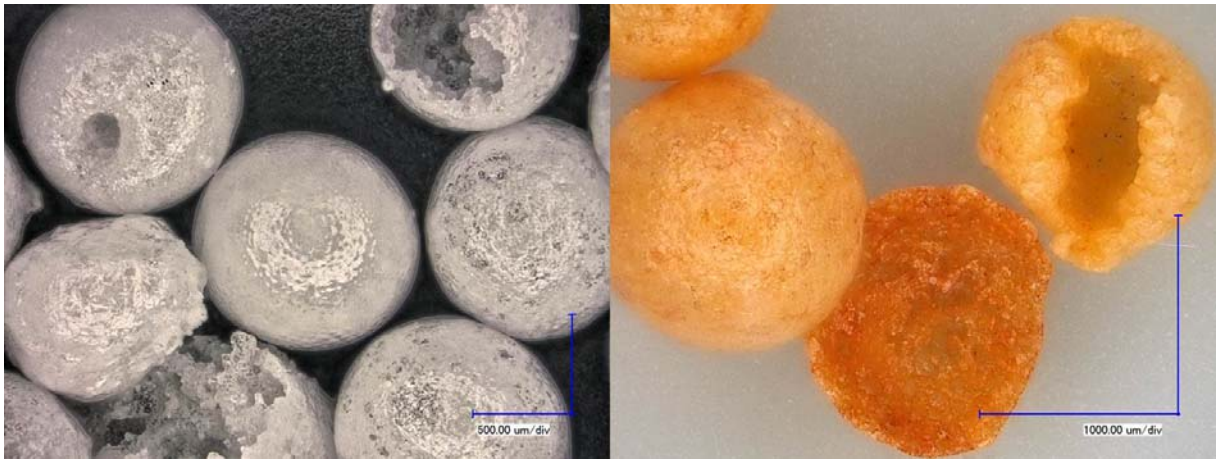


Abbildung 61: Korundkugeln vor und nach der Beschichtung mit Fe2O3

5.1.7.2 Darstellung der spektroskopischen Ergebnisse zur Reaktion von TATP auf oxidischen Katalysatoren.

Unbeschichtete Al_2O_3-Kugeln:

Abbildung 62 zeigt den reinen thermischen Zerfall von TATP an Al_2O_3. Abgesehen von der katalytischen Wirkung der Korundkugeloberfläche, welche als vernachlässigbar angesehen wird, da der verwendete Elektrokorund als weitgehend chemisch inert angesehen wird, wird das TATP durch die Temperaturerhöhung zersetzt. Der Zerfall ist an der Verringerung der prägnanten Banden des TATP bei v_1=1200 cm^{-1} und v_2=1380 cm^{-1} sichtbar. Da die Menge an TATP im Luftstrom in diesem Versuchsaufbau nicht definiert eingestellt werden konnte, wird das Verhältnis der beiden Banden in dieser und den folgenden Messungen dazu verwendet, den Abbau des TATP zu dokumentieren. Dieses Verhältnis wird als Bandenquotient

$$\mathbf{A} = \frac{\boldsymbol{\nu_1}}{\boldsymbol{\nu_2}} \tag{8}$$

bezeichnet. Die Verringerung des Bandenquotienten im Laufe der Messungen markiert den Fortschritt des Abbaus des TATP. Im 100 °C-Spektrum steigt die TATP-Konzentration, wie an den Banden bei 1200 cm^{-1} und 1380 cm^{-1} erkennbar ist, leicht an anstatt geringer zu werden was auf Desorptionsvorgänge von vorher adsorbierten TATP zurückgeführt wird. Ab einer Temperatur von 150 °C lassen sich erste Bandengruppen erahnen, die ab 200 °C dann bei v=1740 cm^{-1} und v=2360 cm^{-1} besser erkennbar werden. Weitere Bandengruppen werden ab 250 °C bei v=2800 cm^{-1} sichtbar. Bei 300 °C ist TATP vollständig zersetzt. Die typischen TATP-Banden, die im 50°C-Spektrum gut erkennbar sind, sind nicht mehr identifizierbar.

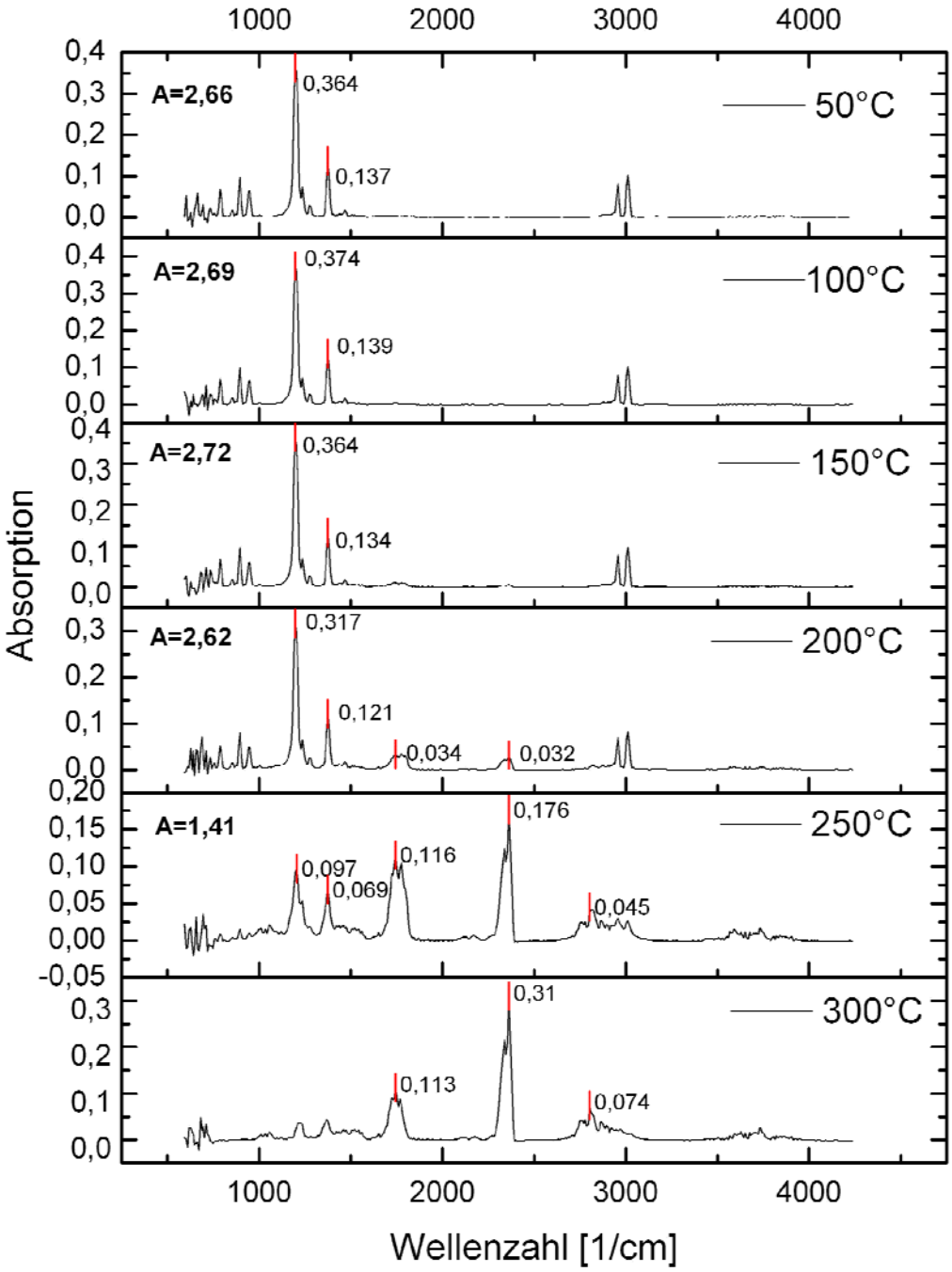


Abbildung 62:: Zersetzungsspektren (FTIR) bei unbeschichteten Kugeln im zweiten Reaktor

Gasphasenreaktionen an Zinn(IV)-oxid

Bei der Zersetzung von TATP am SnO_2-Katalysator in Abbildung 63 sind schon ab 100 °C erste Bandengruppen bei v=1740 cm^{-1} (Carbonyl) und v=2360 cm^{-1} (CO_2) erkennbar. Bei v=2800 cm^{-1} kann ab 250 °C noch eine weitere Bande identifiziert werden, welche zu CH-Valenzschwingungen des Formaldehyds passen. Ab 300 °C findet dann die komplette Zersetzung zu CO_2 statt.

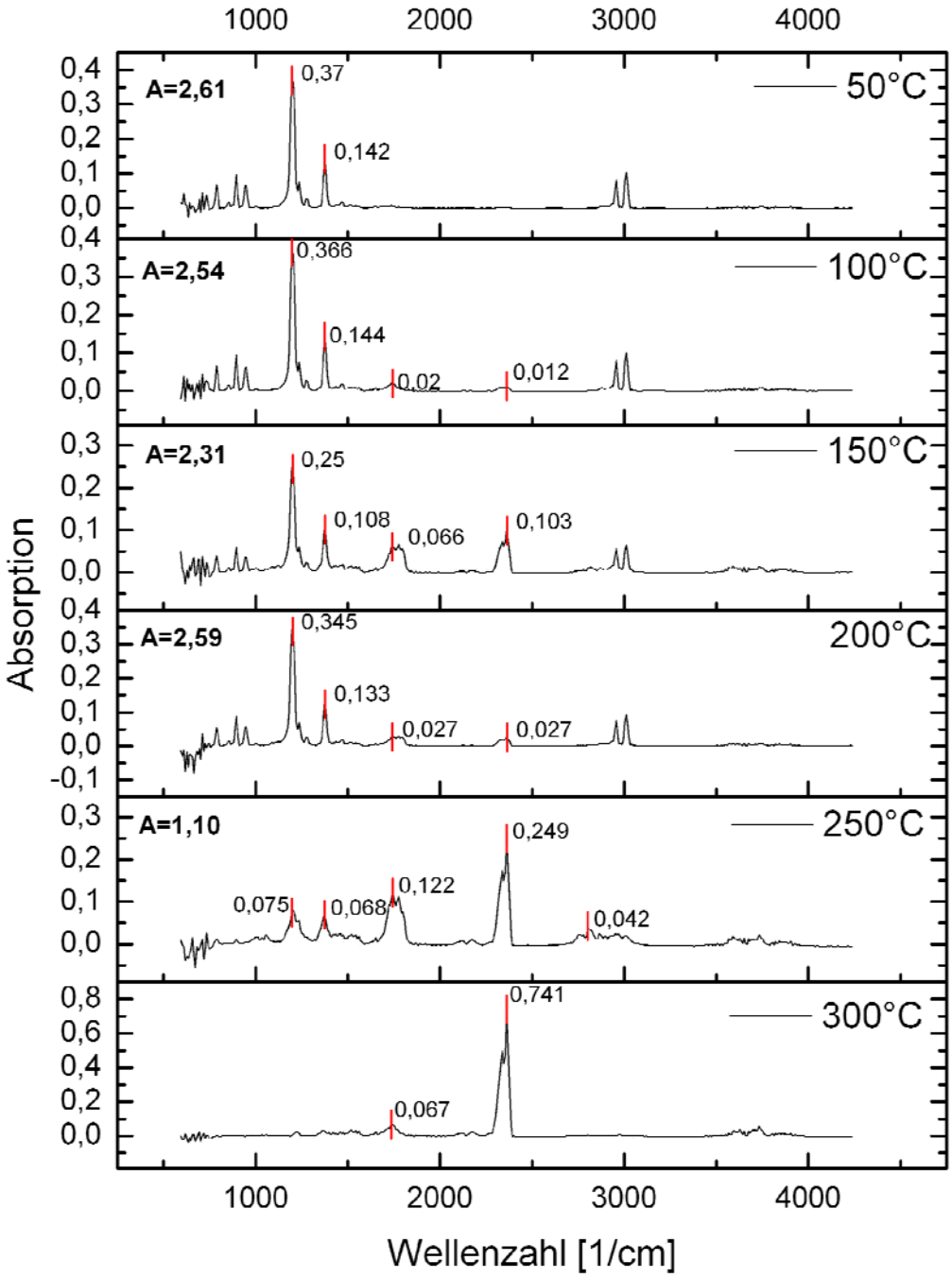


Abbildung 63: Zersetzung am SnO_2-Katalysator

Gasphasenreaktionen an Eisen(III)-oxid

In Abbildung 64 ist die Zersetzung von TATP am Fe_2O_3-Katalysator dargestellt.

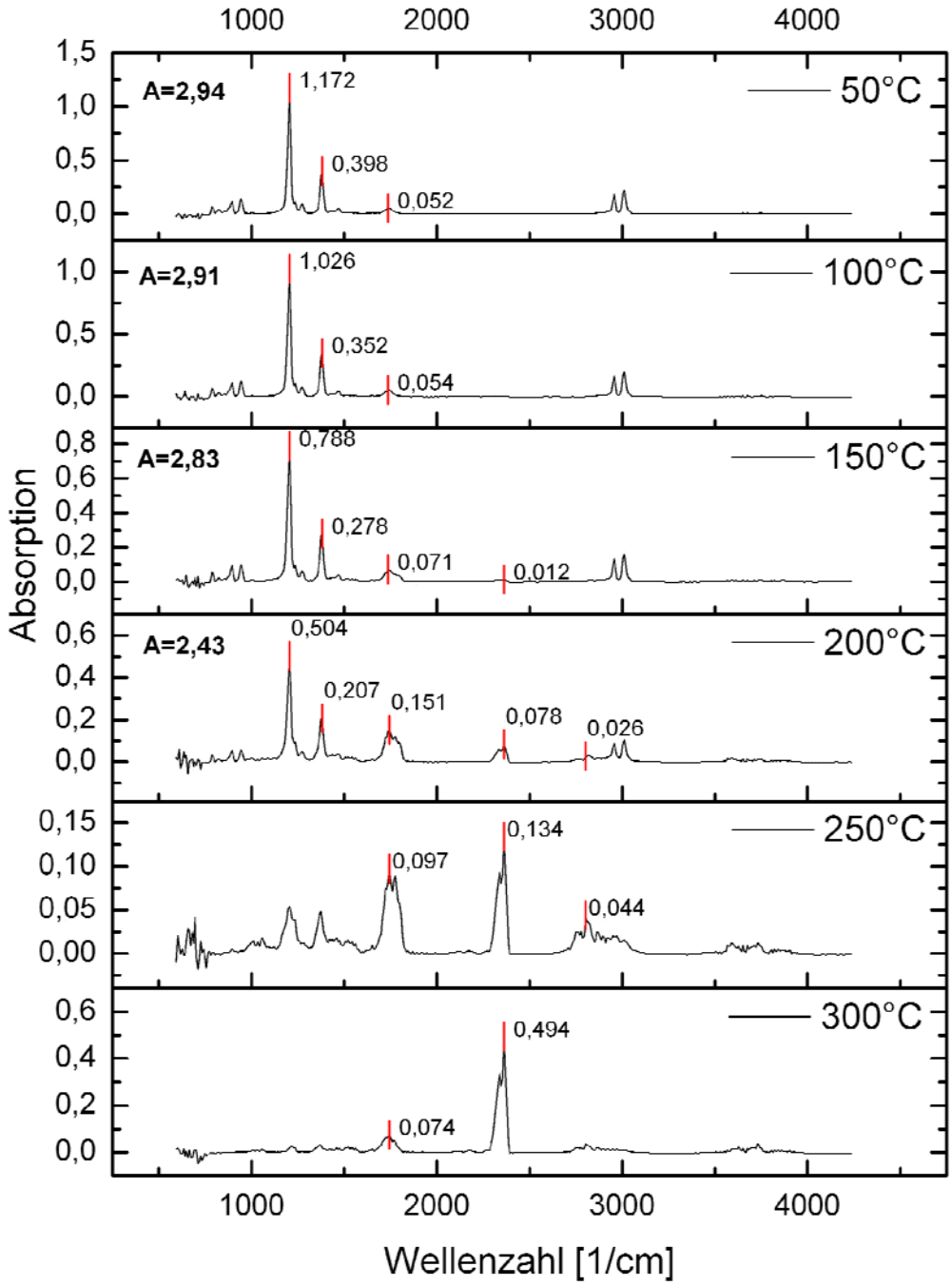


Abbildung 64: Zersetzung von TATP am Fe_2O_3-Katalysator

Die Zersetzung von TATP beginnt schon ab 50 °C, was an den Banden bei v=1740 cm^{-1} zu erkennen ist. Ab 150 °C erscheinen weitere Bandengruppen bei v=2362 cm^{-1} und ab 200 °C bei v=2800 cm^{-1}. Ab 300°C wird TATP dann vollständig zersetzt.

Gasphasenreaktionen an Indium(III)-oxid

Abbildung 65 zeigt die Zersetzungsspektren am In_2O_3-Katalysator. Im 100 °C-Spektrum sind erste Bandengruppen der Zersetzungsprodukte von TATP bei v=1740

cm^{-1} zu erkennen. Neue Banden sind im 150 °C-Spektrum bei v=2360 cm^{-1} identifizierbar. Ab 250 °C wird TATP komplett in Wasser und CO_2 zersetzt.

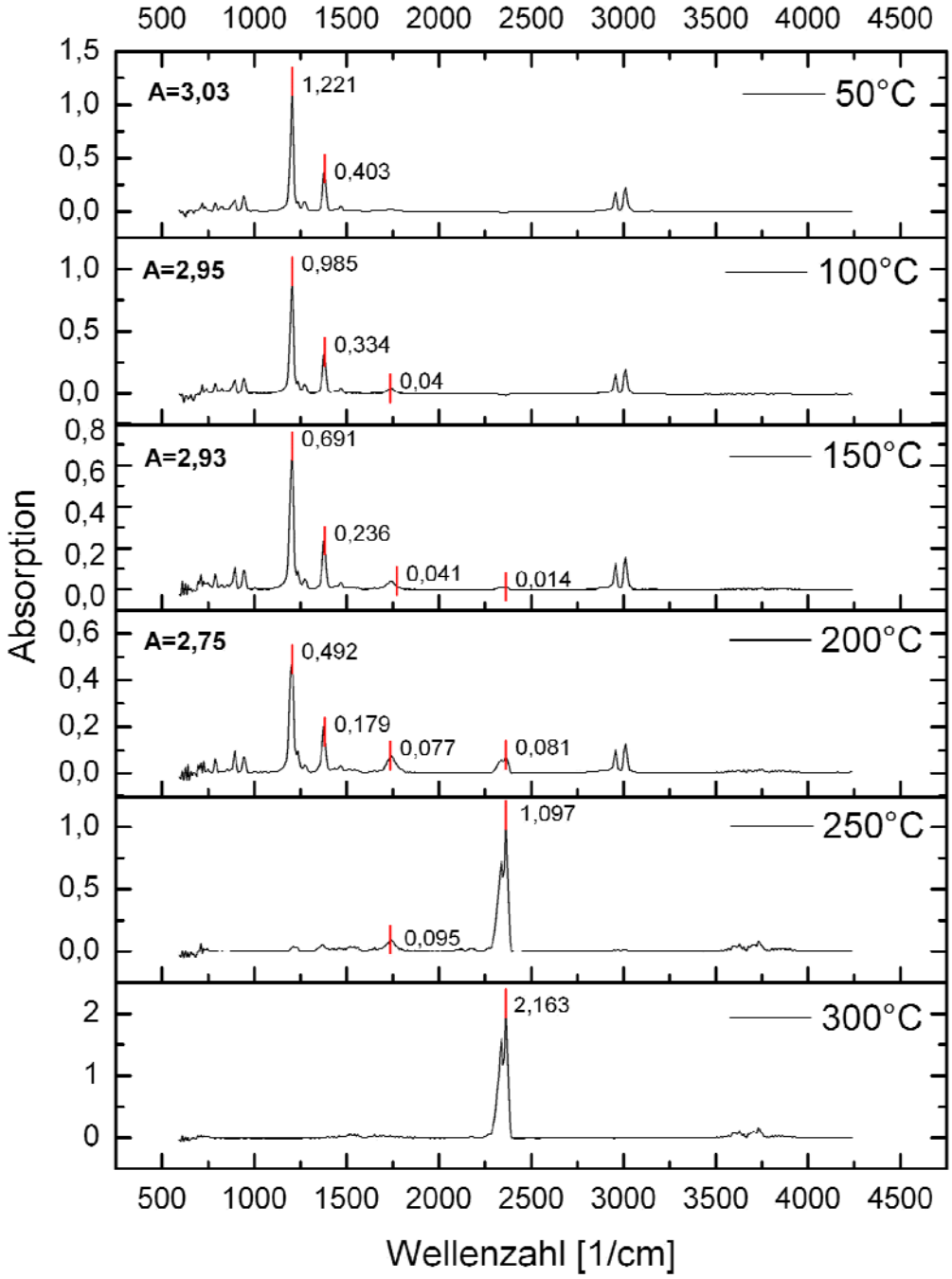


Abbildung 65: Zersetzung am In_2O_3-Katalysator

Gasphasenreaktionen an Kupfer(II)-oxid

Die Zersetzungsspektren Abbildung 66 zeigen, dass ab einer Temperatur von 50 °C sich erste Bandengruppen schon erahnen lassen, welche aber erst ab 100 °C bei v=1740 cm^{-1} identifiziert werden können. Eine weitere Bande wird bei v=2360 cm^{-1}

ab 150 °C richtig sichtbar. Ab 250 °C wird TATP auch hier komplett zu CO_2 und Wasser zersetzt.

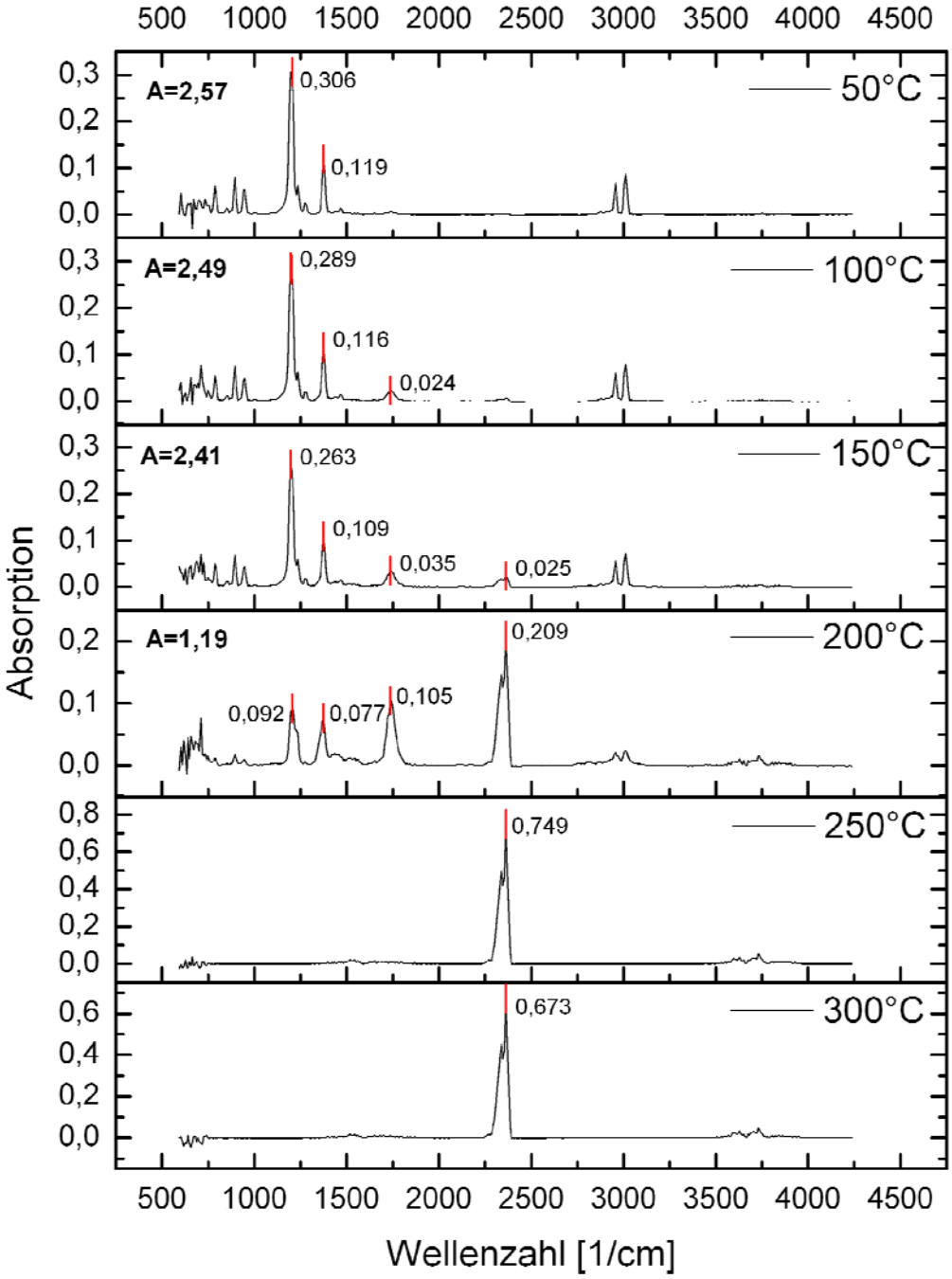


Abbildung 66: Zersetzungsspektren am CuO-Katalysator

Gasphasenreaktionen an Chrom(III)-oxid

Abbildung 67 zeigt die Zersetzung von TATP am Cr_2O_3-Katalysator.

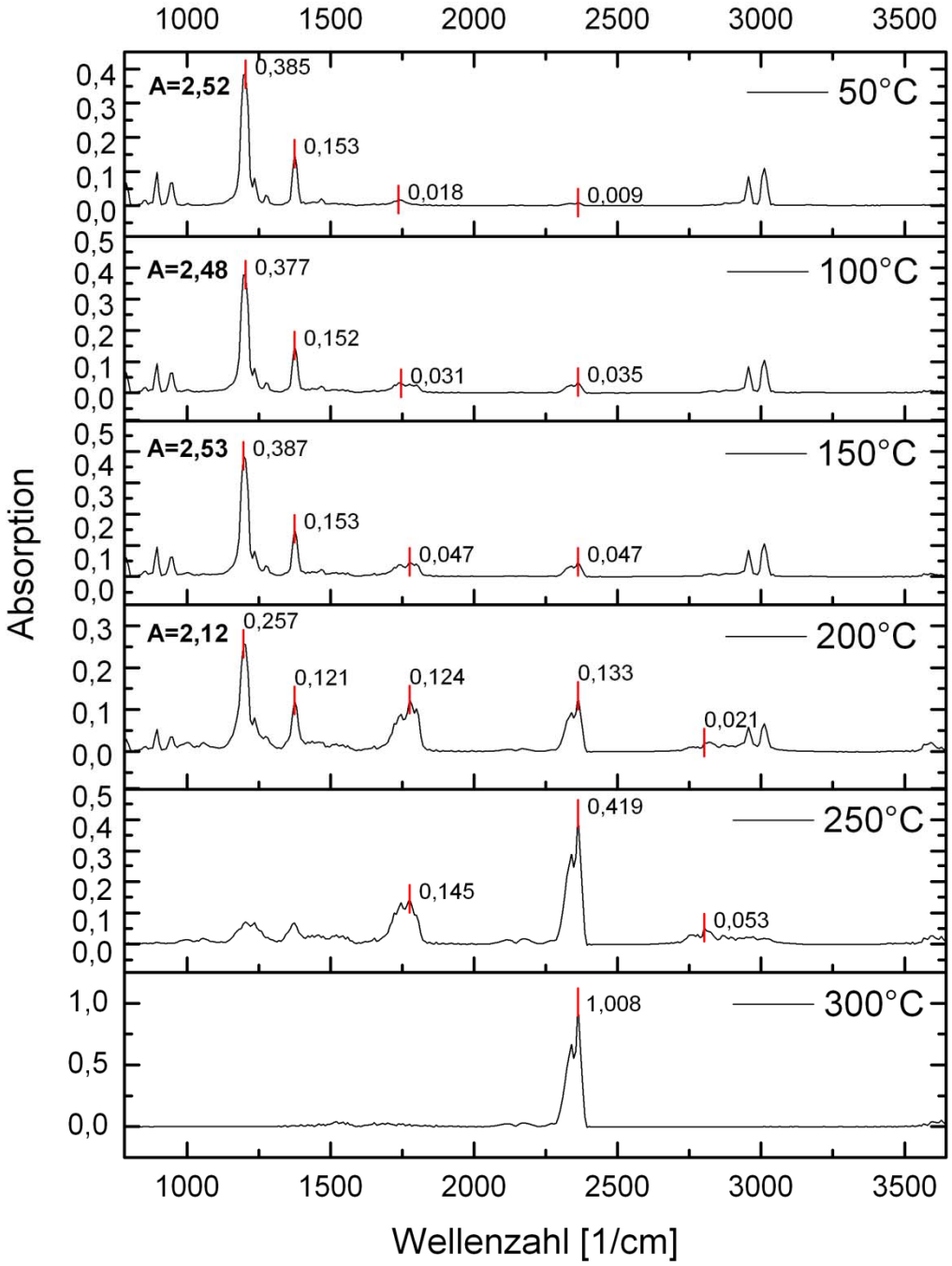


Abbildung 67: Zersetzungsspektren am Cr_2O_3-Katalysator

Schon bei 50 °C sind erste Bandengruppen der Zersetzungsprodukte bei v=1740 cm^{-1} und bei v=2360 cm^{-1} zu erkennen. Die TATP-Konzentration steigt im 150 °C-Spektrum erneut an, bevor sie dann wie gewohnt rapide abnimmt. Ab 200 °C wird bei v=2800 cm^{-1} eine weiter Bande sichtbar. TATP wird ab 250 °C total zersetzt. Die Zersetzungsprodukte bei 300 °C sind Wasser und CO_2.

Gasphasenreaktionen an Wolfram (VI)-oxid

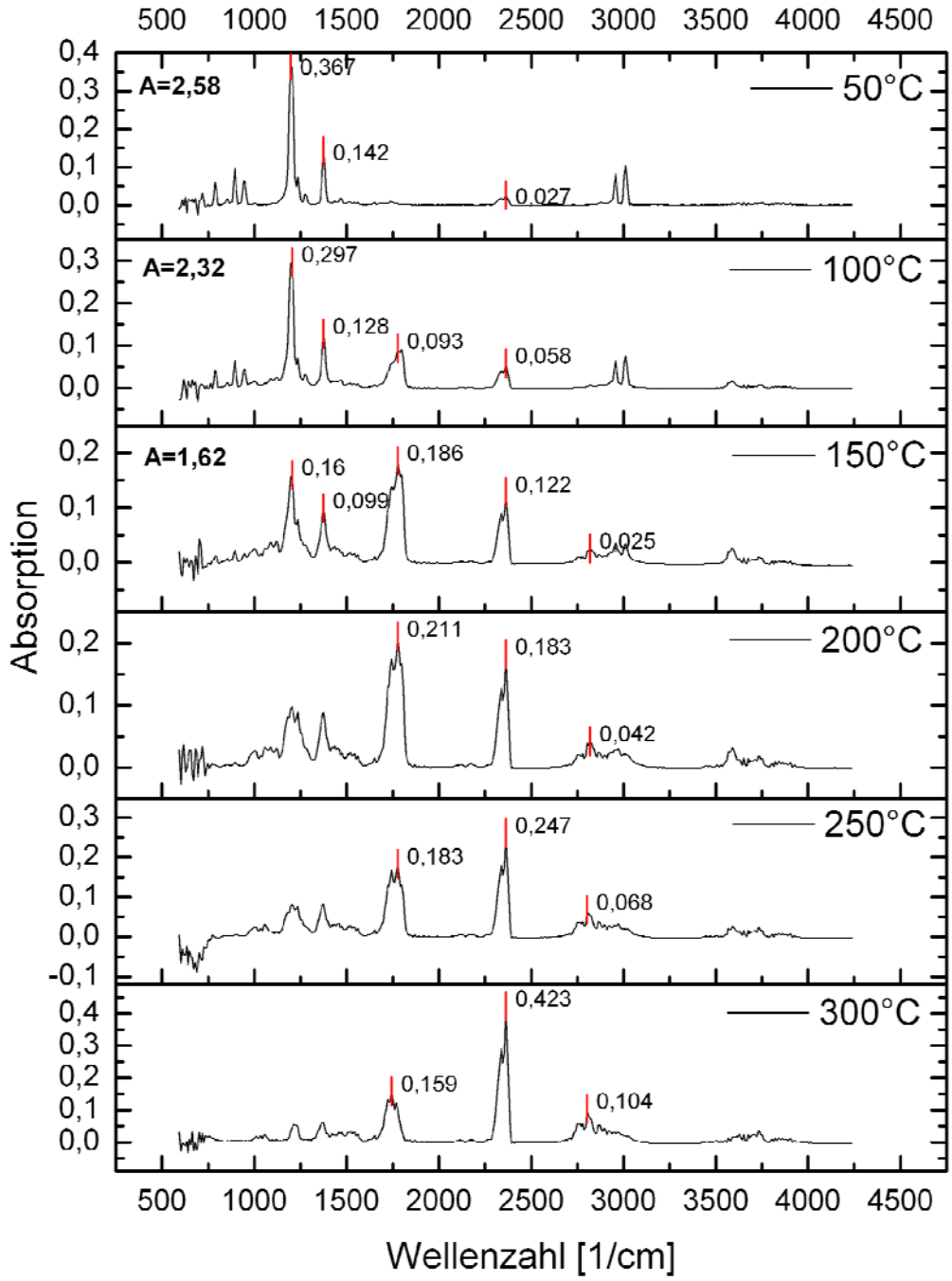


Abbildung 68: Zersetzungsspektren an der WO_3-Probe

Auch bei der WO_3-Probe beginnt die Zersetzung des TATP schon bei 50 °C. In Abbildung 68 sind die Banden bei v=2360 cm^{-1} gut zu identifizieren.

Ab 100 °C kommen weitere Bandengruppen bei v=1780 cm^{-1} und ab 150 °C bei v=2820 cm^{-1} hinzu. TATP wird schon ab 200 °C vollständig zersetzt. Die typischen Banden des TATP bei v=1200 cm^{-1} und v=1380 cm^{-1} und die weiteren zugehörigen Bandengruppen sind nicht mehr erkennbar oder werden von den Banden der Zerset-

zungsprodukte überlagert. Ab 150 °C ist eine deutlicher Anstieg der CO_2 Bande erkennbar was auf eine weitere Zersetzung hindeutet.

Gasphasenreaktionen an Molybdän(VI)-oxid

In Abbildung 69 sind die Zerfallsspektren von TATP an der MoO_3-Probe zu sehen. Die Zersetzung beginnt schon bei 50 °C wie an der Bandengruppe bei v=1740 cm^{-1} erkennbar ist. Im 100 °C-Spektrum kommen noch Bandengruppen bei v=2830 cm^{-1} und im 150 °C-Spektrum bei v=2330 cm^{-1} hinzu. Ab 200 °C wird TATP schon vollständig zersetzt. Die typischen Banden bei v=1200 cm^{-1}, v=1380 cm^{-1} und die weiteren zugehörigen Bandengruppen sind nicht mehr erkennbar. TATP ist entweder nicht mehr vorhanden oder die Banden werden von Zersetzungsprodukten überlagert.

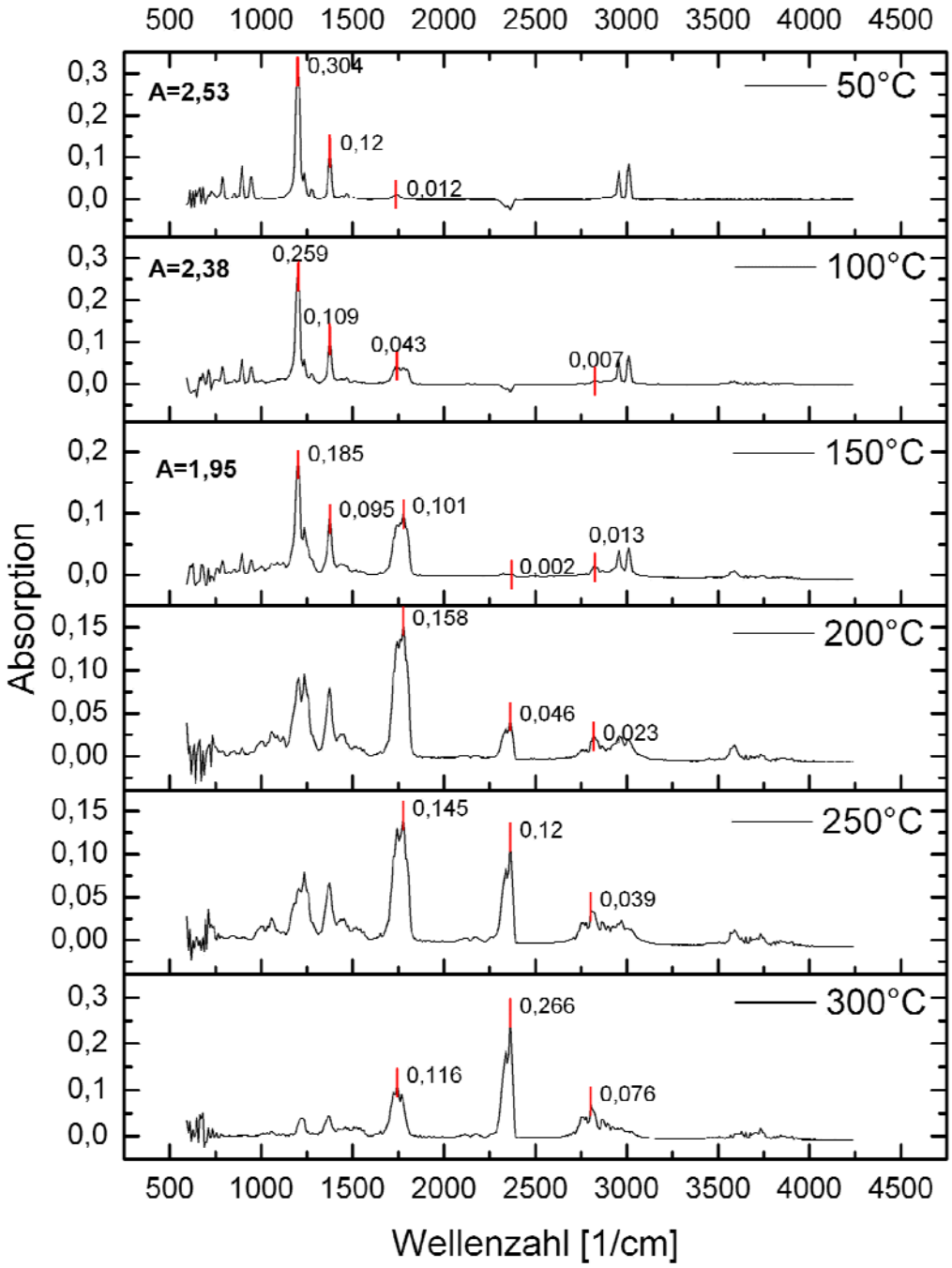


Abbildung 69: TATP-Zerfallsspektren am MoO_3-Katalysator

5.1.7.3 Gasphasenreaktion mit TATP: Rekonstruktion und Interpretation der spektroskopischen Ergebnisse

Unbeschichtete Al_2O_3-Kugeln:

Der thermische Zerfall von TATP an dem unbeschichteten Trägermaterial findet ab 200 °C statt und ist an seinen charakteristischen Produkten zu identifizieren. Am intensivsten sind die Bandengruppen bei v=1740 cm^{-1}, v=2360 cm^{-1} und v=2800 cm^{-1}

ausgeprägt. Zur genauen Bestimmung der Produkte wird ein synthetisches Spektrum aus Literaturspektren der einzelnen Komponenten des 250 °C-Spektrum generiert, welches in Abbildung 70 zu sehen ist. Hierzu werden Literaturspektren in ihrer Intensität iterativ so an das gemessene Spektrum angepasst, so dass eine optimale Übereinstimmung erzielt werden kann.

Dieses Referenzspektrum ist nicht deckungsgleich mit dem 250 °C-Messspektrum. Bei diesem und folgenden Vergleichen in den folgenden Kapiteln erreicht man nie eine perfekte Übereinstimmung der Spektren, da die Referenzspektren der einzelnen Komponenten unter anderen Laborbedingungen aufgenommen wurden. Es wird hier lediglich das Ziel verfolgt, qualitative Aussagen über die Reaktionsprodukte treffen zu können.

Die einzelnen Komponenten des Referenzspektrums sind in Tabelle 7 zu finden. Nicht alle Bandengruppen des Messspektrums sind im Referenzspektrum vorhanden und konnten einem Zerfallsprodukt zu geordnet werden. Das Wasserspektrum wurde von allen bearbeiteten Spektren abgezogen, um die Banden weiterer Verbindungen besser sichtbar zu machen.

Tabelle 7: Verbindungen die als Reaktionsprodukte des TATP- Zerfalls das Referenzspektrum bilden, welches an das Messspektrum angepasst wurde.

Name der Verbindung
Kohlenstoffdioxid
Formaldehyd
Kohlenstoffmonoxid
Methanol
Aceton
Essigsäure
TATP
Essigsäuremethylester
Methylvinylketon

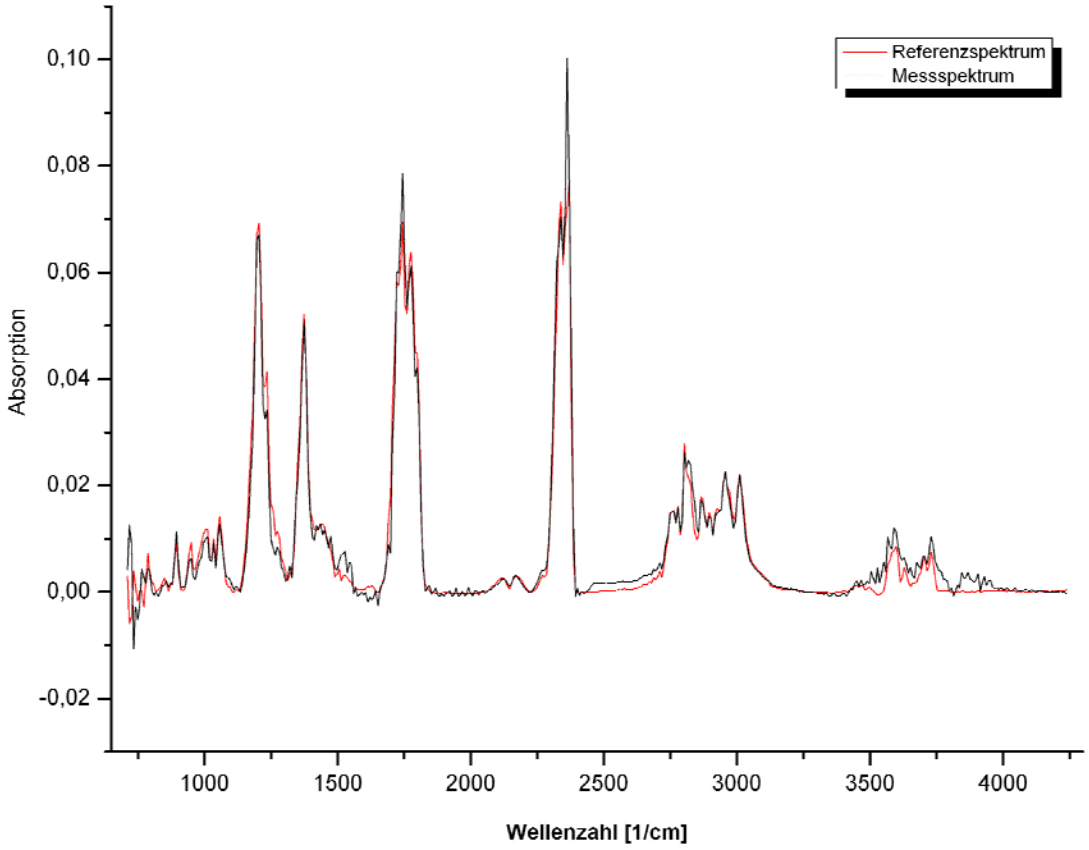


Abbildung 70: Mess- und Referenzspektrum der unbeschichteten Kugeln bei 250 °C

Auch im 250 °C-Spektrum ist noch unzersetztes TATP vorhanden. Bei den Banden im Bereich von v=4000 cm^{-1} bis v=3500 cm^{-1}, welche in diesem Referenzspektrum nicht vorhanden sind, handelt es sich höchst wahrscheinlich um weitere Wasser-Banden. Trotz der vorherigen Subtraktion des Wasserspektrums vom Messspektrum konnten nicht alle Wasser-Banden entfernt werden. Auch die Banden bei v=1500 cm^{-1} des Messspektrums könnten vom Wasser stammen. Da an dieser Stelle Banden verschiedener Zersetzungsprodukte zu finden sind, ist die Zuordnung hier nicht genau möglich.

Gasphasenreaktionen an Zinn(IV)-oxid

Der Zerfall von TATP am SnO_2-Katalysator in Abbildung 71 zeigt ein ähnliches Spektrum, wie der Zerfall an den unbeschichteten Kugeln in Abbildung 70. Die identifizierten Zerfallsprodukte des 250 °C-Spektrum sind in Tabelle 8 aufgelistet. Im Referenzspektrum sind keine unbekannten, nicht identifizierbare Peaks zu erkennen.

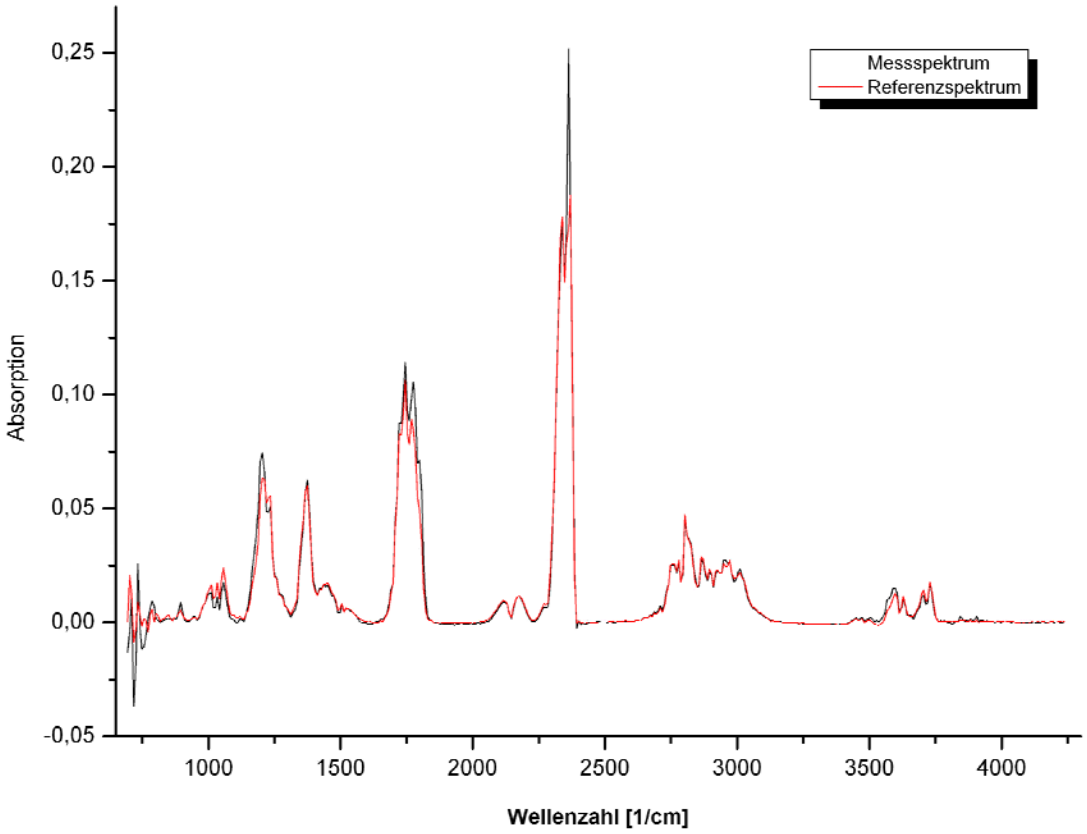


Abbildung 71: Mess- und Referenzspektrum der Zerfallsprodukte am SnO_2-Katalysator bei 250 °C

Tabelle 8: Zerfallsprodukte am SnO_2-Katalysator

Name der Verbindung
Kohlenstoffdioxid
Formaldehyd
Kohlenstoffmonoxid
Methanol
Aceton
Essigsäure
TATP
Essigsäuremethylester

Bei dem SnO_2-Katalysator entstehen die ersten Zersetzungsprodukte erst ab 100 °C und es sind außer den typischen Banden der thermischen Zersetzung keine weiteren Bandengruppen zu beobachten. Aus diesem Grund ist anzunehmen, dass die SnO_2-Probe nur eine geringe katalytische Wirkung zeigt.

Gasphasenreaktionen an Eisen(III)-oxid

Das Mess- und das Referenzspektrum des Fe_2O_3-Katalysators bei 250 °C sind in Abbildung 72 zu sehen. Die identifizierten Zerfallsprodukte sind in Tabelle 9 aufgeführt. Ab 50 °C beginnt der Zerfall von TATP an der Fe_2O_3-Probe. Beim Zerfallsspektrum bei 250 °C ist kein TATP mehr nachweisbar. Zu höheren Temperaturen hin wird eine fas vollständige Mineralisierung des TATPs erreicht.

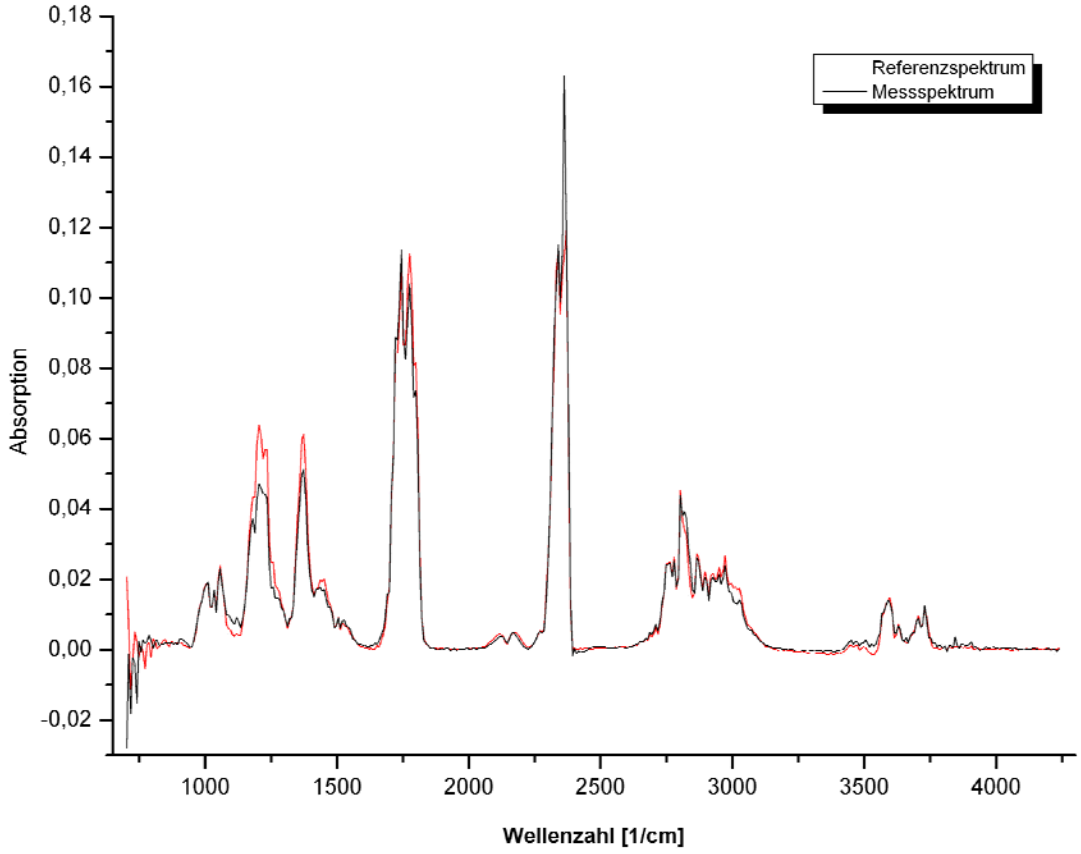


Abbildung 72: Vergleich der Mess- und Referenzspektren des Fe_2O_3-Katalysators

Tabelle 9: Komponenten des Fe_2O_3-Referenzspektrums

Name der Verbindung
Kohlenstoffdioxid
Formaldehyd
Kohlenstoffmonoxid
Aceton
Essigsäure
Essigsäuremethylester
Methanol

Gasphasenreaktionen an Indium(III)-oxid und Kupfer(II)-oxid

Bei der Zersetzung von TATP an den In_2O_3- und CuO-Katalysatoren findet eine tota-

le Zersetzung des TATP statt. Die ab 100 °C bei v=1.740 cm^{-1} sichtbaren Banden sind dem Kohlenstoffdioxid zu zuordnen, während die ab 150 °C bei v=2.360cm^{-1} zu beobachtenden Bandengruppen durch die Carbonyl-Gruppe des Aceton zustande kommen. Die Banden des Acetons gehen bei einer Erhöhung der Temperatur wieder zurück bis sie schließlich nicht mehr nachweisbar sind. Das Aceton wird am Katalysator weiter zu CO_2 zersetzt.

Eine komplette Zersetzung des TATP zu CO_2 fand nur bei der CuO- und der In_2O_3-Probe statt, wobei im Spektrum der In_2O_3-Probe noch Kohlenstoffmonoxid enthalten ist. Die Bandengruppen im Bereich von v=4000 cm^{-1} bis v=3500 cm^{-1} und bei v=1500 cm^{-1} der Messspektren stimmen mit den Banden des Wasserspektrums überein. Trotz der Subtraktion des Wasserspektrums sind immer noch Banden des Wassers sichtbar.

Dieses Phänomen der totalen Zersetzung ist beim CuO-Katalysator verstärkt zu beobachten. Schon im 250 °C-Spektrum ist die vollständige Zersetzung des TATP zu sehen, während dies beim In_2O_3-Katalysator erst ab 300 °C der Fall ist. In Abbildung 73 ist das Spektrum der CuO-Probe bei 300 °C im Vergleich zum CO_2-Literaturspektrum abgebildet.

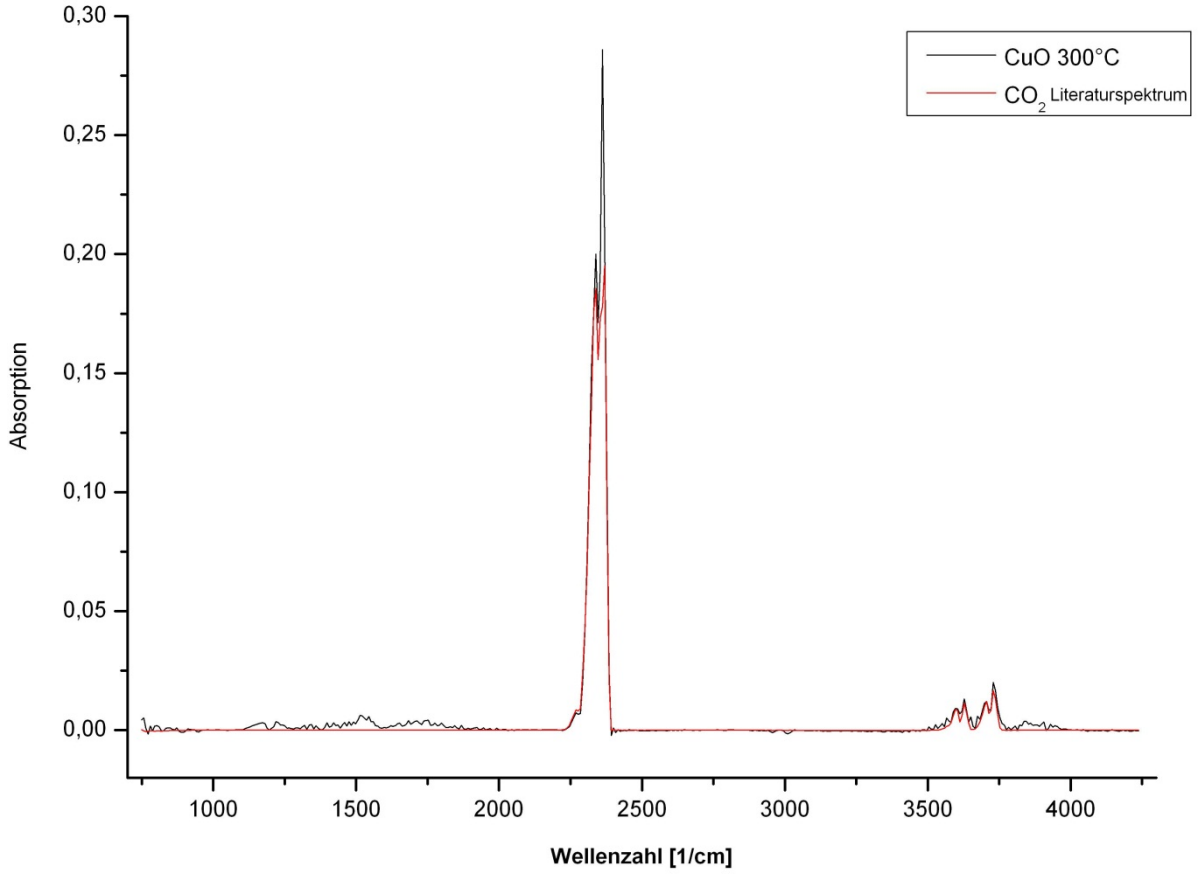


Abbildung 73: CuO-Spektrum bei 300 °C und das angepasste Literaturspektrum von CO_2

Im Gegensatz zur CuO-Probe sind sowohl der Bandenquotient A als auch die spezifische Oberfläche der In_2O_3-Probe (siehe Tabelle 10) viel größer. Die Bandenquotienten der In_2O_3-Messungen von 50 – 200 °C zeigen den langsamen Zersetzungsvorgang des TATP. Ab 250 °C ist das TATP nicht mehr nachweisbar. Es ist anzunehmen, dass das bei den niedrigeren Temperaturen TATP adsorbiert wird. Die große Oberfläche von 2,216 m^2 der In_2O_3-Probe im Reaktor (siehe Tabelle 10) unterstützt diese Theorie. Auf Grund der großen Oberfläche wird mehr TATP adsorbiert als zerfällt, was auf die hohen Bandenquotienten zurück zu führen ist. Bei Erhöhung der Temperatur wird die Desorption begünstigt, bis dann bei 250 °C schließlich alles TATP desorbiert und zersetzt wird. Da die In_2O_3-Probe die größte Oberfläche aller beschichten Kugeln aufweist, ist die komplette Zersetzung des TATP darauf zurück zu führen. Das Spektrum der In_2O_3-Probe bei 300 °C ist in Abbildung 74 im Vergleich zum generierten Referenzspektrum aus den Literaturspektren von CO_2 und CO abgebildet.

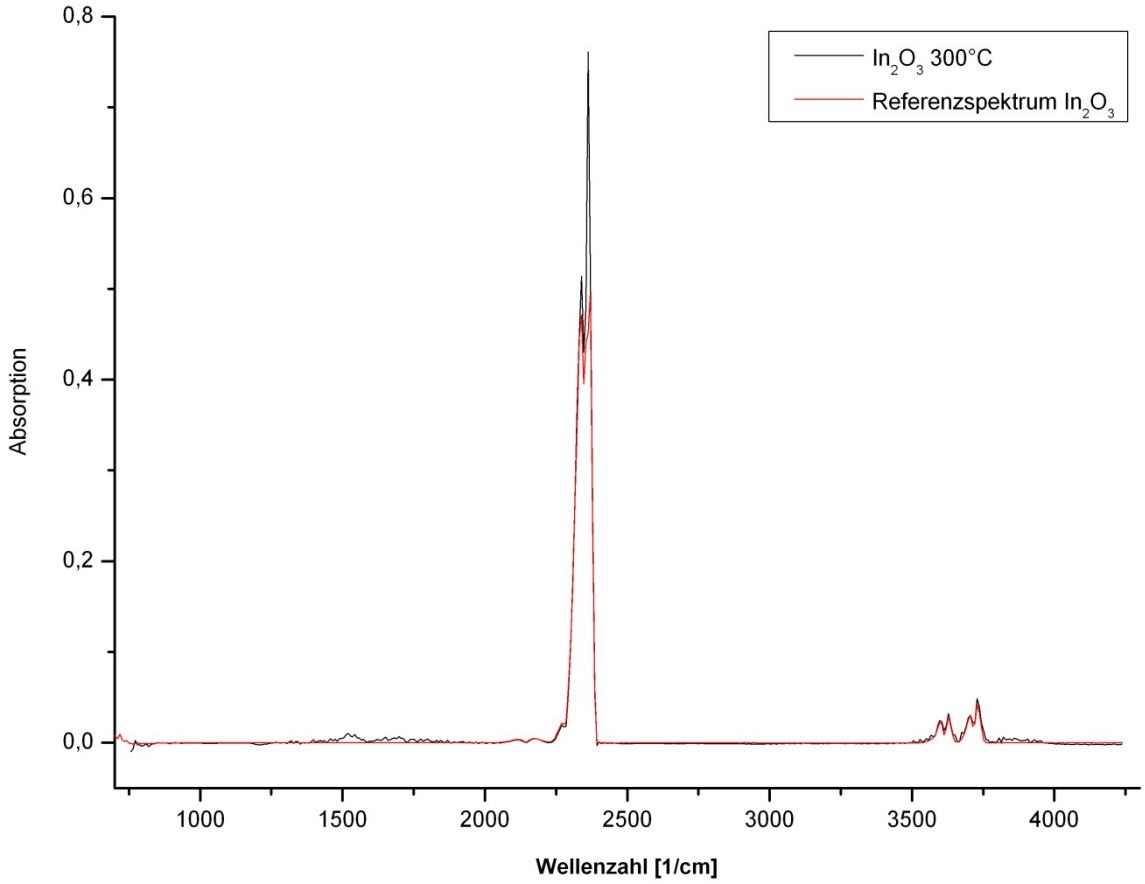


Abbildung 74: In_2O_3-Spektrum bei 300 °C und das zugehörige Referenzspektrum in der Übersicht

An den In_2O_3- und CuO-Katalysatoren fand eine vollständige Zersetzung des TATP statt. Der thermische Zerfall des TATP wird nicht katalysiert. Eine weitere Zersetzung der Zerfallsprodukte wird stattdessen katalysiert, sodass als einzige Zersetzungsprodukte schließlich CO_2 respektive CO_2 und CO bleiben.

Tabelle 10: Bandenquotient im Vergleich mit den Oberflächen der In_2O_3- und CuO-Proben

	In_2O_3-Probe	**CuO-Probe**
Bandenquotient A bei 200°C	2,75	1,19
BET-Oberfläche [m^2/g]	1,859	0,239
Befüllung des Reaktors [g]	1,192	1,292
Tatsächliche Oberfläche der Probe im Reaktor [m^2]	2,216	0,309

Gasphasenreaktionen an Chrom(III)-oxid

Die Zersetzung von TATP am Cr_2O_3-Katalysator beginnt schon bei 50 °C. Das Zerfallsspektrum und das zugehörige Referenzspektrum bei 250 °C sind in Abbildung 75 zu sehen. Die identifizierten Zerfallsprodukte sind in

Tabelle 11 aufgeführt. Ab 50 °C beginnt der Zerfall von TATP an der Cr_2O_3-Probe. Im 250 °C-Spektrum ist kein unzersetztes TATP mehr nachweisbar. Beim Referenzspektrum bei 250 °C fehlen einige Banden im Bereich von v=4000 cm^{-1} bis v=3500 cm^{-1}. Diese stimmen mit den Banden des Wasserspektrums überein. Trotz der Subtraktion des Wasserspektrums sind immer noch Banden des Wassers sichtbar. Auch die Banden im Bereich von v=1500 cm^{-1} des Messspektrums lassen sich dem Wasserspektrum zuordnen. Die genaue Zuordnung ist nicht genau möglich, da Banden verschiedener Zersetzungsprodukte an dieser Stelle ebenfalls zu finden sind.

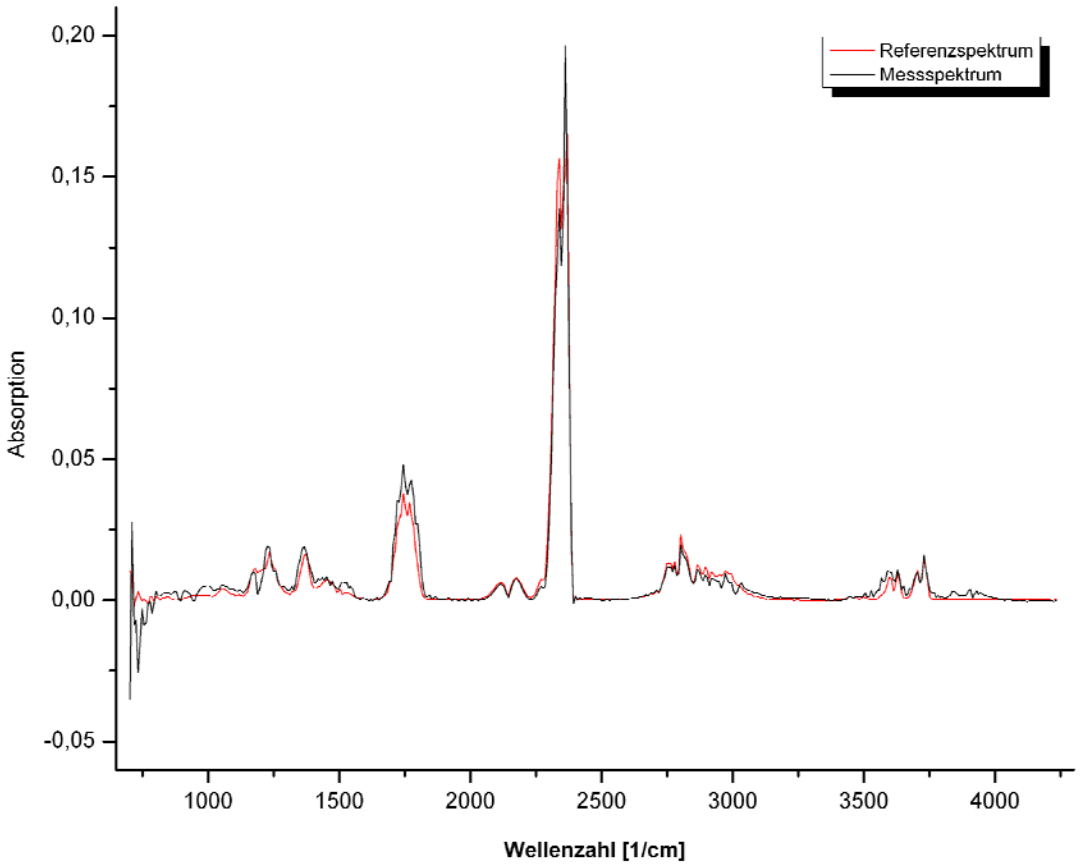


Abbildung 75: Messspektrum bei 250 °C im Vergleich mit dem Referenzspektrum der Cr_2O_3-Probe

Tabelle 11: Komponenten des Cr_2O_3-Referenzspektrums

Name der Verbindung
Kohlenstoffdioxid
Formaldehyd
Kohlenstoffmonoxid
Aceton
Essigsäure
Essigsäuremethylester
Butanon

Gasphasenreaktionen an Wolfram(VI)-oxid und Molybdän(VI)-oxid

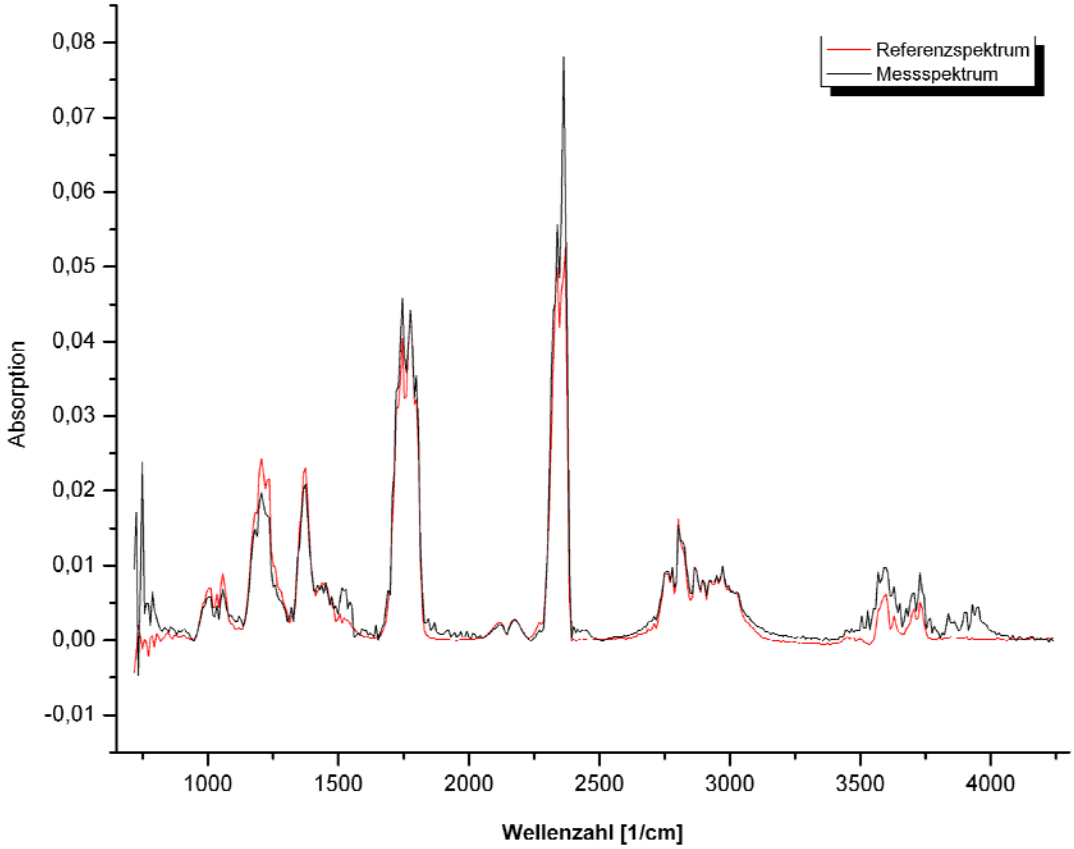


Abbildung 76: Mess- und Referenzspektrum der WO_3-Probe bei 250 °C

Die Zersetzungsspektren an den WO_3- und MoO_3-Proben weisen einige Gemeinsamkeiten auf. Die Zersetzung von TATP beginnt schon bei 50 °C, während bei 250 °C kein TATP mehr vorhanden ist. Außerdem setzen sich beide Spektren aus den gleichen Zersetzungsprodukten (siehe

Tabelle 12) zusammen. In Abbildung 76 ist der Vergleich des Messspektrums des WO_3-Katalysators mit dem zugehörigen Referenzspektrum abgebildet. Die Spektren des MoO_3-Katalysators sind in Abbildung 77 zu sehen.

Auch bei diesen Referenzspektren fehlen Banden im Bereich von v=4000 cm^{-1} bis v=3500 cm^{-1} und bei v=1500 cm^{-1} des Messspektrums. Die Zuordnung dieser Bandengruppen zum Wasserspektrum ist naheliegend, wobei im Bereich von v=1500 cm^{-1} eine Identifikation nicht genau möglich ist. An dieser Stelle sind Banden verschiedener Zersetzungsprodukte erkennbar, wodurch die Bestimmung erschwert wird.

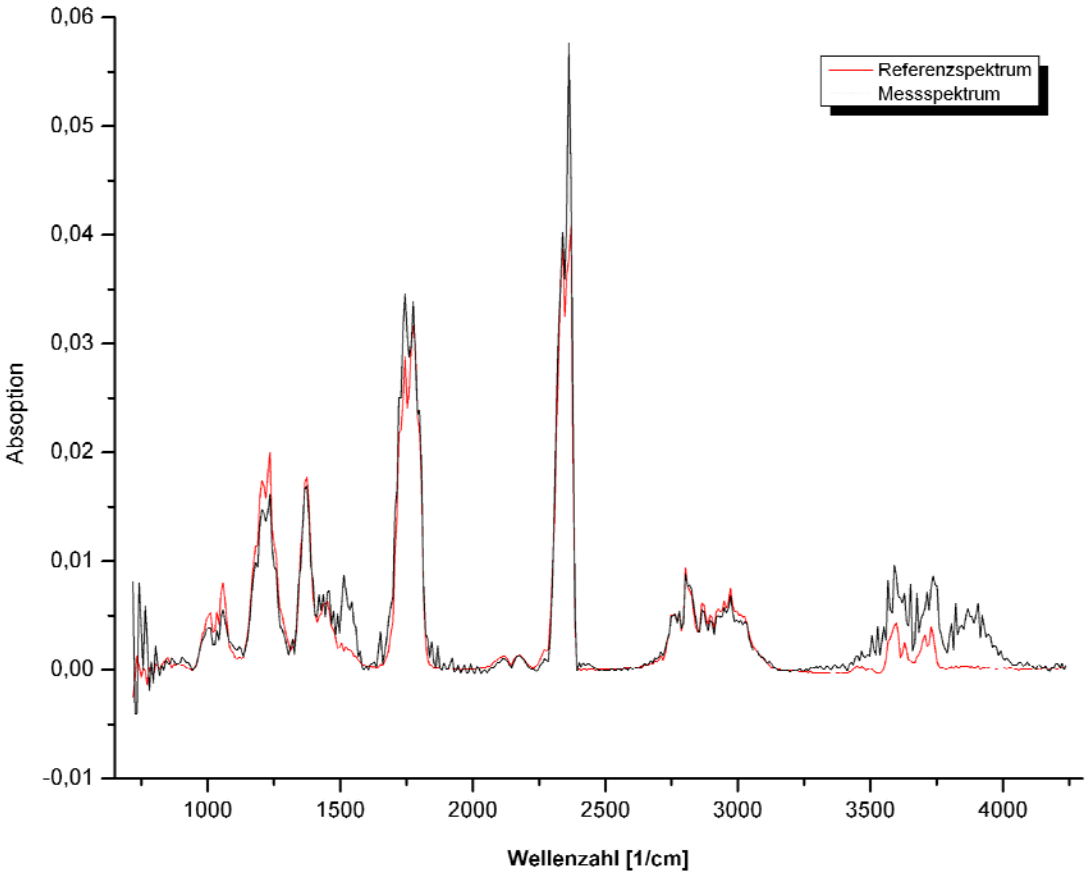


Abbildung 77: Mess- und Referenzspektrum der MoO_3-Probe bei 250 °C

Tabelle 12: Komponenten der WO_3- und MoO_3-Referenzspektren

Name der Verbindung
Kohlenstoffdioxid
Formaldehyd
Kohlenstoffmonoxid
Aceton
Essigsäure
Essigsäuremethylester
Methanol

Zusammenfassung

J.C. Oxley [Oxley2002] nennt Aceton und Kohlenstoffdioxid als die häufigsten Zersetzungsprodukte der thermischen Zersetzung von TATP. Als Nebenprodukte in geringen Mengen treten Essigsäure und Essigsäuremethylester auf. In anderen Quellen werden Ozon und Aceton als Hauptzersetzungsprodukte angegeben [Dobson2010]. Weiter konnten Methanol und Butanon, welche ebenfalls nur in geringen Mengen entstehen sollen, bei der katalytischen Zersetzung an Fe_2O_3 nachgewiesen werden. Weitere Produkte, die identifiziert werden konnten, sind Formaldehyd und Kohlenstoffmonoxid.

In dieser Arbeit wurden Aceton, CO_2 und Formaldehyd als die Hauptzersetzungsprodukte identifiziert. Methanol, Kohlenstoffmonoxid, Essigsäure, Butanon, Essigsäuremethylester und Methylvinylketon wurden nicht bei jedem Versuch und teilweise nur in geringen Mengen nachgewiesen. Dabei wurde Butanon nur bei der Zersetzung am Cr_2O_3-Katalysator festgestellt, während Methylvinylketon nur bei der reinen thermischen Zersetzung an den unbeschichteten Korundkugeln gefunden wurde. Die von J. C. Oxley bestimmten Produkte konnten bei diesen Versuchen erfolgreich bestätigt werden. Eine Abweichung war der Nachweis von Formaldehyd als Zersetzungsprodukt.

Ob ein direkter Vergleich mit den Literaturwerten sinnvoll ist, muss kritisch betrachtet werden. Selbst die reine thermische Zersetzung wurde durch die Oberfläche der Korundkugeln katalysiert. Gerade die In_2O_3- und die SnO_2-Katalysatoren besitzen eine bedeutend größere Oberfläche als die anderen Proben. Dies wirkt sich ebenfalls auf die Ergebnisse der Experimente aus. Die große Oberfläche beschleunigt die Zerfallsreaktion und führt zu einer Zersetzung von TATP bei niedrigeren Temperaturen.

Sowohl Chrom(III)-oxid als auch Wolfram(VI)-oxid und Molybdän(VI)-oxid zeigen eine Reaktion mit TATP schon bei sehr niedrigen Temperaturen. Dieser Fakt ist hervor zu heben, da alle Elemente in der 6. Nebengruppe liegen. Chrom setzt sich in seinen Eigenschaften ab, während Wolfram und Molybdän viele Gemeinsamkeiten haben. Sie besitzen nicht nur die gleiche stabilste Oxidationstufe, sondern haben auch einen nahezu identischen Atomradius. Mögliche Gründe für ihr ähnliches Verhalten in Bezug auf TATP können auf diese Tatsachen zurückgeführt werden. Die Zersetzungsspektren weisen die gleichen Produkte nur in unterschiedlichen Konzentrationen auf.

Im Zersetzungsspektrum von TATP am Fe_2O_3-Katalysator bei 250 °C konnte bei v=2825 cm^{-1} die Bande eines nicht identifizierbaren Zerfallsprodukts gefunden werden.

In Bezug auf die in den Sensorexperimenten gewonnen Erfahrungen zeigen sich Parallelen zum Verhalten der SnO_2 und WO_3 Sensoren. Die rein reduktiven- Reaktionen an SnO_2- Sensoren passen zu dem Zerfallsmechanismus in den Katalysatorexperimenten. Es werden zwar auch an SnO_2 kleinere Fragmentmoleküle gebildet allerdings ist der Anteil an CO_2 immer deutlich höher, was auf eine weitere Zersetzung der Fragmentmoleküle in reduktiven Reaktionen an der Oberfläche schließen lässt. Im Fall des WO_3 dominiert besonders im unteren Temperaturbereich der Zerfall in Fragmentmoleküle und es kommt erst bei höheren Temperaturen zu einer weiteren Zersetzung dieser.

6 Anhänge: Abschlussberichte der Unterauftragnehmer

Schlussbericht Vesper^{Plus}

Unterauftragnehmer GTE Industrieelektronik mbH

I. Kurzdarstellungen

1. Aufgabenstellung

Es soll ein System entwickelt werden, welches Aerosol, ausgehend von einem Brand, in der Umgebung von Ladedecks eines Fährschiffes detektiert und lokalisiert. Das zu entwickelnde System basiert auf einem Laserstrahl, welcher unterhalb der Raumdecke verläuft und von einer gemeinsamen Sende- und Detektionseinheit abgestrahlt wird. Anhand des Rückstreulichtes, welches bei Aufeinandertreffen des Laserstahls auf Aerosole im Raum entsteht, wird auf Anwesenheit von Rauch entschieden. Durch eine ortsaufgelöste Detektion lässt sich auf den Abstand zwischen dem System und der Quelle des Rückstreusignals schließen.

Weiterhin soll das System in der Ebene der Raumdecke geschwenkt werden. Somit wird auf die Rauchverteilung innerhalb des Raums geschlossen.

2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Im Jahre 2011 wurden die Arbeiten am Projekt begonnen, welches durch die GTE Industrieelektronik mbH als Unterauftragnehmer der Hochschule Bonn-Rhein-Sieg im Rahmen des BMBF Forschungsprojekts Vesper^{Plus} bearbeitet wurde. Innerhalb des Unterauftrags wurde für die zu leistenden Arbeiten eine Fertigstellung im Jahre 2013 vereinbart.

Neben den Entwicklungsarbeiten, welche am Standort des Unterauftragnehmers durchgeführt wurden, fanden mehrtägige Messkampagnen auf See und in den Räumlichkeiten der Hochschule Bonn-Rhein-Sieg statt.

3. Planung und Ablauf des Vorhabens

Nach Bewilligung des Vorhabens im Jahre 2011 wurde seitens der GTE Industrieelektronik mbH ein Arbeitsplan für die im Rahmen des Unterauftrags zu leistenden Arbeiten erstellt. Dieser beinhaltet zwei relevante Meilensteine innerhalb des Unterauftrags:

- Fertigstellung der Entwicklungsarbeiten für einen ortsauflösenden Detektor auf Rückstreubasis bis Ende 2012.

- Praxistest des Systems auf See und Anpassung auf die dortigen Umgebungsbedingungen bis Ende 2013.

Zum aktuellen Entwicklungsstand und zur Diskussion der Ergebnisse wurden quartalsmäßig Projektbesprechungen an der Hochschule Bonn-Rhein-Sieg abgehalten.

4. Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Die Detektion von Brandgasen anhand von Streulicht ist die am weitesten verbreitete Methode zur Erkennung von Bränden und findet sich beispielsweise in handelsüblichen Hausbrandmeldern. Ebenso existieren bereits Linearmelder, die meist als Sonderlösung auf spezifische Detektionsanforderungen zugeschnitten sind. Die Prinzipien der Streulichtmessung und des Linearmelders bilden die Grundlage des hier entwickelten Systems.

5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Im Rahmen der Entwicklungsarbeiten wurden Vor- und Abschlussversuche zur ortsaufgelösten Rauchdetektion bis zu einer Entfernung von 40 m zum Detektor an der Hochschule Bonn-Rhein-Sieg durchgeführt. Hier fanden ebenso Diskussionen der Messergebnisse und eine Abstimmung über das weitere Vorgehen statt.

Vorbereitende und abschließende Versuchsreihen wurden auf den Fährschiffen „Mecklenburg-Vorpommern“ sowie „Transrussia“ im Rahmen von gemeinsamen Arbeitskreisen mit allen Projektteilnehmern durchgeführt.

II. Eingehende Darstellungen

1. Erzieltes Ergebnis

Im Rahmen des Forschungsprojekts Vesper^{Plus} wurden von der GTE Industrieelektronik drei Demonstratoren eines linearen Brandmelders mit Namen „SmokeSpot“ entwickelt. Durch die Erfassung des Rückstreulichts eines ausgesandten Laserstrahls ermöglicht dieses System die ortsaufgelöste Detektion der Brandkenngröße Aerosol in Entfernungen von bis zu 40 m zum System. Die Rotation des Systems in der Ebene der Raumdecke durch eine integrierte Drehvorrichtung ermöglicht weiterhin die Überwachung von Flächen.

Die Erfassung der Brandkenngröße Aerosol basiert auf der Streulichtmessung an Partikeln in der Atmosphäre. Hierzu wird ein durch einen Laser emittierter Lichtstrahl

in den freien Raum gestrahlt. Trifft dieser Lichtstrahl auf Aerosole, so wird das Licht in alle Raumrichtungen gestreut.

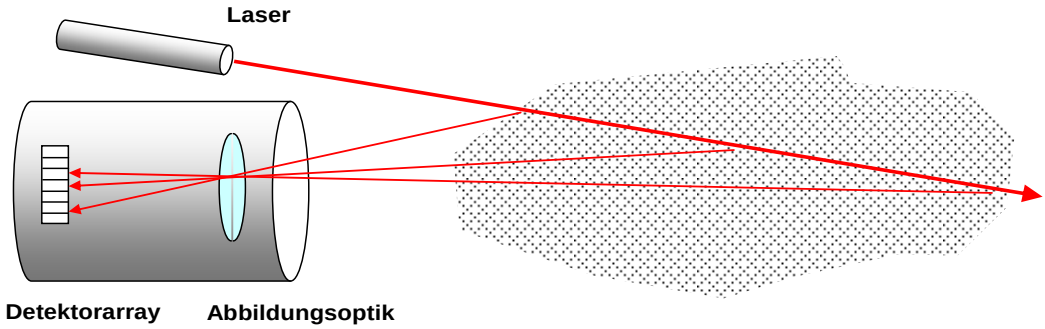


Abbildung 1: Funktionsprinzip

Eine dem System zugehörige Abbildungsoptik fokussiert das rückgestreute Licht auf ein nachgelagertes Detektorarray. Dabei entspricht jedes Segment dieses Arrays einem festen Wegelement entlang des Laserstrahls. Dies ermöglicht eine ortsaufgelöste Angabe zur Rauchverteilung entlang des Laserstrahls. Die maximale Entfernung zwischen Brandkenngröße und Detektor wird bei diesem Messprinzip durch die örtliche Lage des Detektorarrays hinter der Abbildungsoptik bestimmt. Durch Variation dieser Lage kann der Überwachungsbereich für jeden Demonstrator einzeln festgelegt werden. Weiterhin wurden in den drei Demonstratoren Laser unterschiedlicher Laserklasse verbaut. Die hieraus resultierende Variation der Laserleistung hat Einfluss auf den maximalen Überwachungsbereich. Eine Übersicht über die gefertigten Demonstratoren liefert Tabelle 1.

	Demonstrator 1	Demonstrator 2	Demonstrator 3
Laserklasse	3 (10 mW)	3 (10 mW)	2 (1 mW)
Überwachungsbereich	0,2 m bis 5 m	3 m bis 40 m	3 m bis 25 m

Tabelle 1: Eigenschaften der Demonstratoren

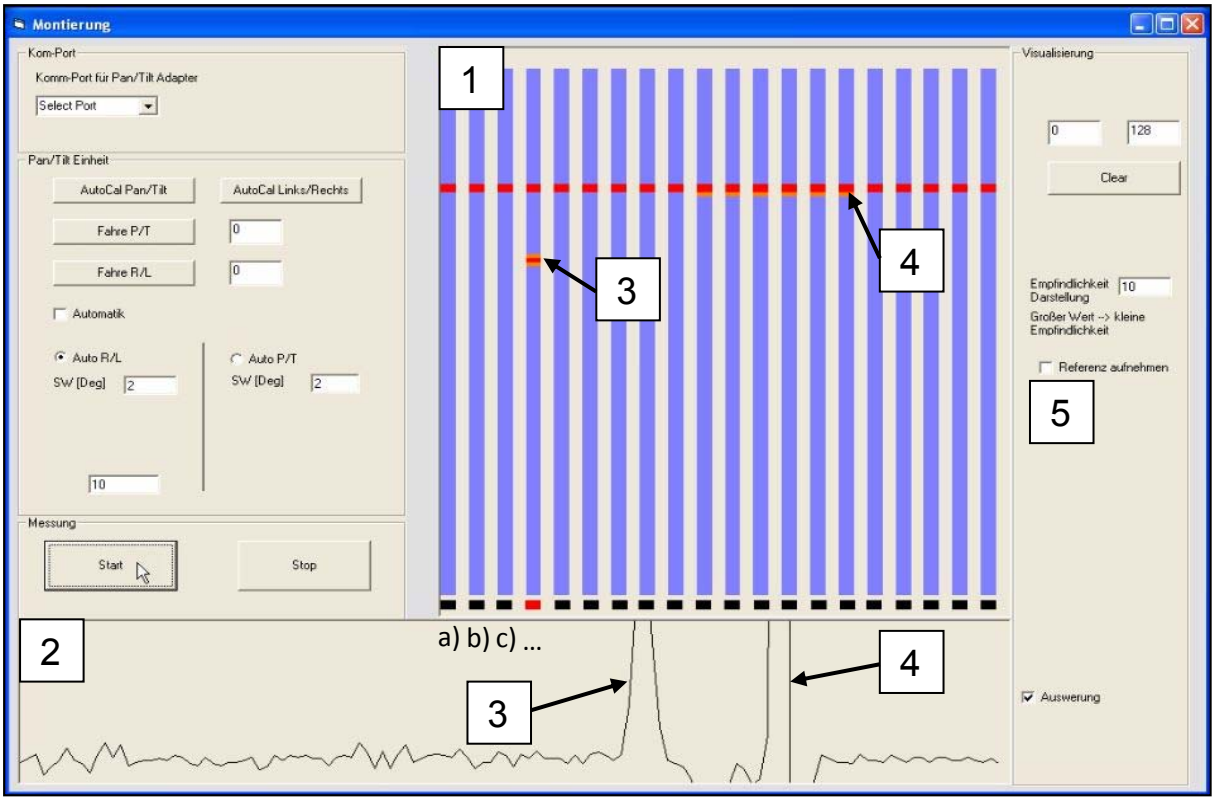


Abbildung 2: Testauslösung Demonstrator 3

Zur Darstellung der Messergebnisse dient ein Softwarepacket Dieses wird in Abbildung 2 dargestellt und beinhaltet eine Visualisierung der letzten 20 Messungen (1). Der Messbereich beträgt, für den hier angeschlossenen „Demonstrator 3“ 3 m (unten) bis 25 m (oben). Die Intensität des rückgestreuten Lichts wird als Colorbar ausgeführt (wenig: lila; viel: rot). Ein Diagramm der aktuellen Messung findet sich unter (2). Hier wird die rückgestreute Leistung dimensionslos über die Messtrecke (linker Rand: 5 m; rechter Rand 25 m) dargestellt. Eine Testauslösung in den Laboren der HBRS ist mit (3) markiert und in beiden Visualisierungsfenstern (1) und (2) deutlich zu erkennen. Der rückgestreute Impuls (4) entsteht durch Reflexion des Laserstrahls an der Wand des Labors und begrenzt die Messstrecke bei etwa 20 m. Durch Verwendung der Option „Referenz aufnehmen“ (5) kann die Geometrie des Betriebsortes einmalig vermessen werden. In diesem Fall wird die Auswertung von Rückstreupulsen, bedingt durch Objekte im Strahlengang des Lasers, unterdrückt.

Im gezeigten Versuch wurde der Melder statisch betrieben. Darüber hinaus ist eine Drehung des Melders um die eigene Achse möglich, sodass der Überwachungsbereich von einer (eindimensionalen) Linie auf eine (zweidimensionale) Fläche ausgedehnt wird. In diesem Fall zeigt die Visualisierung (1) ein Raumprofil. Abbildung 3 zeigt schematisch den Zusammenhang zwischen Visualisierung (1) a), b), c) und dem rotierenden Messmodus.

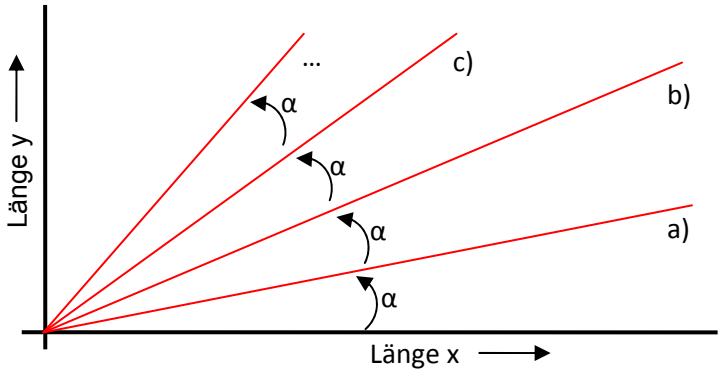


Abbildung 3: Schema Flächenüberwachung

Hierbei beschreiben die roten Linien den Messbereich pro Winkelposition, ausgehend vom Melder im Nullpunkt. Dieser wird nach jeder Messung um den Winkel α gedreht.

Einfluss der Laserklasse

Aufgrund der geltenden Sicherheitsvorschriften ist ein Betrieb ohne weitere Schutzmaßnahmen ausschließlich für Laser der Klasse 2 gestattet. Zur Evaluation der Leistungsfähigkeit von Lasern der Klasse 2 durchgeführte Laborversuche zeigen, dass der Überwachungsbereich des Systems mit Lasern der Klasse 2 im Vergleich zu Lasern der Klasse 3 um etwa 50 % abnimmt. Weiterhin sinkt die Intensität des detektierten Rückstreulichtes an Prüfaerosol um den Faktor sechs (siehe Abbildung 3). Somit lässt sich mit Demonstrator 2 eine sechsfach geringere Konzentration an Prüfaerosol detektieren als mit Demonstrator 3. Hieraus resultiert eine zeitlich frühere Branderkennung durch Demonstrator 2.

Demonstrator 3 – Laserklasse 2

Demonstrator 2 – Laserklasse 3

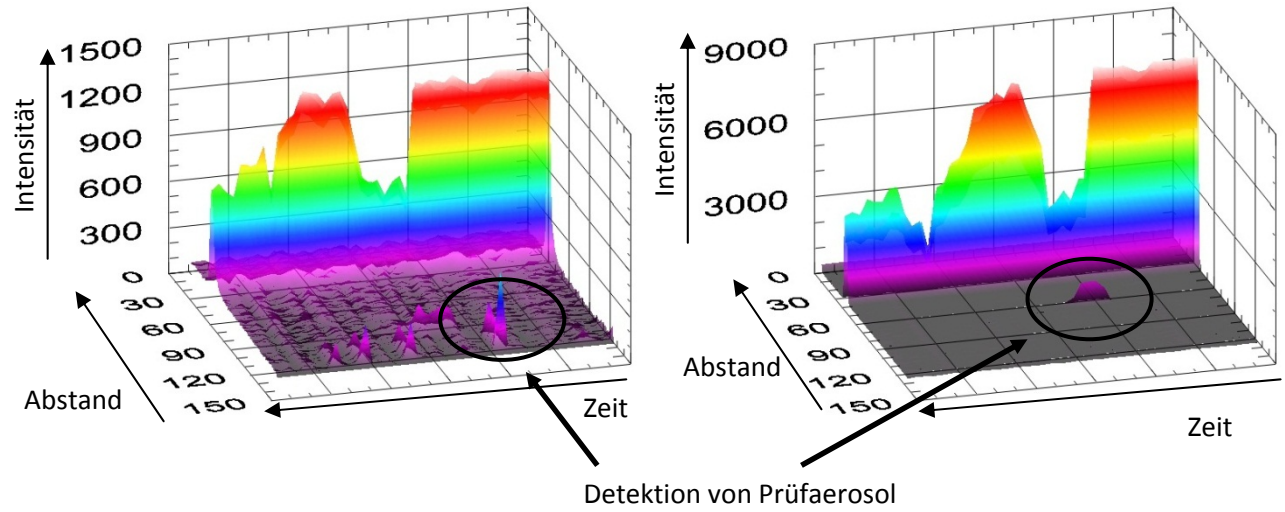


Abbildung 4: Vergleich unterschiedlicher Laserklassen

Praxistauglichkeit auf See

Im Rahmen der Feldversuche auf dem Fährschiff „Transrussia“ wurde Demonstrator 3 auf seine Praxistauglichkeit hin überprüft.

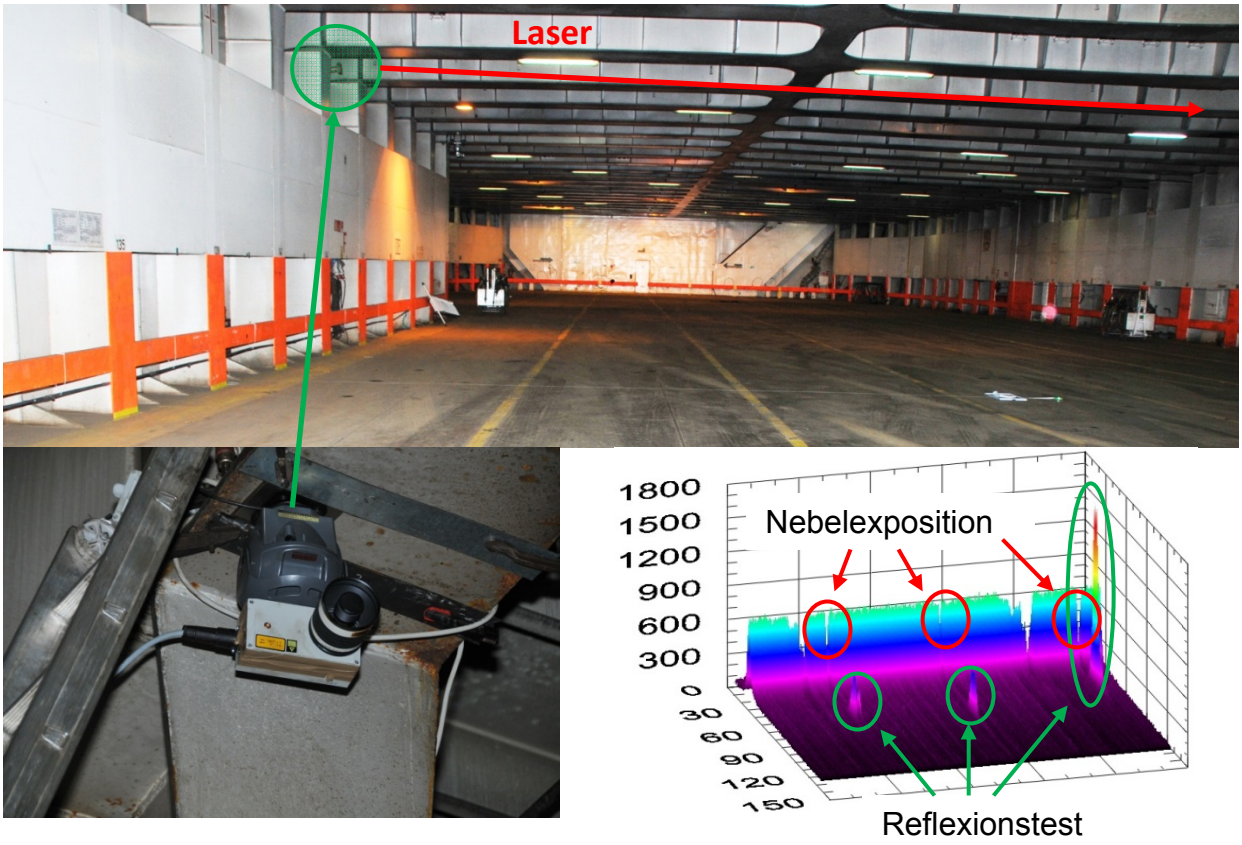


Abbildung 5: Praxisversuch Transrussia

Abbildung 5 zeigt den Testaufbau auf einem Ladedeck des Fährschiffes (oben, links unten). Die Ergebnisse einer Versuchsreihe sind im rechten unteren Bild dargestellt. Hier beschreiben die mit „Nebelexposition“ markierten Positionen die Abschwächung des Endreflexes während eines Rauchversuchs. Aufgrund der geringen Ausgangsleistung des Klasse 2 Lasers konnte das am Prüfrauch rückgestreute Licht nicht erkannt werden. Somit war eine Branderkennung mit dem gewählten Aufbau möglich, jedoch nicht ortsaufgelöst.

Um die Funktionsweise des Gerätes zu prüfen, wurden im Anschluss an die Rauchversuche Objekte im Strahlengang platziert. Die Rückstreuung an diesen Objekten konnte ortsaufgelöst erkannt werden (Abb. 4 rechts unten; Reflexionstest).

Abbildung 6 zeigt den Intensitätsverlauf des Endreflexes während eines Langzeittest auf der „Transrussia“. Es ist zu erkennen, dass die Intensität am Detektion stetig abnimmt. Dies ist auf eine Verschiebung der optischen Komponenten im Mikrometerbereich aufgrund der an Board vorherrschenden Vibrationen zurückzuführen.

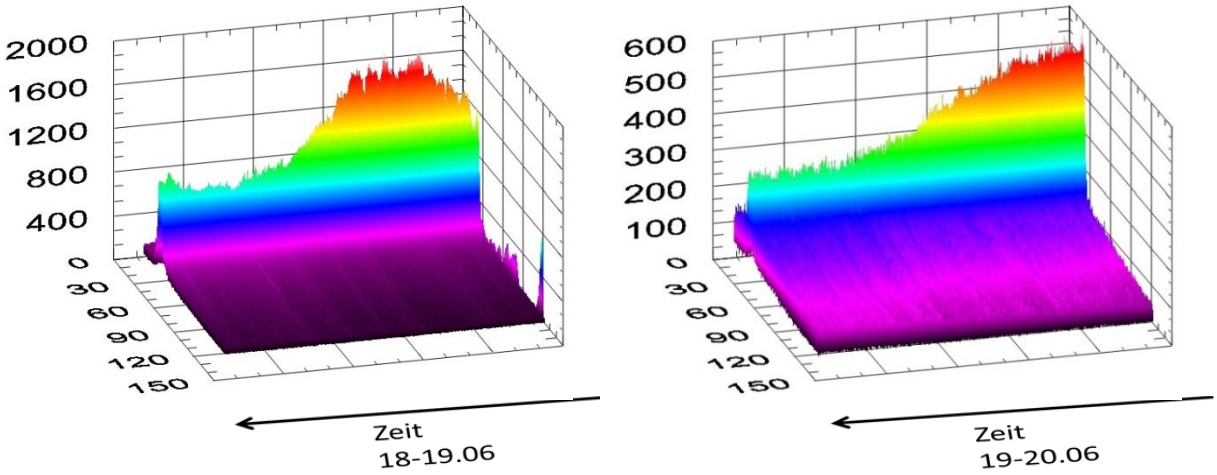


Abbildung 6: Langzeitverlauf der Intensität

Die Ergebnisse der Versuche auf See zeigen, dass das System bezüglich mechanischer Stabilität sowie Auflösung optimiert werden kann.

Ein Test des Systems mit Laserklasse 3 auf See war aufgrund der geltenden Sicherheitsvorschriften nicht möglich.

2. Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

Die erzielten Messergebnisse zeigen Potenziale und Grenzen der betrachteten Technologie. Insbesondere die Ergebnisse der Messkampagne auf See ermöglichen eine gezielte Optimierung des Brandmelders für den Einsatz unter rauen Umgebungsbedingungen. Diese findet im Nachgang zum Förderprojekt Vesper^{Plus} statt.

3. Während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordenen Fortschritts auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Es sind keine Neuentwicklungen bei linearen Brandmeldern bekannt.

4. Erfolgten oder geplanten Veröffentlichungen des Ergebnisses

Veröffentlichungen sind nach Erreichen der Marktreife geplant.

gefördert vom
Bundesministerium für Bildung und Forschung

Millimeter-Wellen Radar-basierter Kofferscanner bei 80 GHz als Experimentalsystem zum Einsatz bei VESPER^{Plus}

Maxonic® GmbH i.L., Heinrich-Hertz-Str. 6, 34123 Kassel

Microwave Applications for Professionals

Endberichtbericht 07/2014
Unterauftrag der Hochschule Bonn-Rhein-Sieg vom 01.06.2012
Ansprechpartner: Professor Dr. Peter Kaul

Maxonic GmbH i.L.
Heinrich-Hertz-Str. 6
34123 Kassel
Germany

Phone.: 0049 561 998 1764
E-Mail: rahmi.salman@hubner-germany.com

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung und Aufgabenstellung 3

2. Ausgangsposition und Verlauf des Vorhabens 4

2.1 Verlauf des Vorhabens 5

3. Wesentliche Ergebnisse 8

3.1 System-Design 8

3.2 Algorithmus zur Bildgebung 9

3.2.1 Beispielergebnisse 11

4. Besondere Merkmale von Millimeter-Wellenbildern 13

4.1 Einfluss der Objektgeometrie 13

4.2 Einfluss des Dynamikbereiches 14

4.3 Einfluss der Systemkonfiguration 14

4.4 Einfluss der Betriebsfrequenzen 15

5. Testobjekte und Gepäckstücke 16

6. Ergebnis 18

7. Zusammenfassung 19

8. Ausblick und Empfehlungen für zukünftige Vorhaben 20

9. Konzept für eine mittelfristige Integration in den Hafenbetrieb 21

10. Wirtschaftliche Verwertungsansätze 22

Anhang A, Ergebnisse - Referenz, ohne Gepäckstück 24

Anhang B, Ergebnisse - Hartschalenkoffer 25

Anhang C, Ergebnisse - Trolley (Polycarbonat) 26

Anhang D, Ergebnisse - Rucksack 27

Anhang E, Ergebnisse - Baumwolltüte 28

MATLAB Source Code 29

Literaturverzeichnis 30

Anhang F, Projektzwischenbericht 01/2013 33

1. Einleitung und Aufgabenstellung

Eine berührungslose und zerstörungsfreie Untersuchung bzw. Durchleuchtung des Inneren von geschlossenen Behältnissen wie Paketen, Gepäckstücken und anderen nicht metallischen Objekten ist in vielen sicherheitskritischen Bereichen, beispielsweise Häfen, Flughäfen, oder Bahnhöfen unverzichtbar. Um beurteilen zu können, ob der Inhalt eines Gepäckstückes gefährliche Objekte wie Waffen oder Sprengstoffe enthält oder sich von den Angaben in den Unterlagen unterscheidet, wäre es wünschenswert, die im Gepäckstück enthaltenen Gegenstände bildhaft darzustellen. Als besonders vorteilhaft gilt eine 3-dimensionale (3D) Darstellungsweise, weil damit auch ungünstig liegende oder sich gegenseitig verdeckende Objekte zuverlässig identifiziert werden können. Eine besondere Bedeutung kommt dabei der Detektion von metallischen oder dielektrischen Gegenständen mit hoher Permittivität zu, da diese ein besonderes Gefährdungspotenzial haben können. Insbesondere ist das der Fall, wenn die verdächtigen Materialien eine waffenähnliche Geometrie und Kontur besitzen.

Nach dem allgemeinen Stand der Technik kommen in solchen sicherheitsrelevanten Szenarien induktionsbasierte Metalldetektoren, röntgenbasierte Geräte zur Bildgebung oder chemische Sensoren zum Einsatz. Sowohl Metalldetektoren als auch chemische Sensoren extrahieren nicht die Geometrie oder Kontur eines Objektes, sondern liefern lediglich eine quantitative Aussage darüber, ob Metall oder eine spezifische Substanz vorhanden ist. Röntgenbasierte Systeme arbeiten mit ionisierender Strahlung, die erhebliche systemtechnische Maßnahmen (aufwendige Abschirmung des Gerätes) als auch personelle Maßnahmen (Anwesenheit eines Strahlenschutzbeauftragten) erfordern. Ein gesundheitsschädliches Restrisiko für das Personal bleibt dennoch weiter vorhanden, wegen z.B. möglicher Fehlbedienung oder des Versagens der Schutzvorrichtungen.

Ziel des Forschungs- und Entwicklungsvorhabens **„Untersuchungen mit einem radarbasierten 3-D-Scanner im Rahmen VESPER^{Plus}“** ist es, eine neuartige Möglichkeit für eine ungefährliche und berührungslose Abbildung des Inneren eines geschlossenen nicht metallischen Behältnisses zu untersuchen. Da es sich im Rahmen von VESPER^{PLUS} um die Sicherheit im Hafenbetrieb und hier insbesondere um Reisegepäckstücke handelt, soll das System Inhalte detektieren, die in ihrer Geometrie und Beschaffenheit von typischem Reisegepäckgut abweichen.

Dabei sollen spezifisch die Möglichkeiten untersucht werden, die ein ultra-breitbandiges Millimeter-Wellen Radar (UWB-Radar, *engl.* ultra-wideband Radar) für die angesprochene Anwendung bietet. UWB-Radar bietet aufgrund seiner immensen absoluten Bandbreite (für gewöhnlich mehrere GHz) eine sehr feine zeitliche Auflösung in radialer Richtung, da diese invers proportional zur Bandbreite ist. Durch die hohen Arbeitsfrequenzen (typisch 24 – 220 GHz) ist die Antennenhauptkeule sehr schmal, was mit einer hohen lateralen Auflösung korrespondiert. Diese kann in der Signalnachverarbeitung durch SAR-Techniken (SAR, *engl.* synthetic aperture Radar) weiter verbessert werden, indem durch Antennenbewegung eine synthetische Apertur erzeugt wird; die finale Bildgebung ist hierbei unabhängig davon, ob es sich um eine reelle oder synthetische Apertur handelt. Auch eine Penetration von dielektrischem Material ist möglich, wobei die Dämpfung zu höheren Frequenzen zunimmt, was wiederum einen erhöhten Dynamikbereich des Systems erfordert.

Die Eigenschaft der geringen Emission (30 dB weniger als ein UMTS Mobiltelefon) gekoppelt mit der nicht ionisierenden Eigenschaft und der Fähigkeit dielektrische Materialien zu penetrieren, prädestiniert UWB-Radar für sicherheitsrelevante Szenarien. Eine breite wissenschaftliche Untersuchung wurde besonders im letzten Jahrzehnt für derartige Szenarien intensiviert (Detektion, Klassifikation, Lokalisation, Bildgebung, Tracking etc.) und Forschungsergebnisse publiziert, jedoch gibt es in der Literatur bis zum Start von VESPER^{PLUS} keine experimentell validierten Untersuchungen zum Ausleuchten von Reisegepäckstücken.

2. Ausgangsposition und Verlauf des Vorhabens

Die in diesem Endbericht aufgeführten Erkenntnisse und Ergebnisse knüpfen an den Stand des Vorhabens zum Zwischenbericht 01/2013 und die darauffolgende Entwicklungszeit an. Wie auch dem Zwischenbericht zu entnehmen ist, waren zum damaligen Zeitpunkt folgende Leistungen erbracht:

- Die Spezifikationen des Radarmoduls inkl. des Hochfrequenz (HF) Front-Ends, der A/D Wandlung und des digitalen Back-End waren festgelegt und in das Gesamtsystem integriert.

- Die motorbetriebenen Lineareinheiten für die vertikalen und horizontalen Bewegungen des Radars und die Integration in eine Hardwareeinheit waren erfolgt. Die dazugehörige Programmierung eines FPGA für die Steuereinheit der Lineareinheiten war ebenfalls erledigt. Es stand eine GUI (GUI, engl. graphical user interface) Software in LabView zur Verfügung, mit der man Scanmuster (Antennenbewegungen inkl. Mes-

sung) für automatisierte Messungen programmieren konnte. Diese Entwicklungen wurden in Kooperation mit dem Max-Planck-Institut Bonn erledigt.

- Notwendige HF Entwicklungen zur Anpassung des Radarmoduls an das Gesamtsystem wie etwa die Entwicklung der Hornantenne, Koppler und Frequenzvervielfacher waren abgeschlossen und in das System integriert.

- Ein rudimentäres off-line Auswerteprogramm zur Bildgenerierung aus den Radardaten wurde in Kooperation mit der Goethe Universität Frankfurt am Main entwickelt und für erste Tests in Betrieb genommen.

Zum Zeitpunkt 01/2013 war die Hardware noch nicht vollständig implementiert, da noch die Mischerstufe des Empfängers fehlte. Die Entwicklung eines vollständig lauffähigen, jedoch dezentralisiert und nicht echtzeitfähigen Systems erfolgte kurze Zeit später, so dass alle Hardwarekomponenten (Radarmodul, HF Bauteile, Motorsteuerung und Datenakquise) in ein Gesamtsystem integriert waren.

Aufgrund eines sehr tragischen Umstandes im Sommer 2013 gab es einen mehrmonatigen Stillstand des Projektes. Die Umstände erschwerten sich zusätzlich, da kein geeigneter Mitarbeiter mit einer den hohen Anforderungen des anspruchsvollen Vorhabens genügenden Expertise zur Verfügung stand. Erst zum Januar 2014 wurde mit Rahmi Salman ein erfahrener Ingenieur gefunden, der sich zuvor über sechs Jahre in der Erforschung von hochaufgelösten breitbandigen Radarsystemen eine ausgewiesene Reputation erarbeitet hatte.

2.1 Verlauf des Vorhabens

Die im vorherigen Abschnitt skizzierte Sachlage beschreibt den Stand des Vorhabens zum Januar 2014, auf welchem aufgebaut und die restlichen noch ausstehenden Entwicklungen erbracht wurden.

Die Vorraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde, sind Laborbedingungen bedingt durch den Innovationsgehalt des Vorhabens - es gibt keine derartigen oder ähnlichen Radarsysteme auf dem Markt für den Endkunden, die mit breitbandiger Millimeter-Wellenstrahlung den Inhalt verschlossener Behältnisse berührungslos und zerstörungsfrei inspizieren. Diese Applikation ist ganzheitlich (Signalverarbeitung, HF Komponenten, Systemdesign etc.) immer noch Bestandteil hochaktueller Forschung [1][2][3][4][5].

Obwohl es sich beim Demonstrator um einen Betrieb unter Laborbedingungen handelt, ist der entwickelte und in diesem Bericht vorgestellte Prototyp nicht beschränkt auf Laborumgebungen. Von den Dimensionen ist der Kofferscanner weder sperrig, noch braucht er beson-

dere Anschlüsse außer einem gewöhnlichen 230 V Anschluss. Die Steuerung der Motoren, die Datenakquise und die Auswertung bzw. Bildgenerierung erfolgt mit einem handelsüblichen Laptop. Systemtheoretisch handelt es sich bei dem Kofferscanner um ein lineares zeit- und ortsinvariantes System. Angesichts dieser Merkmale ist der Einsatz des Kofferscanners an beliebigen Orten unter Einhaltung simpler gängiger Schutzmaßnahmen für elektronische Geräte (Schutz vor Feuchtigkeit, massiven Staub etc.) möglich. Damit auch z.B. bei der Gepäckkontrolle im Hafenbetrieb, z.B. in einem Gebäude oder auf der Ladefläche eines LKWs. Wie bereits erwähnt, sind aufgrund der geringen elektromagnetischen Emission und der ungefährlichen nicht-ionisierenden Strahlung weder besonders geschulte Sicherheitsbeauftragte noch Betriebslizenzen notwendig. In Anbetracht dieser Umstände, sollte das Konzept der Integration eines routinemäßigen bildgebenden Systems mit einem Millimeter-Wellen Radarsystem in den Hafenbetrieb mit geringem Aufwand verbunden sein. Eine stationäre Örtlichkeit (separater Raum) oder eine mobile Station (Bspw. auf der Ladefläche eines Transporters zum Schutz vor Regen) nach der Gepäckabgabe reichen, um einen Kofferscanner in Betrieb zu nehmen.

Bei den wesentlichen Weiterentwicklungen des Systems nach dem Stand des Zwischenberichtes handelt es sich um:

1. **Reduzierung des Datenvolumens**
   Effizienz- und Performancesteigerungen hinsichtlich der Echtzeitfähigkeit. Für diesen Zweck wurde die Steuerung des Radarmoduls, welches in MATLAB programmiert ist, akribisch analysiert, Redundanzen festgestellt und die Signalverarbeitung des Radarmoduls auf ein Minimum mit vernachlässigbaren Einbußen bei der Bildgenerierung reduziert. Dadurch konnte das Datenvolumen um etwa den Faktor 10 drastisch reduziert werden. Eine zeitabhängige Radarmessung, welche in diesem Fall der Impulsantwort *h(t)* des Radarkanals entspricht, ist nun etwa 15 KB groß, womit auch die Rechenlast der nachfolgenden Bildgenerierung verringert wurde.

2. **Effizientere Bildberechnung**
   Die nachfolgende Bildgenerierung wurde mittels eines Migrationsverfahrens erzeugt. Die Erzeugung eines Millimeter-Wellenbildes durch Migration basiert auf der Lösung eines inversen Problems; es wird versucht das Szenario aufgrund der veränderten Wellenausbreitung nach der Interaktion mit dem Medium zu rekonstruieren, d.h. die kausale Kette von Ursache und Wirkung zu invertieren. Ein maschineneffizienter Algorithmus zur Berechnung des Bildes wurde implementiert.

3. **Echtzeitfähigkeit des Systems**

   Aufgrund der in den beiden vorherigen Punkten genannten Maßnahmen konnte eine Echtzeitfähigkeit des Systems erreicht werden. Zum Stand des Zwischenberichtes wurde die Motorbewegung alle 3 mm gestoppt um eine Messung zu machen und um anschließend dieses Muster auf der gesamten Messstrecke zu wiederholen. Eine rechenintensive Bildberechnung erfolgte off-line im Anschluss. Der sehr zeitaufwändige Wechsel von Anfahren und Abbremsen der Motoren konnte ersetzt werden mit einer konstanten Fahrt der Motoren und gleichzeitiger Aufnahme der Daten. Vom Start bis zum Ende einer Strecke werden sukzessive Messungen mit einer Pulswiederholfrequenz von etwa 8 Hz gemacht. Dabei ist die Geschwindigkeit der Motoren der Parameter, der dem Benutzer zur Verfügung steht und mit dem die Systemeffizienz gesteuert wird - je langsamer sich die Lineareinheiten bewegen, desto mehr Messungen können auf gleicher Strecke gemacht werden (höhere Datenrate) und desto kontrastreicher und genauer wird das resultierende Millimeter-Wellenbild.

Die wesentliche Grundlage für die erhöhte Leistungsfähigkeit und die Echtzeitfähigkeit des Systems ist die einheitliche Integration aller Signalverarbeitungsschritte (Motorsteuerung, Datenakquise, Bildgenerierung) in MATLAB als eine zentrale und untereinander synchronisierte Plattform. Zum Stand des Zwischenberichtes wurden noch alle Verarbeitungsschritte dezentral und asynchron ausgeführt. In folgender Abbildung ist der Sachverhalt des Entwicklungsfortschrittes illustriert:

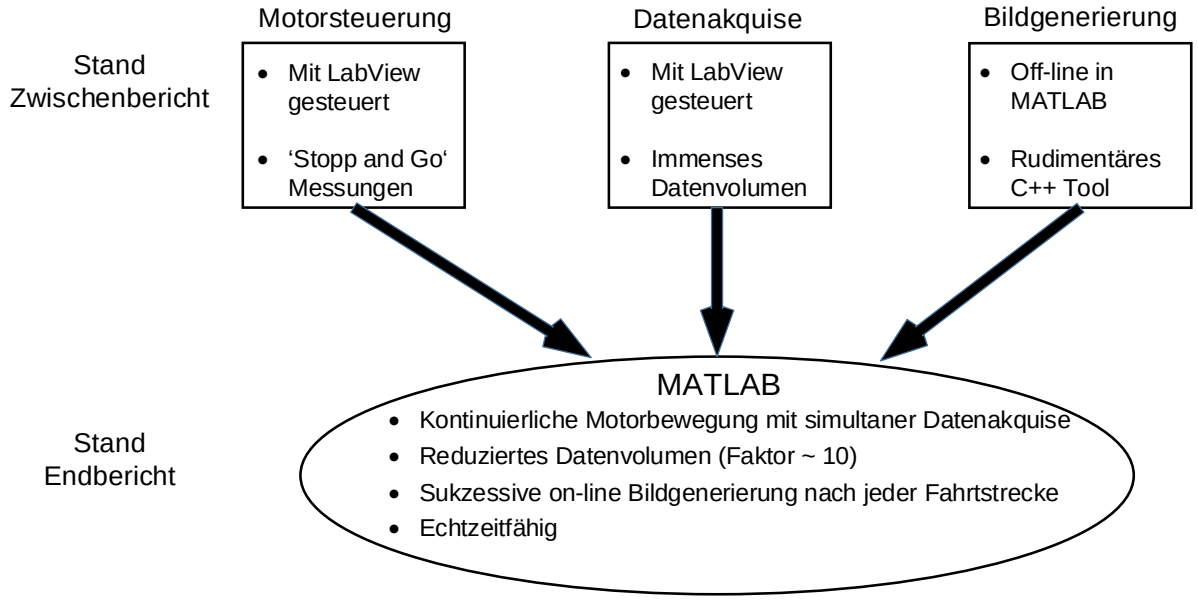


Abbildung 1:Systemintegration in eine ganzheitlich synchrone MATLAB Plattform.

3. Wesentliche Ergebnisse

Im Folgenden sollen die wesentlichen Ergebnisse des Kofferscanners eingehend dargestellt werden. Hierbei ist insbesondere das Bildgebungsverfahren der wesentliche Aspekt dieses Vorhabens. Eine echtzeitfähige Implementierung des Bildgebungsalgorithmus basierend auf die Kirchhoff Migration [6] sowie die Integration in das Gesamtsystem sollen in diesem Abschnitt erläutert werden.

3.1 System-Design

Das elektromechanische System des Kofferscanners basiert auf einen Aufbau von zwei Linearantrieben, die jeweils eine horizontale und vertikale Bewegung des Radarmoduls erlauben. Dies ist notwendig, damit das Gepäckstück aus verschiedenen Perspektiven beleuchtet bzw. vermessen werden kann. Systemtheoretisch ist dieser aus der klassischen Radartechnik bekannte SAR-Ansatz notwendig, da aufgrund der beschränkten realen Apertur der Antenne eine größere synthetische Apertur durch Bewegung synthetisiert werden kann [7]. Hierdurch wird die laterale Auflösung (Auflösung in der Ebene orthogonal zur Blickrichtung) des Systems wesentlich erhöht, da diese invers proportional zur Apertur ist, unabhängig davon ob diese real oder synthetisch ist [8]. Wie bereits im vorherigen Kapitel beschrieben, erfolgt die Antennenbewegung kontinuierlich mit simultaner sukzessiver Radarmessungen (Pulswiederholfrequenz ~ 8 Hz). Der Antennenpfad ist mäanderförmig mit einem Abstand von 0.5 cm zwischen 2 horizontalen Pfaden. Ein CAD-Modell und das Prinzip des Messvorganges ist in Abbildung 2: illustriert.

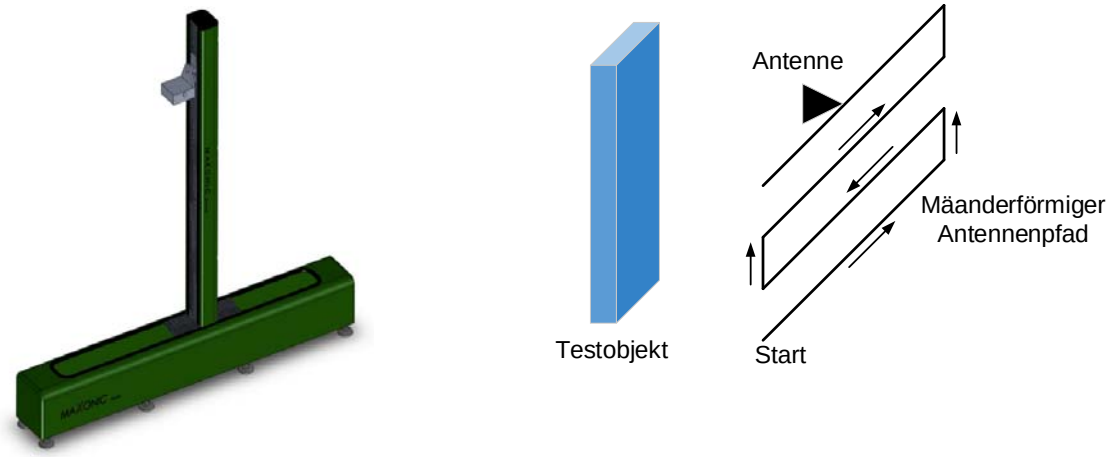


Abbildung 2: Das CAD-Modell des Kofferscanners (links) und die Messstrategie (rechts), um die synthetische Apertur aufzuspannen.

Die on-line Bildgenerierung erfolgt nach jedem horizontalen Pfad und vor der vertikalen Bewegung in die nächste Höhenstufe. Da bedeutet, dass das Radarbild nach jedem horizontalen Scan aktualisiert wird und sich in dieser Weise sukzessive aufbaut.

3.2 Algorithmus zur Bildgebung

Die Errechnung des Bildes geschieht mit einem migrationsbasierten Algorithmus [9]. Die Ursprünge dieser Methode liegen in im Bereich der Geophysik und Seismik, wo ab den 60er Jahren Abbildungen aus dem Erdinneren mittels Schallwellen und später elektromagnetischer Wellen generiert wurden [10][11]. Mathematisch basiert der Algorithmus auf die Lösung eines Oberflächenintegrals, das mittel des Helmholtz-Kirchhoff Theorem evaluiert wird [12]. Um nicht den Rahmen diesen Berichtes zu sprengen und nicht zu sehr in die theoretische Mathematik abzudriften, soll im folgenden der in diesem Vorhaben abstrahierte und dem System angepasste Algorithmus vorgestellt werden.

Wie alle migrationsbasierte Algorithmen ist die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Welle als a priori Information notwendig. Im Fall von elektromagnetischen Wellen in der Luft entspricht diese der Lichtgeschwindigkeit $c_0 = 2.997925 \cdot 10^8 \,\mathrm{m/s}$. Die Antennenpositionen, in denen die Messungen aufgezeichnet worden sind, müssen ebenfalls als a priori Information zur Verfügung stehen. Trivialerweise reichen hier bei bekannter Bewegung die relativen Positionen der Messpunkte, die zur Startposition in Relation stehen. Angenommen sei das in Abbildung 3 skizzierte Szenario. Der Teil des Raumes, den man abbilden möchte, liege im 3D Fall diskret als Raumvolumen bzw. als einzelne Voxel (Volumenpixel) $o(x, y, z)$ vor. Ein Antennenpfad bei der die Antenne auf das Raumvolumen ausgerichtet ist, führt am Raumvolumen vorbei und führt sukzessive N Messungen aus. Aufgrund des ultra-breitbandigen Spektrums handelt es sich bei den Messungen mit guter Näherung bei der $n-\mathrm{ten}$ Position um die $n-\mathrm{te}$ Kanalimpulsantwort $h_n(t)$ mit $n = 1 \cdots N$. Aufgrund der hohen zeitlichen Auflösung drückt die Variable *t* die Verzögerungszeit der elektromagnetischen Welle aus, die sich mit c_0 ausbreitet. Die Variable n steht für die zeitlich-örtliche Varianz des Kanals aufgrund der Bewegung.

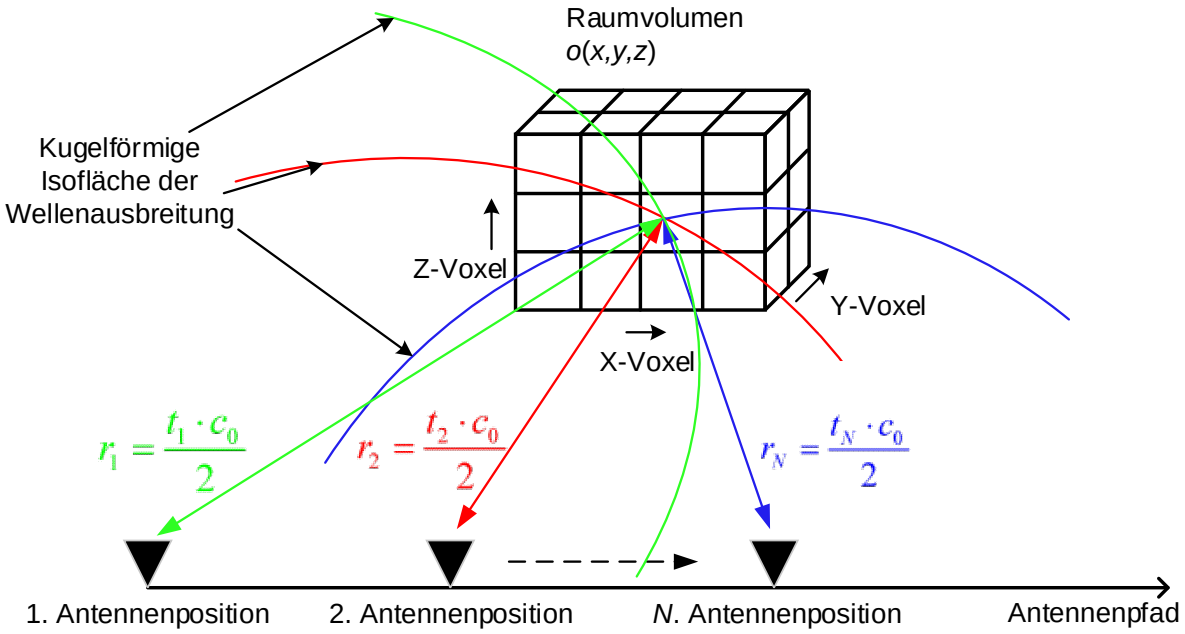


Abbildung 3: Szenario zur Illustration des Algorithmus zur Bildgenerierung.

Ein 3D Radarbild wird dadurch erzeugt, dass man jedem Voxel $o(x,y,z)$ eine Amplitude berechnet. Durch den mono-statischen Aufbau (Sendeantenne identisch mit der Empfangsantenne) breitet sich die Wellenfront kugelförmig um die Antenne als der Mittelpunkt aus. Das bedeutet, dass jeder zeitliche Abtastwert von $h_n(t)$ mit einer kugelförmigen Wellenfront korrespondiert - dabei gilt trivialerweise, dass die Kugel größer ist, je verzögerter der Abtastwert ist, bedingt durch die längere zurückgelegte Distanz. Mathematisch lässt sich die Amplitude eines Voxels berechnen als

$$o(x,y,z) = \frac{1}{N}\sum_{n=1}^{N} h\left(\frac{2 \cdot r_n}{c_0}\right), \tag{1}$$

wobei der Abstand

$$r_n = \frac{t_n \cdot c_0}{2} \tag{2}$$

zwischen Antenne und Voxel mit der Lichtgeschwindigkeit und der zurückgelegten Zeit verknüpft ist. Diese kohärente Summation erfolgt für jedes Zeitsample von jeder Messung, wodurch sich das finale Bild sukzessive aufbaut. Im Fall einer Reflektion bzw. hohen Amplituden in der Kanalimpulsantwort überlagern sich die kugelförmigen Wellenfronten hoher Amplitude im Raum und erzeugen so Bildinhalte mit hoher Bildenergie. Konsequenterweise ist der Bildkontrast umso höher, je mehr Messungen verrechnet werden.

Ein grundsätzlicher Nachteil dieser Methode ist, dass die kohärente Summation der kugelförmigen Wellenfronten auch zu Überlagerungen an Orten führen, wo sich keine Streuzentren befinden, beispielsweise hinter der Antenne entgegengesetzt der Blickrichtung. Dieses Artefakt wird jedoch in diesem Vorhaben weitestgehend dadurch kompensiert, dass gerichtete Antennen verwendet werden. Außerhalb des Ausbreitungswinkels werden mögliche Anteile im Bild gefenstert.

Ein weiterer Nachteil ist, dass das Rauschen durch die bloße Anwesenheit der kugelförmigen Wellenfronten erhöht wird. Das verringert das Signal-Rausch-Verhältnis im Bild bzw. erhöht die Artefakte.

3.2.1 Beispielergebnisse

Im Folgenden soll das Ergebnis einer Vermessung eines handelsüblichen Küchenmessers und das dazugehörige Radarbild vorgestellt werden. Das Messer ist ca. 28 cm lang und knapp 3 cm breit an der breitesten Stelle. Der Kofferscanner führt eine, wie im vorherigen Kapitel bereits erläutert, mäanderförmige Antennenbewegung aus; in diesem Fall auf einer Fläche von etwa 20 cm horizontal x 28 cm vertikal. Mit einer voreingestellten Motorgeschwindigkeit von knapp 2 cm/s beträgt die horizontale Fahrtdauer etwa 10 s. Bei einer Pulswiederholfrequenz von ca. 8 Hz werden somit im Schnitt ca. 80 Messungen pro horizontalen Pfad gemessen. Die horizontalen Pfade sind in einem 5 mm Intervall angeordnet, womit die vertikale Fahrtdauer vernachlässigbar gering ist. Bei der knapp 11 Minuten langen Messung wurden etwa 4500 Messungen erfasst und nach Formel (1) berechnet. Das dadurch berechnete 3D Raumvolumen ist in Abbildung 4 zwecks einer besseren Visualisierung durch eine xz-Ebene des Volumens dargestellt.

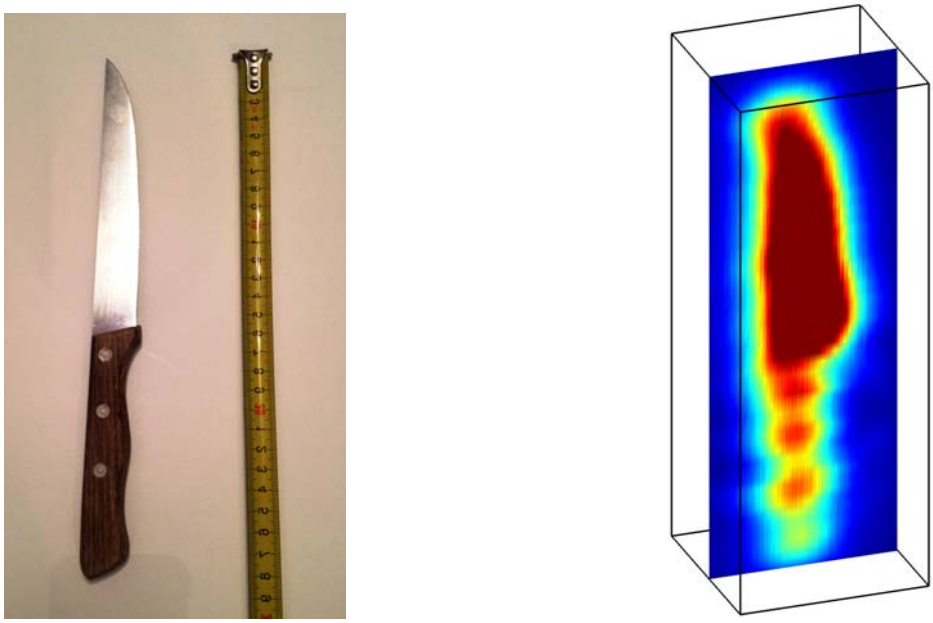


Abbildung 4: Optisches Bild (Fotografie) des Küchenmessers als Testobjekt (links) und das dazugehörige Millimeter-Wellenbild (rechts).

Dem Benutzer des Kofferscanner steht als frei wählbarer Parameter die Fahrtgeschwindigkeit des vertikalen Linearantriebes zu Verfügung. Bei einer konstanten Pulswiederholfrequenz werden bei einer erhöhten Fahrtgeschwindigkeit (und damit schnelleren Gesamtscan) weniger Messungen erfasst, was ein gröber quantisiertes und damit artefaktbehaftetes Bild ergibt. Umgekehrt lässt sich die Bildqualität auf Kosten der Messdauer erhöhen, weil auf der gleichen Strecke mehr Messungen für die Berechnung zur Verfügung stehen. Das Testobjekt wurde, ohne das Szenario zu verändern, im Rahmen einer Messreihe mit sukzessiv höheren Fahrtgeschwindigkeiten vermessen. Abbildung 5 zeigt den Einfluss der Messdauer (Fahrt + Datenakquise + Bildberechnung) auf das generierte Gesamtbild.

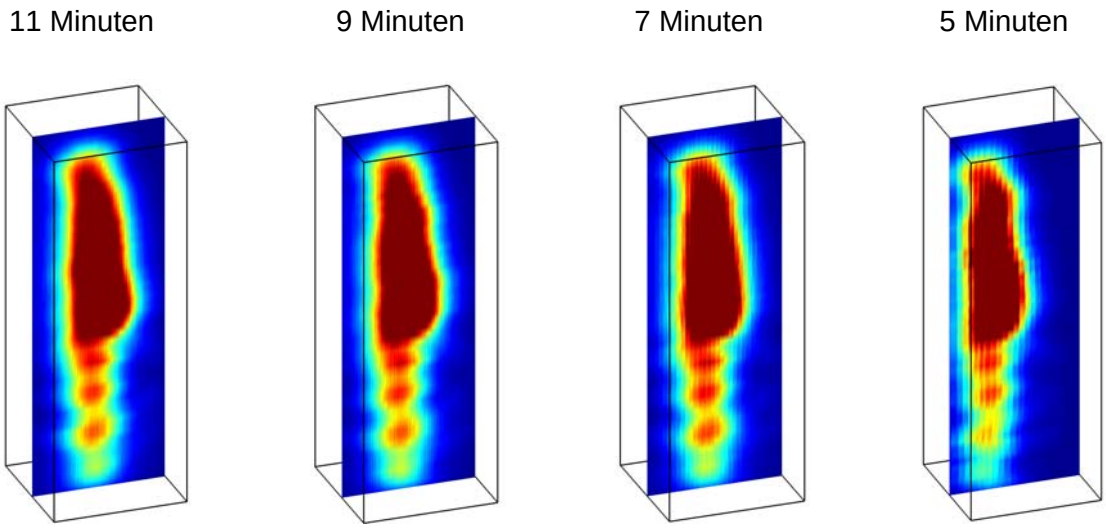


Abbildung 5: Bildqualität bzw. Artefaktgehalt der Millimeter-Wellenbilder abhängig von der gesamten Messzeit (Fahrt + Datenakquise + Bildberechnung).

Ein Kompromiss zwischen hinnehmbarer Messzeit und adäquater Bildqualität muss gefunden werden. Nachteilig kommt dazu, dass das Radarsystem und die Motoren nicht perfekt synchronisiert sind, d.h. dass einer Messung nicht die exakte örtliche Antennenposition zugeordnet wird, sondern nur eine interpolierte Schätzung. Die genaue Antennenposition ist aber eine Bedingung für die Generierung von Millimeter-Wellenbildern. Eine Alternative wäre z.B. ein wiederholtes Abbremsen, Messen und Abfahren - diese würde aber den zeitlichen Rahmen einer Messung sprengen.

4. Besondere Merkmale von Millimeter-Wellenbildern

Es kommt nicht selten vor, dass Millimeter-Wellenbilder falsch interpretiert werden, weil der Betrachter diese mit einer ungeeigneten Referenz vergleicht. In vielen Fällen wird als Referenz zu einem Millimeter-Wellenbild, meist unbewusst und intuitiv, ein Bild mit optisch sichtbarem Licht (Foto) genommen. Die Wellenlängen von optisch sichtbarem Licht sind jedoch um 4 - 5 Zehnerpotenzen kleiner als die Wellenlängen im Millimeter-Wellenband und somit ist auch die laterale Auflösung um den Faktor besser. In diesem Kapitel sollen deswegen einige Aspekte diskutiert werden, die man bei der Interpretation von Millimeter-Wellenbildern beachten sollte, um das Maximum an Radarinformation zu extrahieren.

Die elektromagnetische Wellenausbreitung nach einer Reflektion bzw. Streuung hängt von 4 Aspekten ab, und zwar

- von der **Frequenz**,
- von dem **Material** des Streuers,
- von der **Objektgeometrie** des Streuers und
- von der **Polarisation** der einfallenden Wellen.

Im Folgenden sollen die Aspekte diskutiert werden, die einen erheblichen Einfluss auf die Bildgebung in diesem Vorhaben besitzen.

4.1 Einfluss der Objektgeometrie

Ein Objekt mit einer hohen Reflektivität (Dihedral, Trihedral, planare Fläche) kann, unter idealen geometrischen Bedingungen, eine starkes Echo verursachen. Aber ein kleiner Versatz reicht aus, dass die Radarsignatur des Objektes im Rauschen untergeht und nicht mehr detektierbar ist [13]. Das ist z.B. bei einer planaren Fläche der Fall, wo der Ausfallswinkel gleich dem Einfallswinkel ist. Der Radarrückstreukoeffizient (Radar cross-section) ist besonders

stark geometrieabhängig. Konkret bedeutet das im Vorhaben, dass verdächtige Objekte wie das Stahlmesser, von dem man ein hohes Echo erwartet, in dem Gepäckstück so verrutscht sein könnten, dass es kaum detektierbar ist. Dieses Problem könnte man mit einem zirkularen Antennenpfad (indem man das Testobjekt auf einer Rotationsplattform positioniert) kompensieren. Das Design in diesem Vorhaben ist jedoch eine planare Apertur, die laterale Bereiche des Objektes (und erst recht den hinteren Bereich) nicht abdeckt.

4.2 Einfluss des Dynamikbereiches

Millimeter-Wellenbilder sind räumlich verteilte Amplitudenverteilungen. Das bedeutet, dass der Dynamikbereich der Bilder und somit die Farbcodierung variabel und a posteriori einstellbar ist. Ein Beispiel zur Verdeutlichung des Sachverhaltes:
Der Holzgriff des Stahlmessers hat eine viel geringere Permittivität als die Edelstahlklinge und verursacht damit eine schwächere Reflektion. Wenn man den Dynamikbereich an die Klinge anpasst und diese mit geringen Artefakten sichtbar ist, ist der Holzgriff kaum sichtbar, da der Dynamikbereich für diesen Bereich zu groß ist. Verringert man hingegen den Dynamikbereich so sehr, dass der Griff fokussiert wird, ist der Bereich der Klinge übersteuert und damit artefaktbehaftet.
Eine logarithmische Darstellung ist nur bedingt empfehlenswert, da in diesem Fall das Rauschen, Antennenringing und Clutter verstärkt werden.

Im Rahmen einer Messkampagne in diesem Vorhaben werden unterschiedliche Waffen (Attrappen) in unterschiedlichen Gepäckstücken mit dem Kofferscanner untersucht. Eine Fragestellung in diesem Vorhaben ist es, ob und in wie fern die Unterscheidung zwischen Gepäckstück ohne Waffe mit dem gleichen Gepäckstück mit Waffe möglich ist. Unter Realbedingung hat man keine a priori Information über das Gepäckstück und es gilt die Unschuldsvermutung, dass der Inhalt ungefährlich ist. Um eine faire Klassifizierung zu ermöglichen ist daher ein konstanter Dynamikbereich einzustellen. Ansonsten besteht die Gefahr, dass man sein System mit Vorwissen (das man eben nicht hat bzw. diese Information will man extrahieren) auf das jeweilige Szenario optimiert und z.B. den Dynamikbereich für stark reflektierende Waffen verringert und für gering reflektierende Waffen im Nachhinein erhöht. Einen konstanten Dynamikbereich pro Gepäckstück einzustellen ist damit ein Kompromiss, den man eingehen muss, der aber auch einen Einfluss auf die Bildqualität hat.

4.3 Einfluss der Systemkonfiguration

Einen wesentlichen Einfluss auf die Gesamtperformance hat auch die nicht optimale Konfiguration des Systems: Der Kofferscanner generiert mit einem mono-statischen (Sendean-

tenne gleich Empfangsantenne) und einem mono-polarimetrischen Radar ein 3D Abbild eines Objektes mit einer planaren (2D) Apertur. In diesem Fall ist in der Literatur auch bekannt, dass solche Systeme 2.5D genannt werden, denn vollwertiges stereoskopisches 3D benötigt eine Rundumsicht des Objektes, um die lateralen und insbesondere hinteren Objektbereiche abzubilden.

Eine sehr viel bessere Performance ohne höheren Hardwareaufwand ist mit einer Lineareinheit und einer Rotationsplattform möglich statt mit zwei Lineareinheiten. Das Gepäckstück würde auf der Plattform rotieren und die Lineareinheit auf unterschiedlichen Höhen Messungen machen. Damit hätte man mit mehreren zirkularen Antennenpfaden auf jeweils unterschiedlichen Höhen den 3D Raum optimal abgedeckt. Mit diesem zirkularen Aufbau sind stereoskopische 3D Millimeter-Wellenbilder mit einer hervorragenden Bildqualität möglich, was auch bereits in der Literatur dokumentiert ist [14][15][16].

Die Integration eines voll polarimetrischen Systems unter Ausnutzung beider Ko- und Kreuzpolarisationen und die Integration eines bi-statischen Radars (Sende- und Empfangsantenne örtlich voneinander getrennt) würden die Gesamtperformance in Bezug auf die Bildqualität und einer robusteren Klassifikationsfähigkeit der Objekte steigern [17][18]. Der Gewinn wäre jedoch nicht in dem Maße so groß, wie vorhin beschriebene Nutzung zirkularer Antennenpfade.

4.4 Einfluss der Betriebsfrequenzen

Im Rahmen dieses Vorhabens sollen verdächtige Objekte und waffenähnliche Geometrien innerhalb eines Reisegepäckstückes detektiert werden. Das bedeutet, dass man das umschließende Behältnis mit der Millimeter-Wellenstrahlung penetrieren muss, um dann Reflektionen aus dem Inneren zu extrahieren und anschließend auszuwerten. Damit fallen z.B. Aluminiumkoffer aus einer Untersuchung heraus, da Metalle nicht durchdringt werden.

Medium penetrierendes Radar erlebt seit mehr als 4 Dekaden eine sehr intensive wissenschaftliche Erforschung, die z.B. in [19][20][21] dokumentiert ist. Es ist bekannt, dass höhere Frequenzen stärker gedämpft werden als niedrige. In [22] ist dieser Umstand für Radaranwendung sehr ausführlich diskutiert. Aus der Literatur ist weiterhin bekannt, dass auf dem Gebiet der Detektion von vergrabenen Landminen Frequenzen von 200 MHz bis 2 GHz benutzt werden, um noch eine adäquate Leistung am Empfänger zu erhalten. Die Frequenzen in diesem Vorhaben liegen zwischen 68 GHz und 92 GHz, was eine deutlich höhere Dämpfung der Signale zur Folge hat. Das ist insbesondere bei Stoffen mit einem geringen Radarrückstreukoeffizient (z.B. Mehl) problematisch, da das Echo nach Penetration des Behältnisses zu schwach für eine robuste Verarbeitung sein kann.

Die Wahl der Betriebsfrequenzen hat auch einen Einfluss auf die Auflösungsfähigkeit des Systems und damit auch auf die Bildqualität. Die Entfernungsauflösung ist invers proportional zur absoluten Bandbreite und lautet $\delta_x = c_0 / 2B$. In diesem Vorhaben beträgt die Entfernungsauflösung etwa 6.3 mm. Das laterale Auflösungsvermögen ist proportional zu den Betriebsfrequenzen, das zusätzlich durch die Synthese einer synthetischen Apertur deutlich erhöht wird.

Aufgrund der immensen Bandbreite, den hohen Frequenzen und der Möglichkeit synthetische Aperturen zu nutzen, werden die Anforderungen für dieses Vorhaben hinsichtlich der radialen und lateralen Auflösung erfüllt. Es ist jedoch, aufgrund der hohen Frequenzen, mit einer deutlichen Dämpfung des Signals durch die umhüllenden Gepäckstücke zu rechnen, die im schlimmsten Fall das Echo nicht detektierbar und somit unbrauchbar machen.

5. Testobjekte und Gepäckstücke

Bei den zu untersuchenden Testobjekten (Abbildung 6) handelt es sich um Imitate von gängigen Waffen und Rauschmitteln. Zu diesem Zweck wurden eine Revolverattrappe und 3 Messer benutzt. Bei den Messern handelt es sich um ein gewöhnliches Stahlmesser mit Holzgriff, einem Messer aus Hartkunststoff und einem Keramikmesser. Außerdem gehörte eine je 1kg Zucker- und Mehlverpackung und 2 Bombenattrappen zum Satz der Testobjekte.

Abbildung 6: Zu untersuchende Testobjekte.
1. Reihe: Revolverattrappe, Stahlmesser, Kunststoffmesser, Keramikmesser.
2.Reihe Zucker, Mehl, Bombenattrappe aus Marzipan, Bombenattrappe aus Knetmasse.

Sprengstoffe sind im Allgemeinen nur schwer klassifizierbar, da neben den industriell hergestellt und militärisch genutzten Sorten beliebig viele Varianten hergestellt werden können.

Sprengstoffe wie RDX, TNT, HMX, PETN oder Tetryl und Mischprodukte wie Comp B, Comp C-4, Deasheet, Octol oder Semtex-H zeigen eine niedrige Permittivität [23].

Eine bildgebende Untersuchung von Sprengstoffen im Millimeter-Wellenbereich die sehr ähnlich zu dem Inhalt dieses Vorhabens ist, wurde in [24] veröffentlicht. Dort sind folgende Permittivitäten von Sprengstoffen angegeben.

- Pentaerythritol tetranitrate (PETN) ε_r = 2.3
- TNT hexogen ε_r = 4
- TNT octogen ε_r = 2.9
- Potassium nitrate (KNO_3) ε_r = 1.6
- Ammonium nitrate (NH_4NO_3) ε_r = 4

In [24] wurden Proben von allen genannten Explosivstoffen mit einem synthetischen Apertur Radar zwischen 75 GHz und 110 GHz untersucht, um dann das gleiche Bildgebungsverfahren wie in diesem Vorhaben anzuwenden. Die dort akquirierten Erkenntnisse decken sich mit den Erkenntnissen im Rahmen dieses Vorhabens: Aufgrund der niedrigen Permittivität ist der dielektrische Kontrast zu Luft ε_r = 1 niedrig, aber die schwachen Reflektionen noch detektierbar. In naher Umgebung von Gepäckstücken oder Textilien, die gewöhnlich eine Permittivität ε_r > 6-8 haben, sind die Echos der Explosivstoffe maskiert bzw. die Interferenz mit den anderen Materialien zu massiv, als dass sie robust detektiert und verarbeitet werden können.

Marzipan und Knetmasse, wie sie jeweils auch in der Testreihe Anwendung finden, eignen sich als Simulationsmaterial für Explosivstoffe, da sie eine ähnliche Konsistenz und eine ähnlich niedrige Permittivität wie viele Explosivstoffe haben. In der Literatur ist die Benutzung von derart authentischen Simulantionsmaterialien eine gängige Praxis, um nicht mit Sprengstoffen zu hantieren, was z.B. in [25] und [26] dokumentiert ist.

Bei den zu untersuchenden Gepäckstücken (Abbildung 7) handelt es sich um übliches Reisegepäck. In Rahmen dieses Vorhabens waren das ein Hartschalenkoffer, ein Trolley, ein Rucksack und eine Baumwolltüte.

Abbildung 7: Zu untersuchende Gepäckstücke.
Hartschalenkoffer aus Kunststoff, Trolley aus Polycarbonat,Rucksack, Baumwolltüte.

Zum Zweck der Evaluation wurde im Rahmen einer sehr ausgiebigen Messkampagne jedes der acht Testobjekte jeweils in jedem der vier Gepäckstücke untersucht. Um eine realitätsnahe Untersuchung zu gewähren, enthielten die Gepäckstücke zusätzlich zu den Testobjekten auch gewöhnliche Kleidungsstücke aus Baumwolle und synthetischen Stoffen. Eine Messung der Gepäckstücke ohne Testobjekte (lediglich nur mit Textilien) ist ebenfalls zum Zweck der Referenz vorhanden. Zusätzlich wurde jedes Testobjekt alleine (ohne einhüllendem Gepäckstück) untersucht. Insgesamt ergibt sich daraus eine Messreihe mit 44 Messungen.

6. Ergebnis

Augfrund der hohen Reflektivität sind der Revolver, das Stahlmesser und das Keramikmesser in jedem Gepäckstück als verdächtiger Hot-spot detektierbar. Zucker, Mehl, Knetmasse und Marzipan zeigen aufgrund ihrer geringen Permittivität eine Detektierbarkeit ohne Gepäckstück und höchstens in einer dünnen Baumwolltüte. Bei den anderen Gepäckstücken (Hartschalenkoffer, Trolley und Rucksack) ist eine Detektierbarkeit aufgrund der starken Dämpfung nicht zweifelsfrei möglich.

Die Einbußen der Leistungsfähigkeit sind nicht, wie erwartet, durch eine mangelnde Auflösung oder durch das Bildgebungsverfahren begründet; das sieht man z.B. in den Bildern des Trolleys, bei denen die geriffelte äußere Struktur und das metallische Abzeichen im oberen Drittel eindeutig und akkurat erfasst werden. Es liegt vielmehr daran, dass die Absorption beim Hartschalenkoffer, Trolley und Rucksack zu hoch sind und dadurch die schwachen Reflektionen vom Mehl, Zucker, Marzipan und Knetmasse gedämpft werden. Diese These wird zusätzlich dadurch gestützt, dass diese Effekte nicht bei der dünnen Baumwolltüte mit vernachlässigbarer Absorption zu beobachten sind.

Alle 44 ausgewerteten Millimeter-Wellenbilder der Messreihe sind im Anhang aufgeführt. Diese ermöglichen dem Leser eine vergleichende und qualitativ detaillierte Analyse.

7. Zusammenfassung

Ziel des Forschungs- und Entwicklungsvorhabens **„Untersuchungen mit einem radarbasierten 3-D-Scanner im Rahmen VESPER^{Plus}“** ist es, eine neuartige Möglichkeit für eine ungefährliche und berührungslose Abbildung des Inneren eines geschlossenen nicht metallischen Behältnisses zu untersuchen. Im Rahmen dieses Vorhabens wurde für diesen Zweck der Kofferscanner ganzheitlich entwickelt, evaluiert und mit Testmessungen experimentell validiert.

Bis zum Stand des Zwischenberichtes waren nahezu alle Arbeiten bezüglich der Hardware und des System Designs erledigt. Auch die Spezifikation des Radarmoduls inkl. dem HF Front-end und dem digitalen Back-end waren abgeschlossen. Die dazugehörigen spezifischen HF Komponenten wurden entwickelt und in das System integriert. Nach Integration der Lineareinheiten wurden erste rudimentäre Messungen gemacht und das System in Betrieb genommen. Diese waren jedoch keine kontinuierlichen Bewegungen der Lineareinheiten, sondern stop-and-go Messungen mit immensen Zeitaufwand und einer ersten off-line Auswertung.

Die systemseitige Integration auf eine einheitliche Plattform, die Entwicklung eines angepassten Bildgebungsalgorithmus und das Konzept der Bewegung der Lineareinheiten inklusive simultaner Datenakquise wurden in das System eingearbeitet. Diese Maßnahmen tragen in Summe dazu bei, das Sensorsystem zu schnellen Sensorik zu optimieren und ermöglichen quasi echtzeitfähige Verarbeitung. Messungen werden sukzessive während der kontinuierlichen Motorbewegung aufgenommen und eine Auswertung nach jeder Fahrtstrecke berechnet. Das Bild baut sich damit etappenweise on-line auf.

Aufgrund der eingesetzten Millimeter-Wellen von 68 GHz – 92 GHz erfolgt die Detektion von Sprengstoffen oder anderen Chemikalien aufgrund ihrer Reflektivität und den daraus berechneten Millimeter-Wellenbildern. Eine qualitative Klassifikation der untersuchten Materialien erfordert weitaus höhere Frequenzen ab 500 GHz bis 4 THz und mehr. Solche Signale werden in der Spektroskopie eingesetzt, um charakteristische Absorptionsspektren zu ermitteln. Anhand dieser Absorptionsspektren ist eine eindeutige Klassifikation von Sprengstoffen und anderen Chemikalien bis zu einem gewissen Grad möglich. Dieses Gebiet der THz-Spektroskopie ist bereits seit geraumer Zeit Bestandteil aktueller Forschung inkl. einer ausgewiesenen Literatur [27][28][29].

Im Rahmen der anspruchsvollen Entwicklungen dieses Vorhabens, die eine große Nähe zu aktuellen Forschungsfeldern haben, wurden 2 Veröffentlichungen [30] und [31] auf namhaften internationalen Konferenzen publiziert.

8. Ausblick und Empfehlungen für zukünftige Vorhaben

Eine minutenlange Messdauer für den Demonstrator ist, in Anbetracht dass es sich um eine Laborversion handelt, noch akzeptierbar. Ein industrieller Einsatz des Kofferscanners im Alltag einer Hafenumgebung erfordert jedoch deutlich kürzere Verarbeitungszeiten im Sekundenbereich. Diese technologisch höchst anspruchsvolle Herausforderung ist durch die Vermeidung der Antennenbewegung, die am meisten Zeit in Anspruch nimmt, zu bewältigen. Hierfür eignen sich 3 Ansätze:

- Dynamisches Scannen
  Die Untersuchung eines Gepäckstückes läuft in 2 Stufen ab. Eine schnelle Messung liefert ein grobes Radarbild mit geringer Auflösung. Dieses wird mit smarten Algorithmen auf verdächtige Stellen untersucht, die dann markiert werden. Im zweiten Durchlauf werden nur die markierten Stellen in voller Auflösung vermessen, die dann die endgültige Information liefern.

- Mehrantennensysteme
  In der Kommunikation als MIMO (Multiple Input - Multiple Output) bekannt und in der Radartechnik als phasengesteuerte Antennenarrays steht diese Technologie für das gleiche Prinzip: Mehrere örtlich verteilte Antennen werden zu einem Array zusammengefasst und parallel betrieben, um so die Antennenbewegung zu emulieren. Konkret auf dieses Vorhaben projiziert, könnte man ein linienförmiges Antennenarray benutzen, um so die horizontale Bewegung zu vermeiden.

- Planare Antennenarrays
  Bei dieser Technologie ist das Antennenarray in 2 Dimensionen aufgeteilt, so dass im Rahmen dieses Vorhabens eine Bewegung ganz wegfallen würde. So ein System wurde in jüngster Vergangenheit von Rohde & Schwarz als Personenscanner (QPS100) entwickelt und hat das Stadium eines Prototyps erreicht.

Solange verwertbare Echos am Empfänger eintreffen und diese verarbeitet werden können, kann man verdächtige Hot-spots im Reisegepäck identifizieren. Ist aber die Dämpfung durch Absorption der Gepäckstücke zu hoch, kann eine Detektion nicht mehr gewährleistet werden. In dem Fall kann man, soweit es die Hardware zulässt, die Sendeleistung erhöhen, was aber aufgrund von Frequenzbereichszuweisungen nicht immer möglich ist. Eine Alternative für zukünftige Forschungsvorhaben ist, niedrigere Betriebsfrequenzen zu benutzen. Tiefe Frequenzen ab 500 MHz oder mindestens ab 1 GHz haben sich bereits auf dem Gebiet der Landminendetektion etabliert und versprechen auch bei massiven Gepäckstücken aus Kunststoff eine geringe Dämpfung.

Selbst für den Fall, dass Mehrantennensysteme bei zukünftigen Systemen zum Einsatz kommen, sollte eine Rotation des Gepäckstückes erfolgen, damit man laterale und hintere Objektbereiche erfasst. Möglich ist das mit einer Rotationsplattform, auf der man das Gepäckstück stellt. Dadurch ist nicht nur eine stereoskopische 3D Information zu extrahieren, sondern eine insgesamt deutliche Bildverbesserung.

Ein weiterer zusätzlicher Freiheitsgrad wäre, wenn man das System als bi-statisches und voll polarimetrisches System entwickelt. Aufgrund der vektorwertigen Natur einer elektromagnetischen Welle hat man mit einem mono-statischen System konsequenterweise Informationsverluste. Bei einem voll-polarimetrischen System hat man zwar den Nachteil eines erhöhten Datenaufkommens (Faktor 4), dieses wird aber aufgewogen mit dem Vorteil, die maximal mögliche Radarinformation aus dem Szenario zu extrahieren.

9. Konzept für eine mittelfristige Integration in den Hafenbetrieb

Seit Juli 2004 gelten für Schiffe und Hafenanlagen weltweit umfangreiche Sicherheitsmaßnahmen, die von der internationalen Schifffahrtsorganisation (IMO) erarbeitet wurden, um die maritime Gefahrenabwehr zu verbessern. Im Rahmen dieser Maßnahmen werden ankommende Passagiere, dazugehöriges Reisegepäck und eventuell ein dazugehöriges Kraftfahrzeug (Kfz) auf verdächtige Waren (Waffen, chemische Substanzen, Schmuggelware etc.) untersucht. Im Durchschnitt stehen für die Untersuchung ca. 5 Minuten zur Verfügung, in der folgende Arbeiten durchgeführt werden: Inspektion des Kfz, Ausweiskontrollen, Zolldeklarationen, chemische Abstriche von Gepäckstücken, Einsatz eines Röntgengerätes. Wobei die Untersuchungen aus Zeitgründen nicht immer im vollen Umfang gemacht werden, sondern auch auf Verdachtsmomente.

Ein Zeitfenster von 5 Minuten reicht, zum aktuellen Projektstand, für den Einsatz des Kofferscanners in der geschilderten Sicherheitsroutine nicht aus. Mittelfristig jedoch, nach Umsetzung der in Kapitel 8. aufgeführten Empfehlungen und Maßnahmen für zukünftige Vorhaben, ist eine Integration denkbar. Die Vorschläge optimieren das System sowohl unter dem Aspekt der Verarbeitungsgeschwindigkeit als auch unter dem Aspekt einer gesteigerten, den hohen Anforderungen genügenden, Bildqualität.

Ein Konzept ist, dass der Kofferscanner in einer begrenzten anfänglichen Pilotphase nicht als Substitut, sondern vielmehr als Supplementation zum Röntgengerät in Betrieb genommen werden kann. In dieser Phase kann das System parallel zum Röntgengerät in Verdachtsmomenten angewendet werden, wodurch die alltägliche Praxistauglichkeit validiert werden kann und auch das Röntgenbild als Referenz dient.

Denkbar ist auch, dass bei der Zugangskontrolle unmittelbar vor dem Einstieg in das Schiff die Passagiere ihr Kleingepäck wie Handtaschen, Rucksäcke, Beutel etc. zur Inspektion mit dem Kofferscanner abgeben. Der Vorteil ist, dass gering dimensionierte Objekte definitiv weniger Verarbeitungszeit brauchen und diese für gewöhnlich transparenter sind als z.B. Hartschalenkoffer mit mehreren Lagen Textilien.

Ein weiterer Vorschlag betrifft die Kofferrauminspektion. Das Radarsystem mit dem in Kapitel 8 vorgeschlagenen Antennenarray kann aufgrund des geringen Gewichtes und des minimalen Energiebedarfes portabel auf einem mobilen Stativ konzipiert werden. Dies würde eine Ausleuchtung des Kofferraumes bei geöffnetem Kofferraum ermöglichen ohne diese vorher zeitaufwendig leerzuräumen. Ein Einsatz durch die Fahrzeugoberfläche ist aufgrund der metallischen Beschaffenheit von Fahrzeugen nicht möglich.

Dieses mobile System würde sich auch besonders gut dafür eignen, um herrenlose Gepäckstücke, von denen eine potentiell hohe Gefahr ausgeht, berührungslos und zerstörungsfrei zu inspizieren.

Das Design der Antennenarraygröße bestimmt die maximale Größe der zu untersuchenden Objekte. Alle anderen Parameter wie etwa das HF Front-end, das digitale Back-end und die Signalverarbeitung sind unabhängig von der Größe des Arrays. Angesichts dieser Tatsache könnte man ein Array entwerfen das so groß ist, dass im Rahmen der Wareneingangskontrolle die Waren direkt auf Paletten vermessen werden, ohne diese ab- und wieder aufzuladen.

10. Wirtschaftliche Verwertungsansätze

Grundsätzliche bietet die breitbandige Mikro-Wellentechnologie mit ihrer nicht-ionisierenden, hoch-aufgelösten und materialdurchdringenden Merkmalen völlig neue Potentiale bei der zerstörungsfreien Untersuchung von Materialien und insbesondere durch Dielektrika durch. Damit lassen sich potentielle Szenarien für wirtschaftliche Verwertungsansätze erschließen, wie beispielsweise für Einsätze der Feuerwehr, THW, Polizei sowie Rettungskräfte. Konkret bedeutet dass, dass man für die genannten Gruppen Radaranwendungen durch Wände betreiben kann, damit z.B. die Feuerwehr bei einem Einsatz nicht jeden Raum aufbrechen muss.

Ein ähnliches Konzept für zukünftige Sicherheitsapplikationen ist z.B. ein Roboter mit Radarsensoren, der seine Umgebung auch unter widrigen Umständen (Staub, Rauch, Partikel, durch Wände etc.) inspizieren kann. Dieser Ansatz ist mehr denn je aktuell, wenn man be-

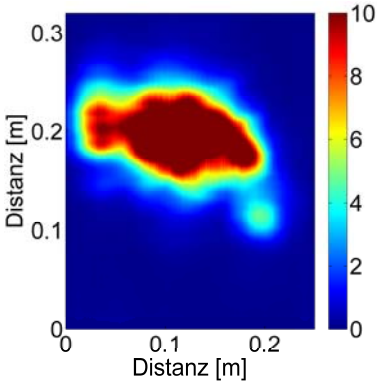
achtet, dass nach dem Reaktorunfall in Fukushima wegen genannter widriger Umstände 5 Wochen lang kein Roboter betrieben werden konnte.

Insgesamt ist zu beobachten, dass die Radartechnologie eine aufstrebende Disziplin ist, bei der das volle Potential, im Gegensatz z.B. zur Kommunikation, nicht einmal annähernd ausgeschöpft ist. Der Einzug in die Automobilindustrie ist bereits erfolgt, mit einem Markterfolg, der bereits Kleinwagen mir Radar als Serienausstattung ermöglicht. Dieser Erfolg der Radartechnik und Sensorik ist auch in anderen Bereichen zu erwarten, z.B. Entertainment, Alltag (Haushaltsgeräte, Equipment für Hobby und Sport). Eine konkrete Möglichkeit wäre z.B. ein Staubsauger, der unterschiedliche Böden (Holz, Kunststoff, Stein, Teppich etc.) aufgrund von Radarmessungen unterscheiden kann.

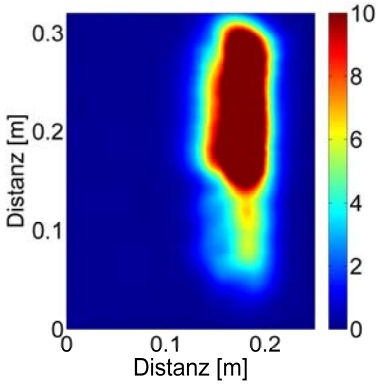
Seit den 80er Jahren wird bereits an Systemen für die Detektion von Land- und Personenminen mittels Mikro-Wellentechnologie geforscht. Das größte Problem war die Einhaltung von extrem geringen Fehlerraten bei der Detektion von Minen. Diese werden aufgrund der begrenzten Fähigkeit der Fokussierung mit Steinen und Wasseransammlungen im Boden verwechselt. Diese Thematik sollte mit dem aktuellen Stand der Technik und dem aus VESPER^{Plus} akquirierten Know-how neu beleuchtet werden.

Anhang A, Ergebnisse - Referenz, ohne Gepäckstück

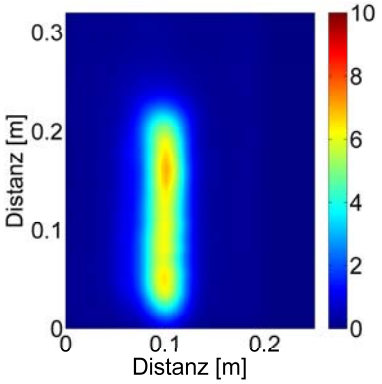
Revolver



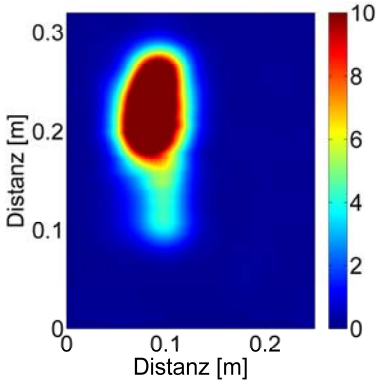
Stahlmesser



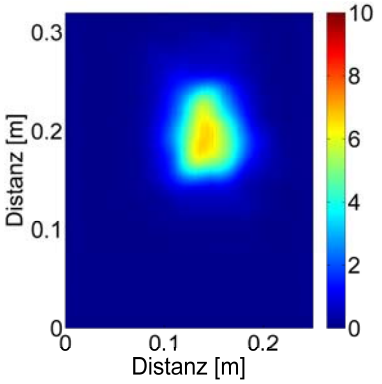
Kunststoffmesser



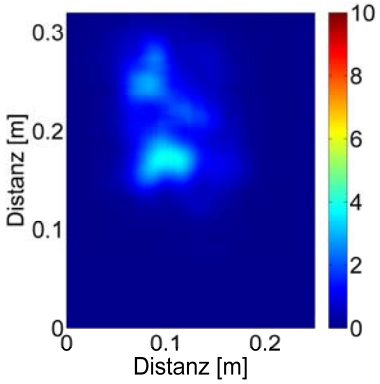
Keramikmesser



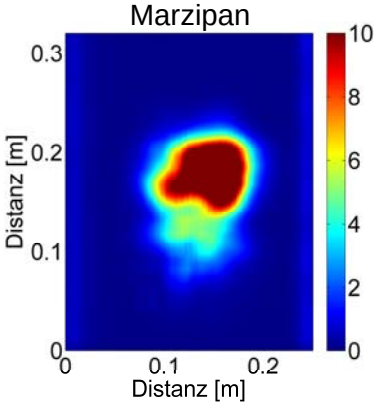
Zucker



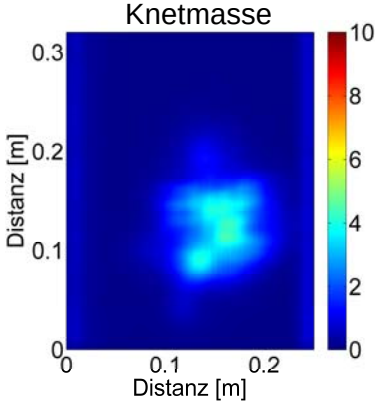
Mehl



Marzipan

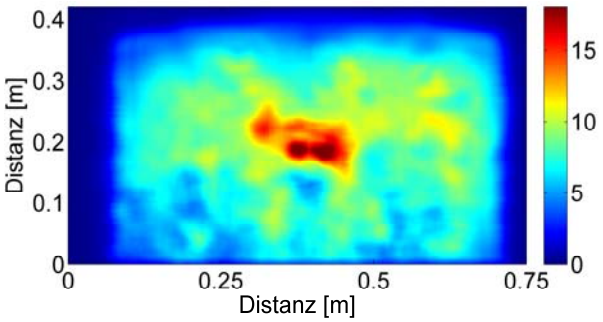


Knetmasse

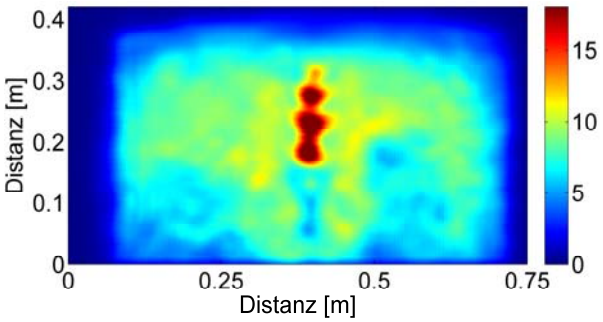


Anhang B, Ergebnisse - Hartschalenkoffer

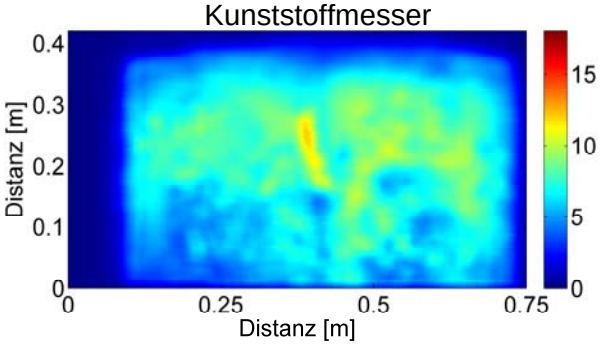
Revolver



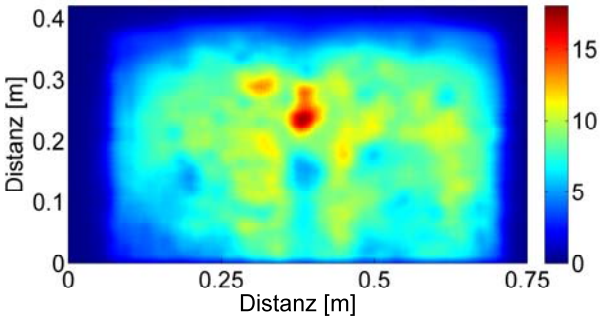
Stahlmesser



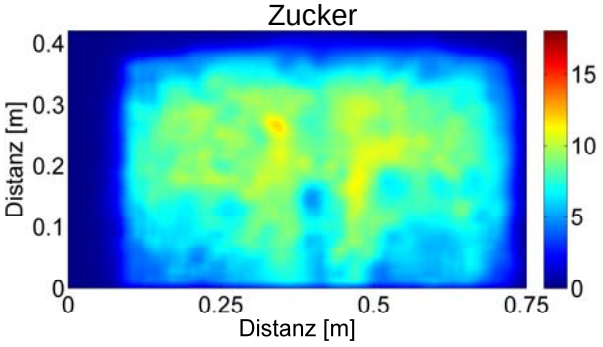
Kunststoffmesser



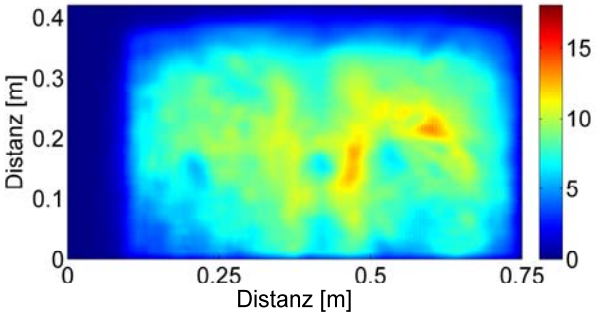
Keramikmesser



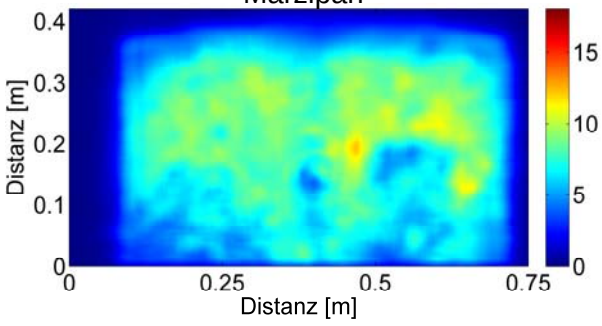
Zucker



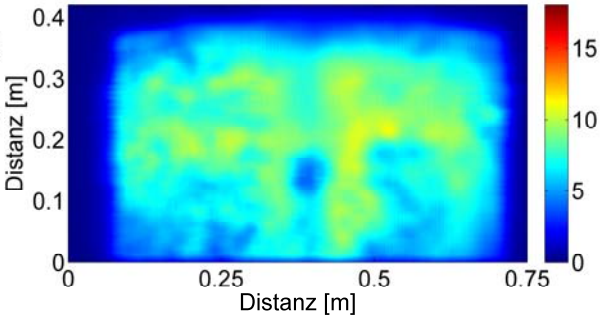
Mehl



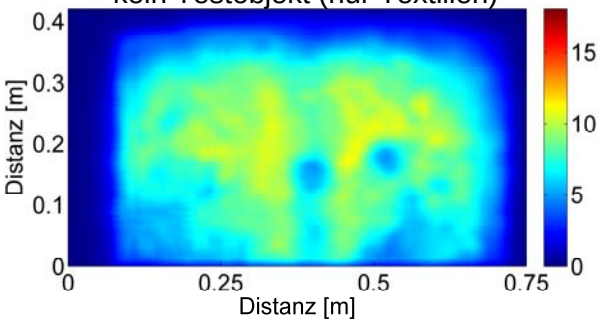
Marzipan



Knetmasse

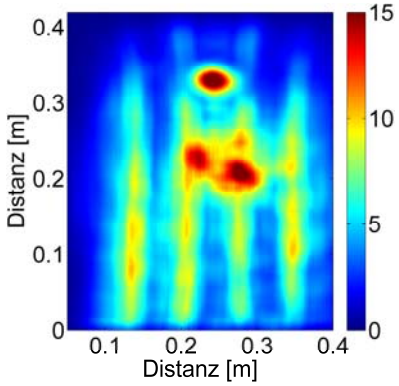


kein Testobjekt (nur Textilien)

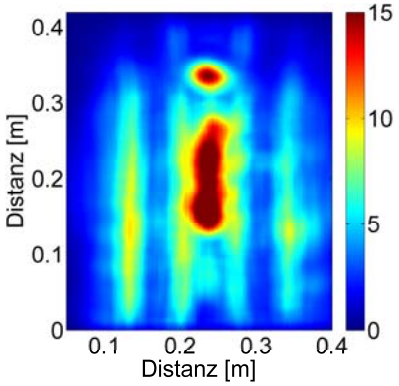


Anhang C, Ergebnisse - Trolley (Polycarbonat)

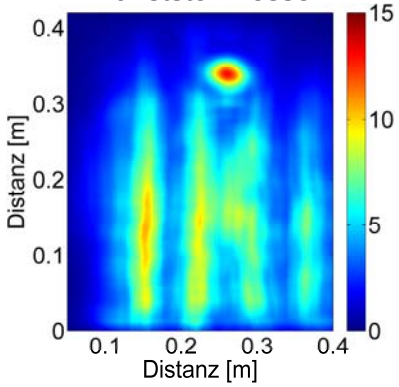
Revolver



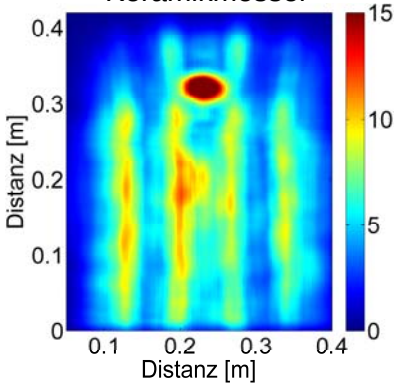
Stahlmesser



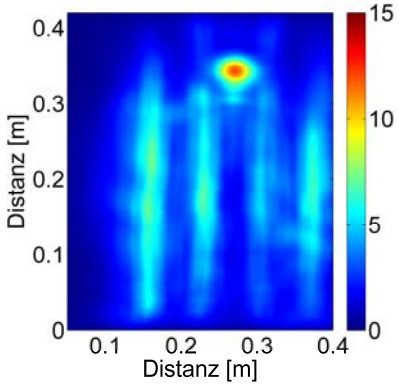
Kunststoffmesser



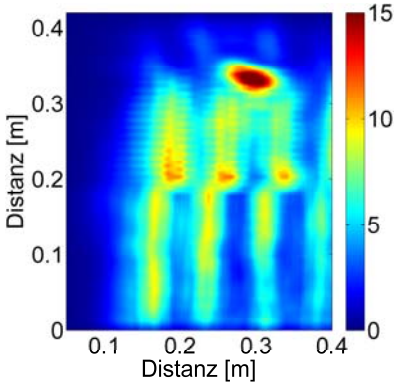
Keramikmesser



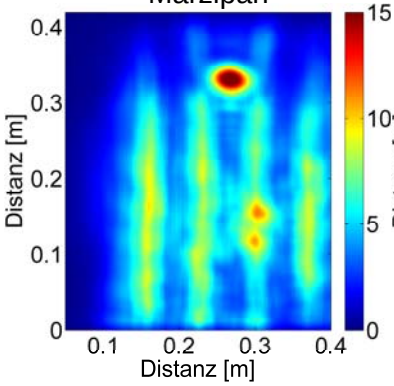
Zucker



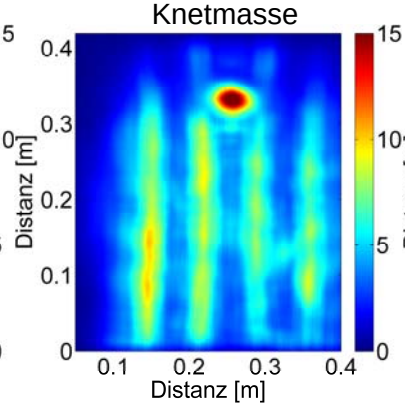
Mehl



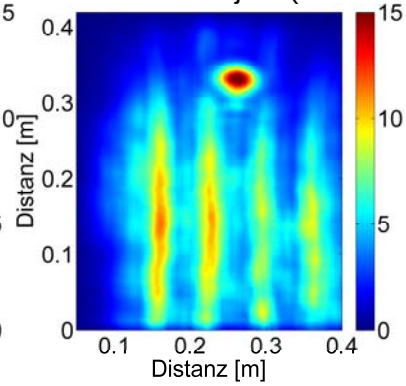
Marzipan



Knetmasse

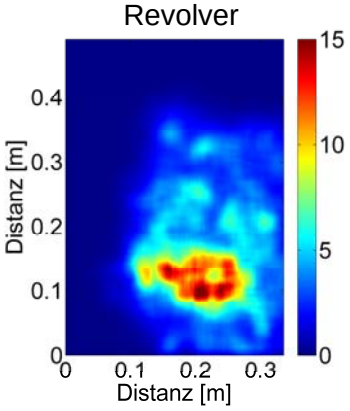


kein Testobjekt (nur Textilien)

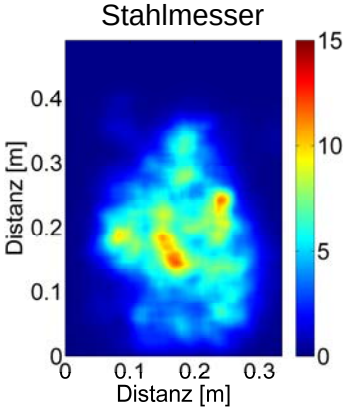


Anhang D, Ergebnisse - Rucksack

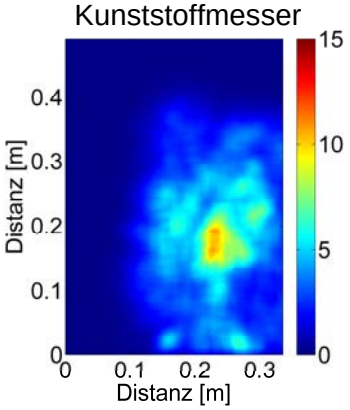
Revolver



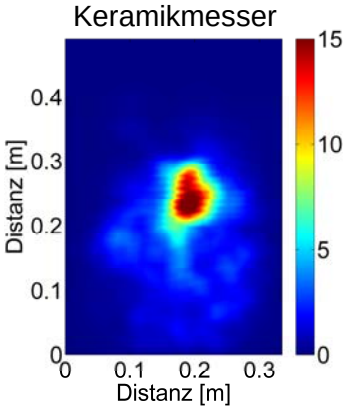
Stahlmesser



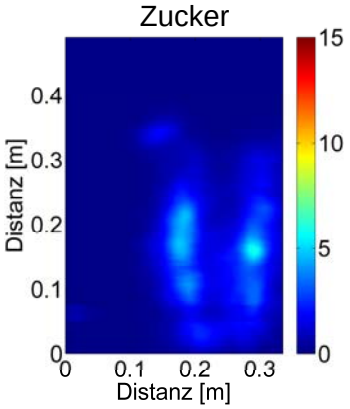
Kunststoffmesser



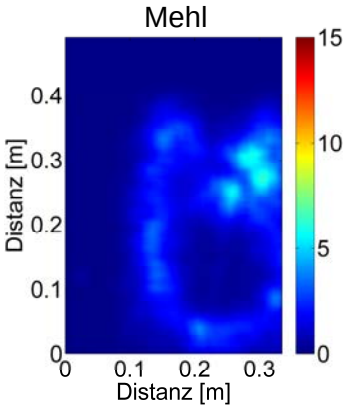
Keramikmesser



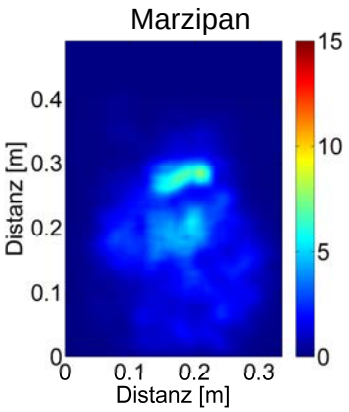
Zucker



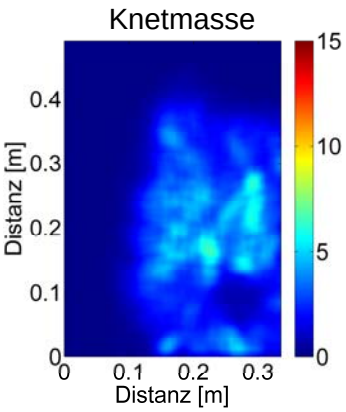
Mehl



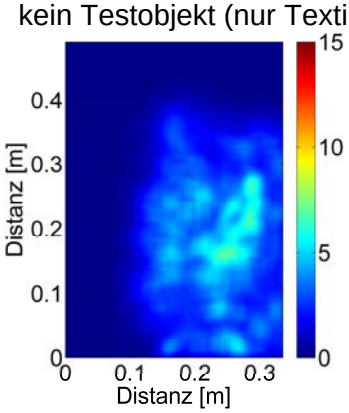
Marzipan



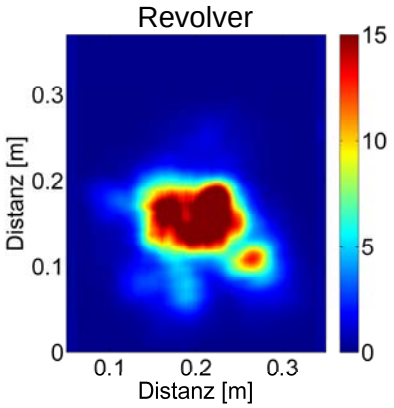
Knetmasse

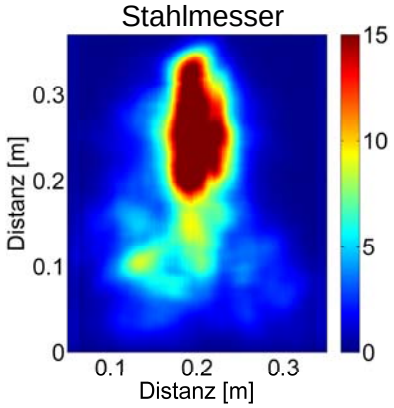


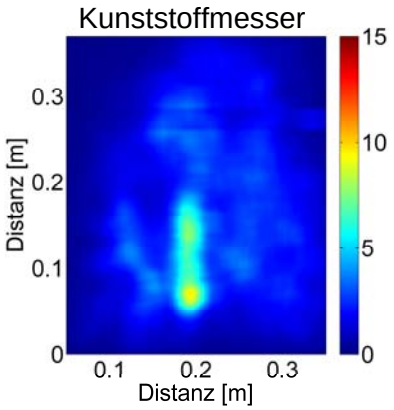
kein Testobjekt (nur Textilien)

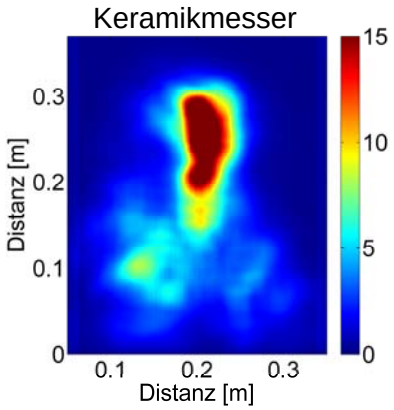


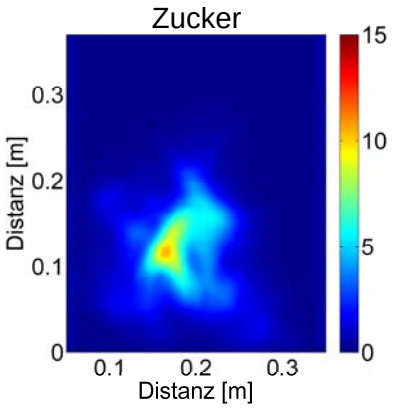
Anhang E, Ergebnisse - Baumwolltüte

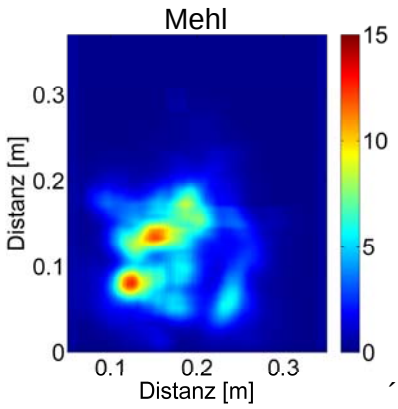


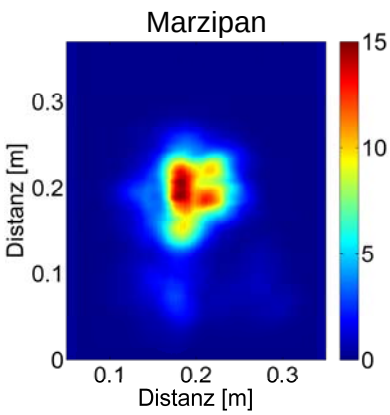


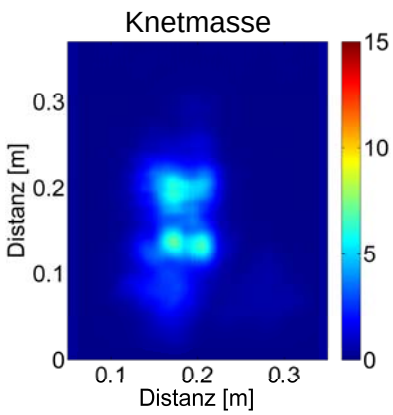


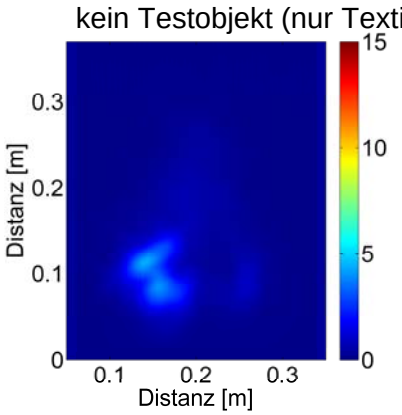












MATLAB Source Code

Nicht öffentlich

Literaturverzeichnis

[1] S. Hantscher and C. G. Diskus. Resolution Improvement for UWB Wallscanning Radar Applications. In 2008 IEEE International Microwave Symposium Digest (MTT-S), pages 1163–1166, 2008.

[2] O. Hirsch, R. Zetik, and R. S. Thomä. Chapter: Imaging in UWB Sensor Networks, Book: Wireless Sensor Networks: Application - Centric Design. InTech, ISBN: 978-953-307-321-7, DOI: 10.5772/13397, 2010.

[3] R. Salman and I. Willms. A Novel UWB Radar Super-Resolution Object Recognition Approach for Complex Edged Objects. In 2010 IEEE International Conference on Ultra-Wideband (ICUWB), volume 2, pages 1–4, 2010.

[4] R. Salman and I. Willms. In-Wall Object Recognition based on SAR-like Imaging by UWB-Radar. In 2010 8th European Conference on Synthetic Aperture Radar (EUSAR), pages 1–4, 2010.

[5] R. Salman, I. Willms, L. Reichardt, T. Zwick, W. Wiesbeck, and R. S. Thomä. On Buried Weapon Detection by Means of Scattering Matrix Decomposition for Quad-Polarized Ultra-Wideband Radar . In 2013 IEEE International Conference on Ultra-Wideband (ICUWB), 2013.

[6] X. Zhuge, T. G. Savelyev, A. G. Yarovoy, L. P. Ligthart, and B. Levitas. Comparison of Different Migration Techniques for UWB Short-Range Imaging. In 2009 European Radar Conference (EuRAD), pages 184–187, 2009.

[7] S. Hantscher, B. Praher, A. Reisenzahn, and C. G. Diskus. Analysis of Imaging Radar Algorithms for the Identifcation of Targets by Their Surface Shape. In Antennen und Messverfahren für Ultra-Wide-Band (UWB)-Systeme, Kamp-Lintfort, Germany, 2006.

[8] O. Hirsch, R. Zetik, and R. S. Thomä. Chapter: Imaging in UWB Sensor Networks, Book: Wireless Sensor Networks: Application - Centric Design. InTech, ISBN: 978-953-307-321-7, DOI: 10.5772/13397, 2010.

[9] R. Zetik and R. S. Thomä. Monostatic Imaging of Small Objects in UWB Sensor Networks. In 2008 IEEE International Conference on Ultra-Wideband (ICUWB), volume 2, pages 191–194, 2008.

[10] R. Parks. Seismic Data Acquisition and Processing Equipment for Edinburgh Royal Observatory. Radio and Electronic Engineer, 31(3):171–180, 1966.

[11] W. A. Schneider. Integral Formulation for Migration in Two and Three Dimensions. Geophysics, 43:49–76, 1978.

[12] X. Zhuge, A. G. Yarovoy, T. G. Savelyev, and L. P. Ligthart. Modified Kirchhoff Migration for UWB MIMO Array-Based Radar Imaging. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 48(6):2692–2703, 2010.

[13] M. I. Skolnik. Radar Handbook. McGraw-Hill, ISBN 9780070579132, 1990.

[14] R. Salman and I. Willms. 3D UWB Radar Super-Resolution Imaging for Complex Objects with Discontinous Wavefronts. In 2011 IEEE International Conference on Ultra-Wideband (ICUWB), pages 346–350, 2011.

[15] R. Salman and I. Willms. Exploitation of Polarimetry in Short Range 3D UWB-Radar Object Imaging. In 2012 International Conference on 3D Imaging (IC3D), pages 1–7, 2012.

[16] R. Salman, I. Willms, T. Sakamoto, T. Sato, and A. G. Yarovoy. 3D Imaging of a Manmade Target with Weak Scattering Centres by Means of UWB. In 2013 IEEE International Conference on Ultra-Wideband (ICUWB), 2013.

[17] R. Salman, I. Willms, L. Reichardt, T. Zwick, W. Wiesbeck, and R. S. Thomä. On Buried Weapon Detection by Means of Scattering Matrix Decomposition for Quad-Polarized Ultra-Wideband Radar . In 2013 IEEE International Conference on Ultra-Wideband (ICUWB), 2013.

[18] R. Salman, I. Willms, L. Reichardt, T. Zwick, and W. Wiesbeck. On Polarization Diversity Gain in Short Range UWB-Radar Object Imaging. In 2012 IEEE International Conference on Ultra-Wideband (ICUWB), pages 402–406, 2012.

[19] V. Kovalenko, A. Yarovoy, and L. Ligthart. A novel clutter suppression algorithm for landmine detection with GPR. In IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. , vol. 45, no. 11, pp. 3740–3751, Oct. 2007.

[20] Chen Chi-Chih, M.B. Higgins, Jin Au Kong, R. Detsch. Ultrawidebandwidth fully-polarimetric ground penetrating radar classification of subsurface unexploded ordnance. In IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol.39, no.6, Jun 2001.

[21] A.G. Yarovoy, B. Sai, G. Hermans, P. Van Genderen, L.P. Ligthart, A.D. Schukin, I.V. Kaploun. Ground penetrating impulse radar for detection of small and shallow-buried objects. In IEEE 1999 International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 1999. IGARSS '99, vol.5, 1999.

[22] M. Cherniakov, L. Donskoi. Frequency band selection of radars for buried object detection. In IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol.37, no.2, Mar 1999.

[23] A. Dallinger. Zirkulares Synthetisches Apertur Radar zur Personenkontrolle mit Millimieter-Wellen. Dissertation TU München, Logos Verlag, ISBN 978-3-8325-1810-3.

[24] A. Schiessl, S. S. Ahmed. W-band imaging of explosive substances. European Microwave Conference. Sept 2009.

[25] J. Koehler, Explosivstoffe. Wiley-VCH, 2008

[26] J. S. Seregelyi, D. M. Bergeron, R. Apps, M. Boyle, R. A. Walker, R. W. Fall, C. L. Gardner. Neutralisation of Landmines using a High-Power Microwave Applicator. 2001.

[27] M.C. Kemp. Explosives Detection by Terahertz Spectroscopy - A Bridge Too Far?. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, vol.1, no.1, pp.282,292, Sept. 2011.

[28] N.R. Butt, M. Nilsson, A. Jakobsson, M. Nordberg, A. Pettersson, S. Wallin, H. Östmark. Classification of Raman Spectra to Detect Hidden Explosives. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, vol.8, no.3, pp.517,521, May 2011.

[29] D. J. Cook, M. G. Allen, B. K. Decker, R. T. Wainner, J. M. Hensley, H.S. Kindle. Detection of high explosives with THz radiation. The Joint 30th International Conference on Infrared and Millimeter Waves and 13th International Conference on Terahertz Electronics, 2005. IRMMW-THz 2005. 19-23 Sept. 2005.

[30] H. Essen, R. Zimmermann, J. Moll, V. Krozer, B. Klein, I. Kramer. A four-element 80-GHz luggage scanner based on the synthetic aperture radar principle. 14th International Radar Symposium, Dresden, Germany, 19-21 June 2013.

[31] J. Moll, V. Krozer, R. Zimmermann, B. Rolef, R. Salman, T. Jaeschke, N. Pohl. Luggage Scanning at 80 GHz for Harbor Environments. 10th European Conference on Synthetic Aperture Radar, Berlin, Germany, 3-5 June 2014.

Anhang F, Projektzwischenbericht 01/2013

Millimeter-Wellen Radar-basierter Kofferscanner bei 80 GHz als Experimentalsystem zum Einsatz bei VESPERplus

Maxonic® GmbH, Gimmersdorfer Str. 75a , D53343 Wachtberg

Zwischenbericht 01/2013
Unterauftrag der Hochschule Bonn-Rhein-Sieg vom 01.06.2012
Ansprechpartner: Professor Dr. Peter Kaul

Maxonic GmbH
Gimmersdorfer Str. 75a
D-53343 Wachtberg
Germany

Phone.: 004922894378645
Fax.: 0049 228 94358646
E-mail: Helmut.essen@maxonic.biz

1. Einleitung

Eine berührungs- und zerstörungslose Untersuchung bzw. Durchleuchtung des Inneren von geschlossenen Objekten, wie Kisten, Paketen oder Gepäckstücken ist in vielen sicherheitskritischen Bereichen, beispielsweise Häfen, Flughäfen, Bahnhöfen oder in Zollstationen unverzichtbar. Um beurteilen zu können, ob der Inhalt eines Gepäckstückes gefährliche Objekte wie Waffen oder Sprengstoffe enthält oder sich von Angaben in den Unterlagen unterscheidet, wäre es wünschenswert, die im Gepäckstück enthaltenen Gegenstände bildhaft darzustellen. Als besonders vorteilhaft gilt eine 3-dimensionale Darstellungsweise, weil damit auch ungünstig liegende oder sich gegenseitig verdeckende Objekte zuverlässig identifiziert werden können. Eine besondere Bedeutung kommt dabei der Entdeckung von metallischen Gegenständen zu, von denen ein besonderes Gefährdungspotenzial ausgeht. Jedoch gehen auch von dielektrische Objekten, dabei könnte es sich um Sprengstoff handeln, erhebliche Gefährdungen aus.

Nach dem allgemeinen Stand der Technik werden zur Lösung des geschilderten Problems hauptsächlich Metalldetektoren, röntgenbasierte Geräte sowie chemische Sensoren eingesetzt. Dabei ergibt sich bei der Verwendung von Metalldetektoren der Nachteil, dass sie nur die Anwesenheit von Metall anzeigen, aber keine Informationen über physikalische Form oder Größe des verdächtigen Gegenstandes liefern können und die Anwesenheit von Sprengstoff nicht anzeigen. Röntgenbasierte Systeme arbeiten typisch auf der Grundlage ionisierender Strahlung im Transmissionsbetrieb; das zu untersuchende Objekt muss sich also zwischen der Strahlungsquelle und dem Empfänger befinden. Ein z.B. in einer Raumecke stehendes Gepäckstück kann jedoch auf diese Weise nicht untersucht werden. Außerdem senden solche Geräte ionisierende Strahlung aus, die erhebliche Vorsichts- und Schutzmaßnahmen erzwingt. Ein gesundheitsschädliches Risiko für die Bedienmannschaft bleibt dennoch wegen z. B immer möglicher Fehlbedienung oder des Versagens der Schutzvorrichtungen weiter vorhanden. Chemische Sensoren können den Inhalt eines Gepäckstückes ebenfalls nicht darstellen, sie reagieren nur auf die Anwesenheit bestimmter Substanzen.

Ziel des vorliegenden Auftrages ist es, eine neuartige Möglichkeit für eine ungefährliche, automatische und zerstörungsfreie Inneneinsicht in geschlossene Behältnisse zu untersuchen, die insbesondere als Bestandteil eines Multisensorkonzeptes einen Erkenntnisgewinn ermöglicht.

Dabei sollen spezifisch die Möglichkeiten untersucht werden, die ein miniaturisiertes Millimeterwellen-Radar für die angesprochene Anwendung bietet. Millimeterwellen bieten beste Voraussetzungen für kurz- bis mittelreichweitige Radaranwendungen. Dieser Bereich des elektromagnetischen Spektrums ist von essenzieller Wichtigkeit im Bereich der Sicherheitssensorik, wenn es darum geht, durch textile oder andere Arten dielektrischen Materials hindurchzuschauen. Selbst die Durchdringung von Wänden ist möglich, wenn es sich beim Baumaterial um nicht zu dichtes Material, wie Ziegel oder Beton, sondern um Leichtbauweise handelt. Die hohe Arbeitsfrequenz (typisch 24 – 220 GHz) erlaubt es, eine sehr schmale Antennenkeule (Pencil Beam) bei kleiner Antennen-Apertur zu realisieren. Daher kann mit realer Apertur (durch die Antennenkeule bestimmt) gearbeitet werden, solange der Abstand nicht zu groß ist (es handelt sich hier um eine Winkelauflösung).

Darüber hinaus kann jedoch das Verfahren der Synthetischen Apertur herangezogen werden, um eine sehr hohe geometrische Auflösung in der Ebene orthogonal zur Blickrichtung.

Während der klassische SAR Ansatz eine Bewegungskomponente in jeder der Hauptachsenrichtungen der Bildebene erfordert, kann das mathematische Prinzip übertragen werden auf eine Array-Anordnung in einer Achsenrichtung. Damit entfällt die Bewegung in dieser Richtung und die Empfangssignale für jeden Kanal stehen instantan zur Verfügung. Man nennt dieses Verfahren Multiple-in / multiple Out (MIMO) Methode [ ]. Dieses Verfahren ist verwand mit dem Verfahren der phasengesteuerten Gruppenantenne, die auch trägheitslos, durch entsprechende Phasensteuerung der einzelnen Kanäle, einen Schwenk der Antennenblickrichtung vollzieht. Hier entfallen jedoch die dort notwendigen Phasenschieber in jedem Kanal und werden durch eine Phasenmessung ersetzt, die im Auswerte-Algorithmus die entsprechende Blickrichtung aus den Messwerten extrahier. So ist die Phasenumschaltung durch eine Phasenmessung ersetzt, wodurch viel HF Hardware entfällt.

Im Verlauf der Entwicklung soll zunächst mit einem klassischen, mechanischen 2-D Scan begonnen werden und das Verfahren, insbesondere die Tauglichkeit für eine Bildgewinnung für den Inhalt von Gepäck und Paketen untersucht werden, in einem zweiten Schritt dann die technischen Möglichkeiten, die das MIMO Verfahren bietet, evaluiert werden. MIMO ist für die vorliegend Anwendung vor allem zur deutlichen Beschleunigung des Abtastvorgangs von Wichtigkeit.

Im Vordergrund der bisher geleisteten Arbeiten stand die Entwicklung der Hardware für einen einkanaligen Scan, d.h. die Entwicklung eines Miniaturradars hoher Entfernungsauflösung bei 80 GHz, der Aufbau eines linearen 2-D Scanners, die Entwicklung des miniaturisierten Backends, das auch schon für eine Mehrkanalige Datenaufzeichnung ausgelegt ist, sowie die erste Modellierung der mit dem MIMO Algorithmus zu erwartenden Ergebnisse.

2. Spezifikation des Miniaturradars

In Anlehnung an Erfahrungen, die bei Fraunhofer-FHR mit einem verwandten System gemacht wurden [ ], wurden die nachfolgend tabellierten Spezifikationen aufgestellt. Im Gegensatz zu dem FHR-System, bei dem ein Radar des Fraunhofer-IAF zum Einsatz kam, in dem Halbleiterelemente auf GaAs-Basis verwendet werden, soll hier mit kommerziellen Halbleiterbauelementen auf SiGe-Basis gearbeitet werden, die aus dem Automotive Bereich stammen und deutlich preiswerter sind. Die ausgewählten Bausteine sind auch jederzeit am Markt in quasi-beliebigen Stückzahlen verfügbar, was für die GaAs Bausteine des Fraunhofer-IAF nicht zutrifft.
Be idem hier aufgebauten Radar bei 80 GHz wurde also großer Wert auf die Möglichkeit einer späteren Fertigung als Seriengerät gelegt. Bezüglich der technischen Leistungsfähigkeit für den Gepäckscanner hat diese Umorientierung bzgl. der verwendeten Technologie keinen Einfluss. Das Gerät arbeitet nach dem FM-CW Verfahren, welches aufgrund des Dauerstrichverfahrens (CW) mit der maximalen Sendeleitung arbeiten kann und über die Frequenzmodulation hoher Bandbreite eine optimale Entfernungsauflösung erzielen kann.

Frequenzbereich :	*72 GHz - 80 GHz*
Signal-Bandbreite :	*> 8 GHz*
Wellenform:	*linear FM-CW*
Ausgangsleistung:	*> 0 - 10 dBm*
Dynamik:	*60 dB*
Entfernungsbereich:	*2 m – 20 m (min)*
Synchronisation:	*intern (100 MHz, 1 dBm, Ausgang für Synchronization der externen Elektronik) oder extern (wählbar)*
Betriebsspannung:	*24 V DC*
Antennen:	*konische Potterhörner, 3-dB Keulenbreite 18.5 °.*

2.1 80-GHz Radar

Die Zentraleinheit des Systems enthält neben dem Digitalteil und der Spannungsversorgung den Wellenformgenerator und den Zentralen Quarzoszillator, an den sämtliche im System generierten und verarbeiteten Frequenzen gebunden sind. Die Zentraleinheit wird über eine LAN Verbindung an einen für die Steuerung und Datenaufzeichnung notwendigen PC oder Laptop angeschlossen. Die im DDS (Direct Digital Synthesizer) erzeugte Frequenzrampe im Bereich 9 GHz bis 10 GHz liegt an der Frontbuchse der Zentraleinheit an. In Vorausschau auf spätere Untersuchungen mit einem mehr-elementigen Array ist Sorge getragen, dass hier im gegebenen Fall eine Aufteilung auf mehrere Radarkanäle erfolgen kann.
Zusätzliche I/O Ports erlauben die Einspeisung von zusätzlichen Daten, wie z.B. die Positionsdaten des Scanners und die Ansteuerung von Schrittmotoren eines mechanischen Scanners.

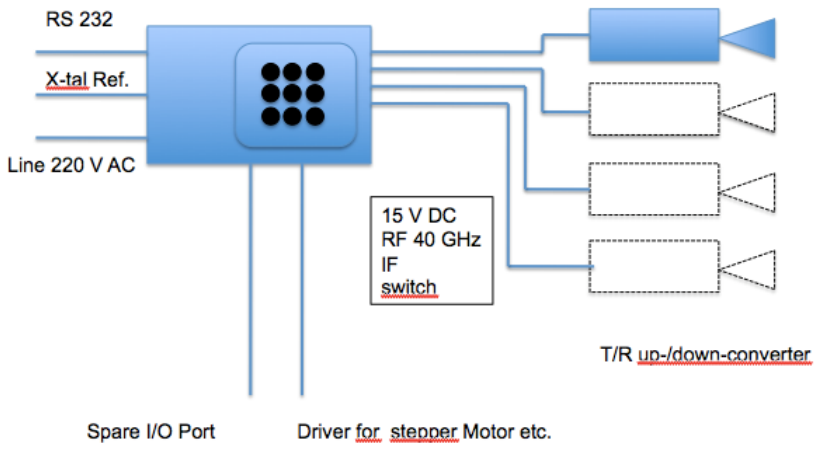


Abb. 1: Blockschaltbild des 80-GHz Radars

2.1.1 HF Front-End

Das FM-CW Front-End baut, wie oben gesagt, auf dem von einem DDS erzeugten, hochstabilen und reproduzierbaren Frequenzrampe im Bereich 9 GHz bis 10 GHz auf, die dann vervielfacht wird, wobei in den aufeinanderfolgenden Stufen weitere Verstärkung und Filterung zur Unterdrückung von Nebenlinien notwendig ist. Von der Auslegung der Basiseinheit können bis zu 8 Front-Ends betrieben werden, so dass später die Untersuchung des MIMO Verfahrens möglich ist.
Abbildung 2 zeigt den prinzipiellen Aufbau des Hochfrequenzteils ohne Filterung und Verstärkung.
.

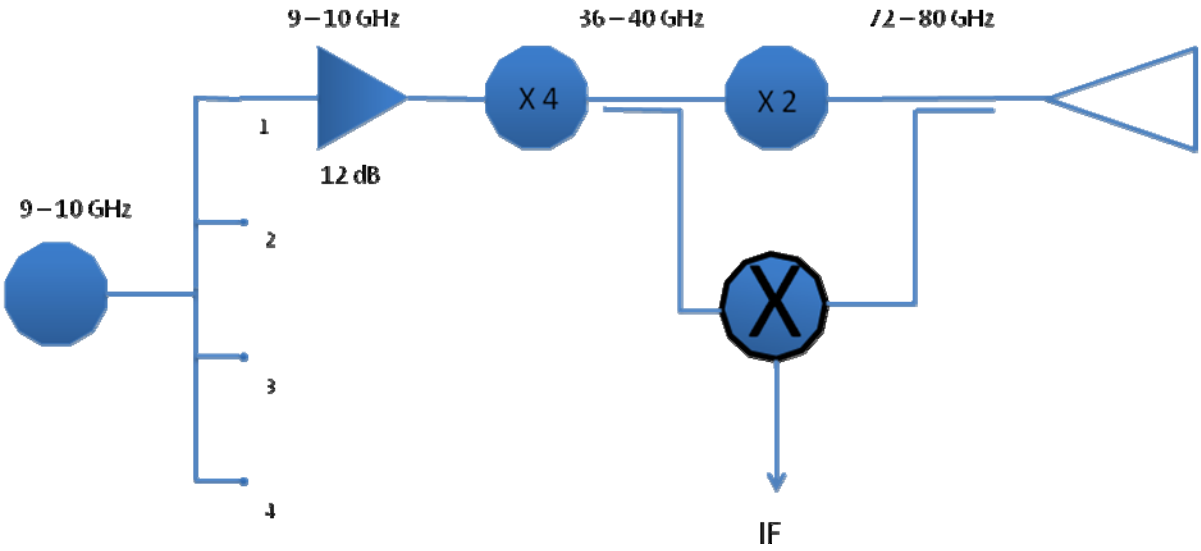


Abb. 2: Blockschaltbild eines HF-Kanals bei 80 GHz

Das Funktionsprinzip ist Folgendes:

Die Radarwellenform, eine lineare Frequenzrampe im Bereich 9 GHz bis 10 GHz wird mit Hilfe einer DDS Einheit (Hittite HMC769LP6CE), die im X-Band arbeitet und an einen Quarzoszillator mit einer Frequenz von 50 MHz gebunden ist, erzeugt. Die Referenzfrequenz kann entweder von aussen zugeführt werden oder der eingebaute Oszillator kann auf der gleichen I/O-Buchse herausgeführt werden und für die Synchronisation weiter Baugruppen herangezogen werden (Dazu ist ein Jumper auf dem DDS-Board entsprechend zu setzen). Die Ansteuerung der DDS-Einheit erfolgt über die Datenerfassungs- und Steuerungseinheit, die später beschrieben wird. Der Status der DDS-Einheit wird dabei über ein digitales Wort mit einer Genauigkeit von 24 Bit kontrolliert.

DDS-Performance		min	typ	max
Output Frequency		9.05 GHz		10.15 GHz
Output Power			12 dBm	
SSB Phase Noise @ 10 kHz Offset			-106 dBc/Hz	
SSB Phase Noise @ 1MHz			-140 dBc/Hz	
Step Size			24 Bit	

Tabelle 1: Daten der DDS-Einheit

Die Ausgangsleistung der DDS-Einheit (die initiale lineare Frequenzrampe) wird zur Frontbuchse der Steuereinheit geleitet. Hier ist eine zukünftige Aufspaltung in mehrere Kanäle möglich, wenn das MIMO Prinzip zum Einsatz kommt. Um die Verluste in dem ca 3 m langen Verbindungskabel zum Millimeterwellen-Transceiver auszugleichen, wird die Eingangsleistung über ein Verstärkerchip (Verstärkungsfaktor 12 dB) verstärkt, so dass die Leistung ausreicht, den nachfolgenden Vervierfacher anzusteuern. An seinem Ausgang steht eine Frequenzrampe über einen Bereich von 36.2 GHz bis 40.6 GHz bei einer Ausgangsleistung von

+18 dBm zur Verfügung. Diese wird von einem Leistungsteiler zum einen als Lokaloszillator auf den harmonischen Empfangsmischer gegeben, zum anderen auf einen weiteren Verdoppler, als Sendekanal. In diesem steht dann das Sendesignal mit einer Frequenzrampe von 72.4 GHz bis 81.2 GHz zur Verfügung. Die Ausgangsleistung beträgt 10 dBm. Über einen Koppler wird das Sendesignal auf die Antenne geleitet, welches als konisches Potterhorn gefertigt ist. Das über das gleiche Antennenhorn empfangene Empfangssignal wird dem (harmonischen) Mischer als Empfänger zugeleitet.

Die Sende-Empfangseinheit (Millimeterwellenteil) ist in ein Druckgussgehäuse eingebaut, welches an seiner Rückseite die Steckverbindungen zur Zentraleinheit (2 SMA-Buchsen, 1 Din-Buchse) enthält und an seiner Vorderseite das Antennenhorn.

Ein Schalter erlaubt das Abschalten des Senders, bei gleichzeitigem Betrieb des Empfängers. Diese Möglichkeit ist erforderlich, um bei einem späteren Array-Betrieb (z.B. ohne mechanischen Elevationsscan) eine Kalibrierung der einzelnen Kanäle durchführen zu können.

Diese Möglichkeit ist nur deshalb gegeben, weil das Konzept des Sende-Empfangsteils auf einer subharmonischen Mischung beruht, also das LO-Signal nicht erst direkt vor dem Sendehorn abgezweigt wird. Letzteres erfolgt üblicherweise beim FM-CW-Radar, erlaubt aber nicht, dass ein Empfangsbetrieb ohne Aussendung des Sendesignals möglich ist.

Abb. 3 zeigt Fotos des Sende-Empfangsteils. Die nähere Beschreibung der einzelnen Bauteile erfolgt in Anschnitt 3.

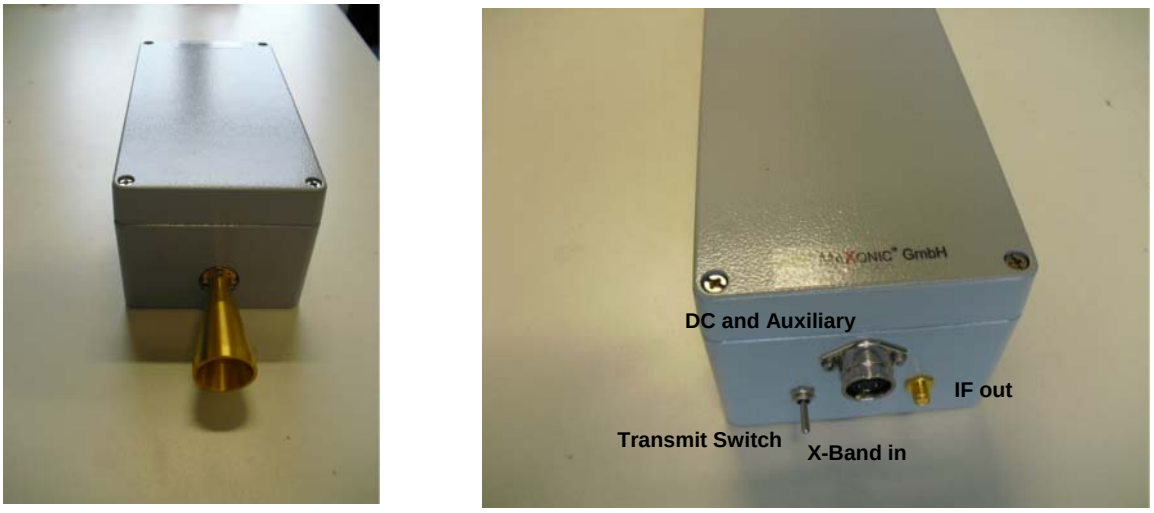


Abb. 3: Foto des Sende-Empfangsteils bei 80 GHz

2.1.2 A/D Wandlung und digitales Back-End

Das am Mischer erzeugte Zwischenfrequenzsignal wird mit einem ZF-Verstärker in seiner Leistung so angepasst, dass die Analog-Digitalwandler ausreichend ausgesteuert sind. Die Wandlung erfolgt wieder in der Zentraleinheit; die ZF-Signale werden ebenfalls über ein Kabel von ca. 3 m vom Front-End zur Zentraleinheit geleitet.

Das ZF-Signal wird erzeugt durch Mischung der Referenzfrequenz bei 40 GHz mit dem über die Laufzeit zum Zielpunkt und zurück verzögerten Rampensignal. Die Zwischenfrequenz ist gegeben durch die Beziehung:

$\Delta F = \frac{2 \cdot B \cdot R}{T \cdot c_0}$, mit B = Bandbreite, R = Entfernung, T = Chirp Periode, c_0 = Lichtgeschwindigkeit

Die beim Gepäckscanner vorliegenden geometrischen und elektrischen Randbedingungen sind gegeben durch B = 8 GHz (Entfernungsauflösung 1.9 cm), R = 20m (max), T = 4 ms. Damit erhält man eine ZF von 250 kHz oder bei einer Entfernung von 10 m 130 kHz. Bei weiterer Verkürzung der Messentfernung entsprechend niedriger.

Vor der A/D-Wandlung begrenzt ein Tiefpassfilter die Bandbreite, um Aliasing-Effekte zu vermeiden. In der Praxis erfolgt diese Filterung über einen Operationsverstärker, der auch gleichzeitig als Zwischenfrequenzverstärker dient und die Kabelverluste zwischen Messkopf und Zentraleinheit ausgleicht. Aufgrund der Scan-Einrichtung ist hier ein Koaxialkabel mit einer Länge von ca. 3 m notwendig.

Die Analog-Digitalwandlung wird von einem zentralen FPGA überwacht und geschieht bei 12-bit Wandlung mit einer maximalen Datenrate von 2Msamples/s. Diese Kapazität wird hier nicht benötigt, erlaubt aber später z.B. die Datenerfassung für eine Mehrkanalanordnung, die ja im weiteren Verlauf der Studie untersucht werden soll. Abb. 4 zeigt das Blockschaltbild der von uns „Pocket-Backend“ (wegen des miniaturisierten Aufbaus) bezeichneten Steuer und Datenwandlungs-/aufzeichnungs-Einheit.

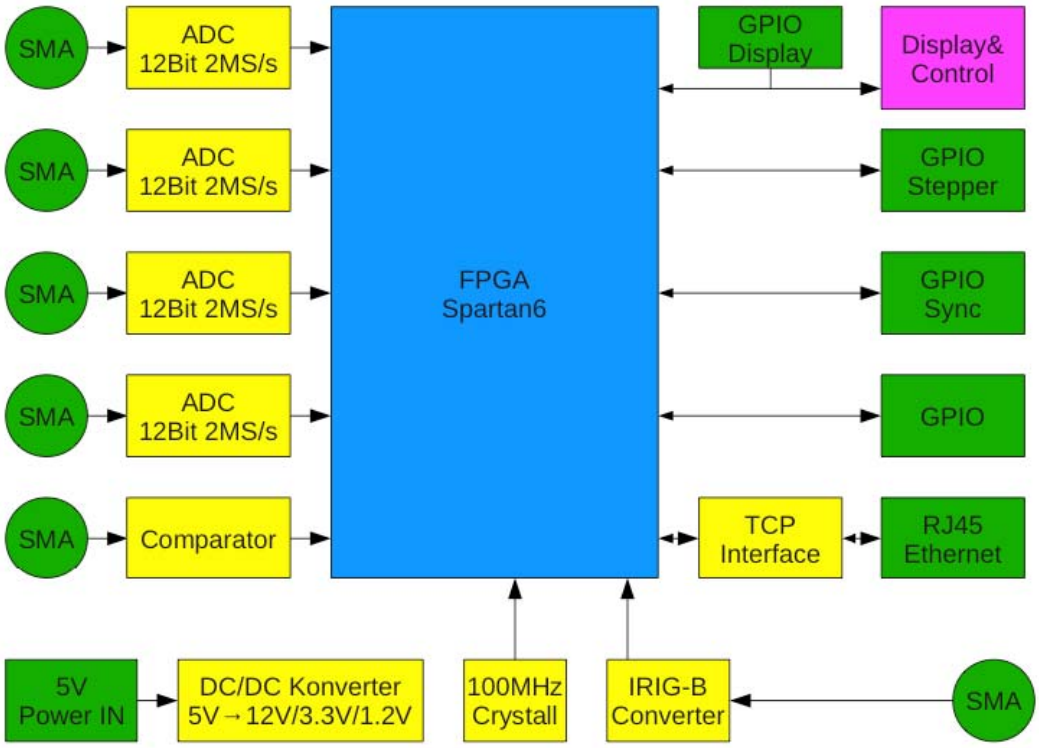


Abb. 4: Blockschaltbild des „Pocket Back-End“s

Das Back-end hat eine überdimensionierte Funktionalität, um es auch für andere Anwendungen einsetzen zu können. Grundsätzlich werden alle Betriebsparameter über eine Ethernet-Schnittstelle vom extern anzuschliessenden PC bzw. Laptop übertragen. Es ist jedoch auch möglich, die Parameter über einen Drehschalter zu wählen. Die eingestellten Werte sind an dem in die Zentraleinheit integrierten Display zu überwachen. Abb. 5 zeigt die Platine des „Pocket Back-ends“, Abb. 6 ein Foto der Zentraleinheit.

Abb. 5: Foto der „Pocket Back-End“ Platine

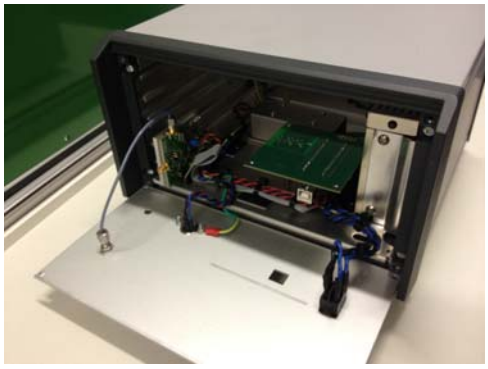


Abb. 6: Foto der Zentraleinheit (geöffnet)

Abb. 7: Zentraleinheit (geschlossen)

Die Verbindung zwischen der Zentraleinheit und dem Hochfrequenzteil erfolgt über ein Paar Koaxialkabel mit SMA –Steckern, wobei ein Kabel für die Übertragung der Grundfrequenz im 10-GHz-Bereich dient, das Andere für die Rückführung des Zwischenfrequenzsignals zum A/D-Wandler. Zusätzlich müssen Spannungen und Steuersignale übertragen werden. Dies erfolgt über ein mehradriges Kabel mit 8-poligen DIN-Buchsen (EN 60130.9). Der Anschluss der Motorsteuerung und Spannungsversorgung des Scanners erfolgt über 15-polige sub-D-Stecker.

2.2 Mechanischer Scanner

In der derzeitigen Ausbaustufe wird die 3-D-Bildgewinnung durch einen zweidimensionalen, mechanischen Scan durchgeführt. Die dritte Dimension, die Entfernungsinformation, wird über die Bandbreite des Sendesignals gewonnen. Da für die Bildgewinnung das Verfahren der Synthetischen Apertur in zwei Dimensionen herangezogen wird, ist die Bewegung des Radarsensors mit seiner (weit-ausleuchtenden) Antenne notwendig. Die dabei abgedeckte (synthetische) Apertur gibt die zu erzielende Bildauflösung vor. D.h. eine lineare Verschiebung des Antennenhorns über z.B. 30 cm ergibt die gleiche (synthetische) laterale Auflösung, die der einer Antenne mit einer Apertur von 30 cm entspricht. Tabelle 2 stellt Daten für die zue erzielende Winkelauflösung bei verschiedenen Scan-Längen (=synthetischer Apertur) bei 80 GHz und 35 GHz dar. Zu letzterer Frequenz gehörende Daten zeigen den Vorteil der höheren Frequenz hinsichtlich einer relativ kurzen Scanbewegung. Bei niedriger

Frequenz müsste bei gleicher lateraler Auflösung die Aperturlänge mehr als doppelt so groß sein. Abb. 8 zeigt das Scanschema und Abb. 9 den Entwurf des mechanischen Scanners.

Synthetische Apertur	**1 m**		**1,2 m**		**1.5 m**		**2 m**	
Frequenz GHz	**35**	**80**	**35**	**80**	**35**	**80**	**35**	**80**
3-dB Keule	0.59 °	0.22 °	0.49 °	0.18 °	0.40 °	0.15 °	0.30°	0.11°

Tabelle 2: Laterale Winkelauflösung bei realer oder synthetischer Apertur für 35 GHz und 80 GHz

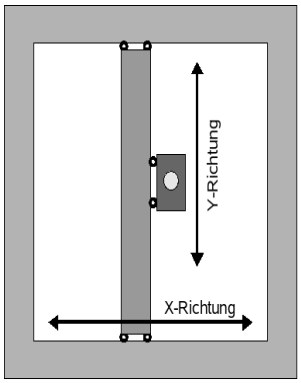


Abb. 8: Scanschema für die 2-D Apertur

Abb. 9: CAD-Modell des Scanners

Für den Aufbau des Scanners wurden Bauelemente der Firma ISEL herangezogen. ISEL stellt ein „Baukastensystem“ zur Verfügung, das aus standardisierten Aluminiumprofilen, geeigneten Eckverbindern und linearen Bewegungselementen sowie allen ansonsten notwendigen Bauteilen, wozu auch Schrittmotoren gehören, besteht.

Um ein elektromechanisches System, wie es für den Gepäckscanner notwendig ist, aufzubauen, sind bei Verwendung dieses Systems nur relativ wenige konstruktive Elemente zu entwickeln und zu bauen.

Für den Bewegungsvortrieb wurden Zahnriemenbasierte Linearsysteme ausgewählt. Diese bieten gegenüber ebenfalls verfügbaren Spindelantrieben den Vorteil, einen deutlich schnelleren Scan zu ermöglichen. Die Genauigkeit der Positionierung ist dabei ebenfalls ausreichen. Für den Azimut-Antrieb wurde eine etwas schwerere Ausführung (ISEL LEZ2) gewählt, da auf deren Linearschlitten der zweite Antrieb, der eine Typklasse leichter (ISEL LEZ3) ausfällt, montiert ist, somit eine schwerere Last zu bewegen ist.

Abb. 10 zeigt ein Foto des LEZ 2 aus dem ISEL Katalog. Abb.11 zeigt ein Foto des Schrittmotors für den Elevationsantrieb und Abb. 12 den aufgebauten Basisteils mit dem Azimutantrieb des Scanners. Tabelle 3 fasst die technischen Daten der Linearantriebe zusammen

Abb. 10: ISEL Linearantrieb LEZ2

Abb. 11: Eingebauter Schrittmotor für Elevationsantrieb

	Azimut-Antrieb	Elevationsantrieb
Typ	ISEL LEZ2	ISEL LEZ3
Zahnriemenantrieb	Spielfrei, Zahnriementeilung 5mr, Breite 25 mm	
Vorschub	5 m/s	5 m/s
Schlitten	WS3, 176 x 130 mm2	WS3, 176 x 130 mm2
Vorschub	70 mm/Umdr.	70 mm/Umdr.
Wiederholgenauigkeit	< ± 0,2 mm	< ± 0,2 mm
Endschaltergenauigkeit	< 0,1 mm	< 0,1 mm

Tabelle 3: Technische Daten der Antriebe für horizontalen und vertikalen Vorschub

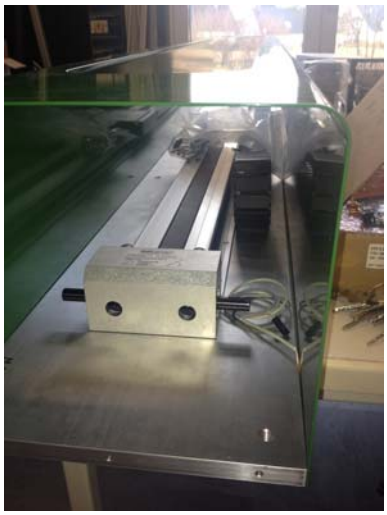


Abb. 12: Fotos des Horizontalantriebes

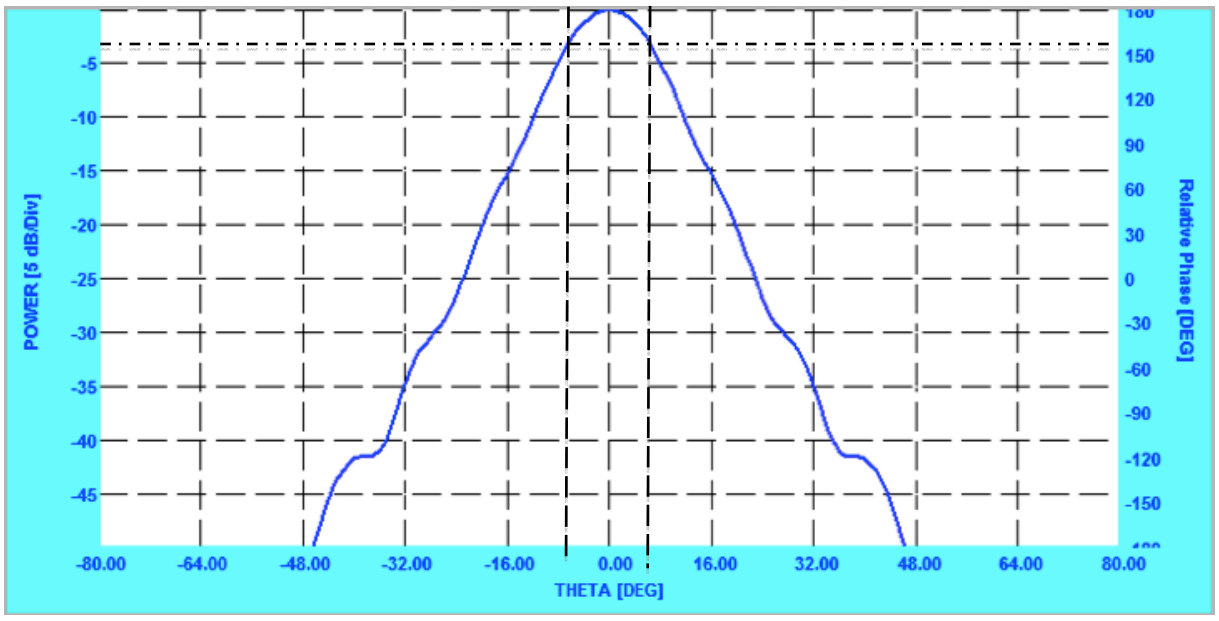
Die Ansteuerung der Schrittmotoren für die Linearantriebe erfolgt über Treiber, die in der Nähe der Motoren angebracht sind. Die Steuerleitungen kommen aus der Zentraleinheit und die Steuersignale werden dort auf der „Pocket-Backend“-Platine erzeugt und in der Ablaufsteuerung, die, wie oben erwähnt, auch die Radarsteuerung (Rampenablauf) und die D/A-Wandlung überwacht, mit berücksichtigt. Die Positionsdaten werden in das erzeugte Datenpaket integriert.

4. Beschreibung der Schlüsselkomponenten

Nachfolgend werden einige Schlüsselkomponenten näher erläutert. Die meisten dieser Komponenten wurden speziell für die vorliegende Anwendung neu entwickelt, wobei in der Regel auf kommerzielle Halbleiterelemente zurückgegriffen wurde, die z.T. in Form von Multichipmodulen entsprechend den hier vorliegenden geometrischen und elektrischen Anforderungen aufgebaut wurden. Die trifft sowohl auf die passiven Bauteile, wie die Antenne, die nach dem „Potter-Horn“ Design entwickelt wurde, um ein möglichst gutes Nebenzipfelverhältnis (Seitenkeulen abseits der Hauptrichtung) zu erzielen, als auch die Vervielfacher und Verstärker-Bausteine.

4.1 Antenne

Wie erwähnt, kamen beim Antennenentwurf die Designkriterien eines “Potter-Horns” zur Anwendung. Das Antennenhorn wird durch einen zirkularen Hohlleiter der Normgröße WR-10 gespeist. Falls es die experimentellen Erfordernisse notwendig machen, kann hier sehr leicht eine Antenne anderer Dimensionierung über den Normflansch angeschlossen werden. (z.B. für engere Bündelung bei größerer Messentfernung), dabei war es im gegebenen Fall sehr wichtig, auf ein niedriges Stehwellenverhältnis (VSWR) zu achten, damit der Dynamik-Bereich des Radars nicht beeinträchtigt wird. Abb. 12 gibt ein Datenblatt der Antenne, Abb. 13 zeigt ein Foto des Potter-Horns.



Aperture	**24.935**	**Turn Centre**	**-16.558 mm**	**Cross Polarity**	**0%**	**Feed**	**Conical Horn**
Semifl.:	**13.5°**	**Phase Centre**	**-13.714 mm**	**Wo -6.483 mm**	**@ -13.420 mm**	**Aperture**	**24.935 mm**
Lens	**---------**	**Gain**	**23.2 dB**	**3-dB Beam**	**12.46 °**	**Frequ.**	**77.4 GHz**
Pol	**normal**	**Beam Eff.**	**99.9 %**	**8.7 dB Beam**	**21.66 °**		

Abb. 12: Antennencharakteristik für das verwendete Potter-Horn

Abb. 13: Foto des Antennenorns

4.2 10-dB Koppler

Der Koppler dient als Send-Empfangs-Weiche und trennt den Sende- vom Empfangszweig direkt vor/hinter der Antenne. Abb. 14 zeigt ein Foto des Kopplers, Abb. 15 die Gesamtanordnung mit Antenne, Modenwandler und Koppler sowie die Flansche für Sende- und Empfangszweig.

Abb. 14: Sende-/Empfangs-Koppler

Abb. 15: Antenne, Modenwandler, Koppler und Krümmer

4.3 Verdoppler 40 – 80 GHz

Der Verdoppler im Sendezweig erzeugt die Ausgangsleistung bei der Betriebsfrequenz von 80 GHz. Er ist ein passives Element, das bei ausreichende Eingangsleistung (am Ausgang des Vervierfachers) genügend viel Leistung für den Sendebetrieb erzeugt. Die Eingangsleistung wird in Koaxialtechnik eingekoppelt, der Ausgang ist ein Flansch WR-10. Abb. 16 zeigt ein Foto.

Abb. 16: Verdoppler 40 GHz -> 80 GHz

4.4 Vervierfacher X-Band – Ka-Band, Ka-Band Verstärker, 3-dB-Koppler

Der oben beschriebene Verdoppler wird gespeist von der Ausgangsleistung eine aktiven Vervierfachers, der die im Wellenformgenerator erzeugte Frequenzrampe im X-Band multipliziert. Die Leistungsdaten sind in Tabelle 4 zusammengefasst. Der Baustein ist sehr breitbandig ausgelegt. Um ausreichende Leistung für die nachfolgenden Stufen (Verdoppler im Sendezweig und LO im Empfangszweig zur Verfügung zu haben, folgt ein Ka-Band Leistungsverstärker zur Ansteuerung der Folgestufen. Abb. 17 zeigt ein Foto des Bauelementes. Der Eingangsport als SMA-Stecker, der Ausgang als 3.5 mm Buchse ausgelegt.

Abb. 17: Foto des Vervierfachers X-Band – Ka-Band

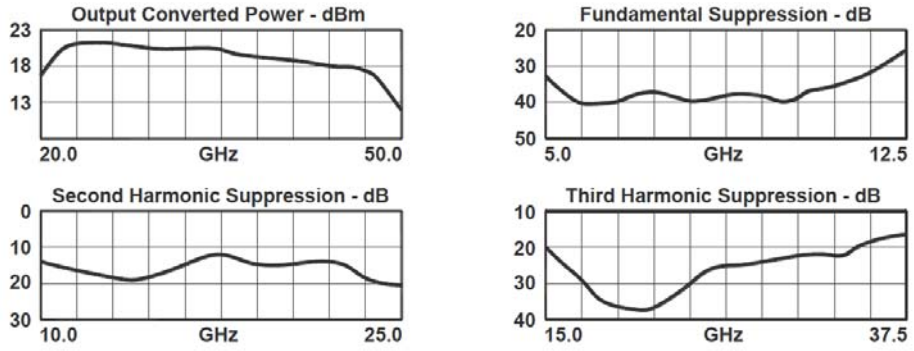


Abb. 18: Leistungsdaten des Vervierfachers

Leistungsteiler, wie im Foto der Abb. 19 gezeigt, ist mit Verstärker und dem harmonischen Empfangsmischer in einer Baueinheit integriert.

Parameter	Input [GHz]	Output [GHz]	Min	Typ	Max
Frequency $_{in}$	5.0 – 12.5				
Power$_{in}$			+ 5dBm		+ 8 dBm
Frequency $_{out}$ Power$_{out}$		20.0 – 47.0 47.0 – 50.0	+ 13 dBm + 9 dBm	+ 18 dBm + 15 dBm	
Suppression Fundamental Second (F2) Third (F3)		 5.0 - 12.0 10.0 – 25.0 15.0 – 37.5		 37 dB 15 dB 25 dB	
Bias [mA] + 5 V DC - 5V DC				 400 mA 15 mA	 500 mA 30 mA

Table 4: Charakteristischen Daten des Vervierfachers

Abb. 19: Microstrip Layout des Breitband 3-dB-Kopplers im Ka-Band

4.5 Zentraleinheit

Abb. 20 zeigt das Foto der Zentraleinheit. Sie enthält die Netzgeräte, das „Pocket-Backend“, also die Digitalplatine mit A/D-Wandlung sowie den Rampengenerator und Referenzoszillator.

Abb. 20: Zentraleinheit mit Front geschlossen und geöffnet

Abb. 21 zeigt das der Zentraleinheit zugrunde liegende Schaltschema als Blockschaltbild.

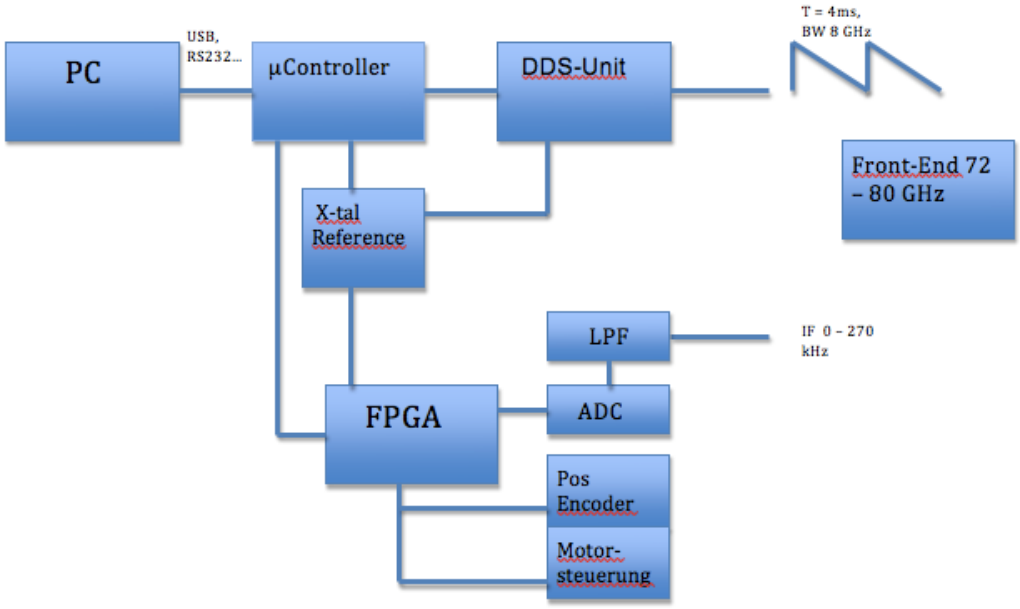


Abb. 21: Blockschaltbild der Zentraleinheit

Abb. 22 zeigt die Digitalplatine und das ihr zugrunde liegende Layout. Die Platine wurde als sechslagiges Design extern bei der Firma CB-Multiboard hergestellt.

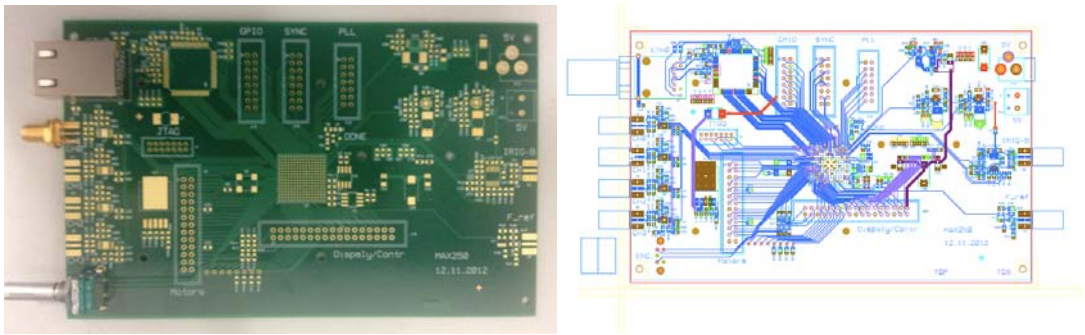


Abb. 22: Digital Board, Foto und Layout

Das Kernelement des Digitalboards ist ein XILINX FPGA. Die Platine ist, wie schon oben erwähnt, so ausgelegt, dass ein späterer Mehrkanalbetrieb ohne großen Neuentwicklungen möglich ist. Um im gegebenen Fall die Anzahl der Eingangskanäle über die Zahl vier hinaus zu erweitern, wäre ein Multiplexbetrieb notwendig, der jedoch ohne Probleme implementiert werden kann. Die Layout-Zeichnungen des Boards befinden sich im Anhang des Berichtes.

5. Off-Line Software zur Bilderzeugung

5.1 Auswerteprogramm für SAR mit 2-D-Scan

Die Daten stehen am Ethernet-Port der Zentraleinheit in ASCII codiert zur Verfügung. Mit einem einfachen Aufzeichnungsprogramm werden sie auf die Festplatte des PCs gespeichert. Die Auswertung erfolgt z.Zt. im off-line Betrieb, jedoch direkt im Anschluss an die Datenaufzeichnung. Zur Evaluierung wurde die Bildgenerierung aus den Rohdaten zunächst in MATLAB programmiert und getestet. Zur Beschleunigung der Bilderzeugung wurde inzwischen das Auswerteprogramm in C++ verfasst. Die Menü-Sprache ist als Deutsch oder Englisch einstellbar.

Der Zugang zur Auswertung erfolgt über ein graphisches Interface, ebenfalls in C++ geschrieben. Abb. 23 zeigt ein Beispiel für das Eingangsmenü.

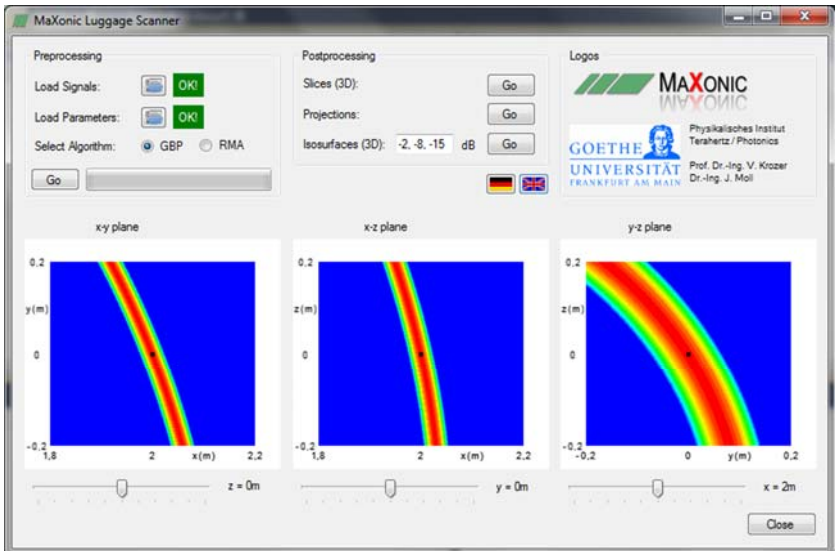


Abb. 23: Darstellungsmenü des Auswerteprogramms

Die Messdaten werden als ASCII-Daten eingelesen. Hierzu muss man nur einen Ordner auswählen. Die Parameter-Datei muss man auch über einen Button auswählen. Falls es ein Problem beim Einlesen gibt, wird eine Fehlermeldung angezeigt.
Das Vorverarbeitungsmenü, im Bild links oben, erlaubt eine Auswahl zwischen unterschiedlichen Rekonstruktions-Algorithmen (GBP = Global Backprojection Algorithm, RMA = Range-Migration-Algorithm). Der Verarbeitungsfortschritt wird in einem Zustands-Balken angezeigt. Nach erfolgter Verarbeitung kann zwischen unterschiedlichen Visualisierungsoptionen gewählt werden. Die erste Art und Weise erlaubt die Darstellung von Schnitten durch das 3-D Bildvolumen. Zu jeder Hauptebene gibt es einen Schieberegler, der interaktives Drehen des Bildes erlaubt, um verdächtige Signaturen im Detail untersuchen zu können. Im gezeigten Beispiel wird ein Punktziel im Anstand von 2 m dargestellt. Es ergibt sich dabei eine Darstellung, die, wie zu erwarten, das Punktziel in einem gemeinsamen Schnittpunkt darstellt. Mit der Punktzielmodellierung wurde die Funktion des zugrundeliegenden GBP-Algorithmus validiert.

Die zweite Visualisierungsmethode bestimmt die Projektion auf alle drei kartesischen Richtungen. Dazu werden die absoluten Maximalwerte der komplexen 3-D-Daten bestimmt.

Die dritte Darstellungsmethode nutzt eine Isoflächen-Darstellung, wobei die Wertigkeit der Iso-Flächen interaktiv eingestellt werden kann, um bestimmte Signaturen schwächer oder stärker darstellen zu können.

Zur Visualisierung wurde die OpenTK-Bibliothek (http://www.vtk.org/) benutzt. Dort gibt es auch eine Schnittstelle zu C++, die hier genutzt wird.

Das Auswerteprogramm wurde mit simulierten Daten für verschiedene Anordnungen von Punktstreuern getestet. Abb. 24 zeigt Beispiele für verschiedene Anordnungen.

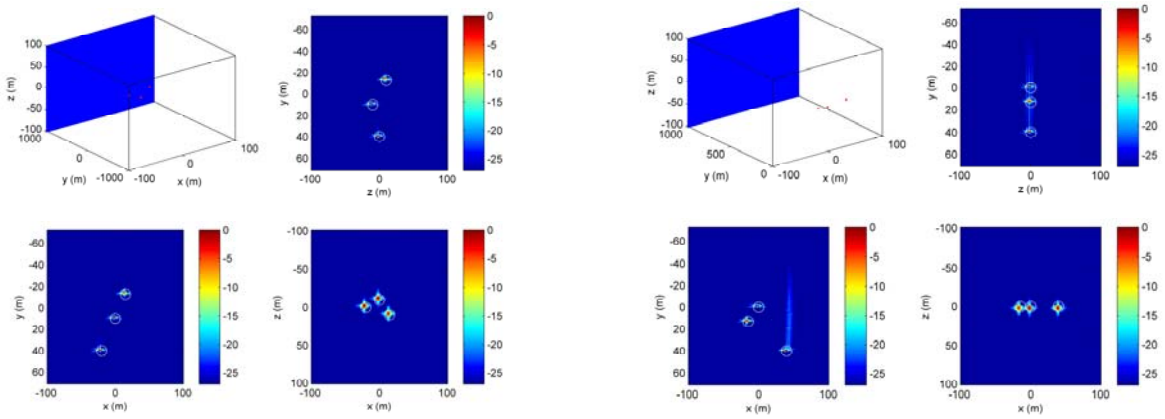


Abb. 24: Ergebnisse für zwei unterschiedliche Anordnungen von Punktstreuern

5.1 Auswerteprogramm für SAR mit 2-D-Scan

Zur Vorbereitung einer Weiterentwicklung des zunächst implementierten 2-D-Scanners in Richtung eines linearen Scans mit MIMO-Verarbeitung in Elevation, d.h. Nutzung eines (zunächst) vierelementigen linearen Arrays in Elevation, wurde die entwickelte Software bereits erweitert und validiert. Abb. 25 zeigt ein Ergebnis, wieder für eine Anordnung von drei Punktstreuern. Dabei wurde RMA-Algorithmus eingesetzt, die modellhaft angenommenen Parameter sind in Tabelle 5 zusammengefasst. Die angenommenen Streuzentrenpositionen gibt Tabelle 5 an.

Parameter	Wert
Array (Elevation)	4 Elemente
Wellenform	FM/CW
Frequenzrampe	70 GHZ – 80 GHz
Messpositionennumerische Apertur	50 cm
Messpunkt (Az)	5mm
Entfernung	3 m

Tab. 4: Simulierte MIMO Parameter

	X [m]	Y [m]	Z [m]
# 1	0	0	0
# 2	0.1	0.1	0.1
# 3	-0.1	-0.05	0.1

Tab. 5: Simulierte Position der Punktziele

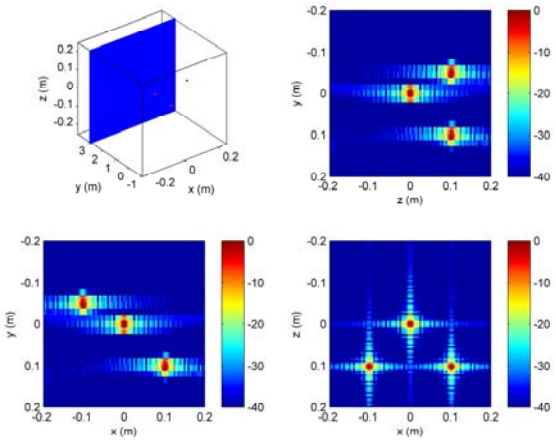


Abb. 25: Ergebnis für die MIMO Simulation

6. Stand der Arbeiten und Ausblick

Die hier zusammengefassten Ergebnisse entsprechen dem Stand der Arbeiten zu Ende Januar 2013. Es wurden eine vielfältige Literatiurstudie durchgeführt und insbesondere basierend auf entsprechenden wissenschaftlichen Arbeiten die ALgorithmik zur Auswertung entwickelt, wobei auf eine schnelle Signalverarbeitung Wert gelegt.

Zurzeit ist die beschrieben Hardware noch nicht vollständig implemetiert, da noch die Mischerstufe des Empfängers fehlt. Sie befindet sich derzeit im Aufbau, die Halbleiterchips sind inzwischen vorhanden. Sobald diese fertiggestellt ist, kann zunächst das Radar selbst getestet werden. Es ist nicht auszuschliessen, dass noch Nebenlinien gefiltert werden müssen und/oder Verstärkungen angepasst werden müssen, um eine optimale Leistungsfähigkeit nachzuweisen. Sobald diese Tests durchgeführt wurden, kann das Gesamtsystem in Betrieb genommen werden. Alle anderen Baugruppen bzw. Softwarekomponenten wurden bereits unabhängig voneinander getestet.

Im Anschluss können erste Versuche mit dem Gerät an typischen Anwendungsfällen im Rahmen VESPER^{Plus} durchgeführt werden.

Die Ziele laut Zeitplan wurden bis auf die Inbetriebnahme des Gesamtsystems erreicht. Es wurden schon Arbeiten durchgeführt, die erst während der restlichen Periode (bis Ende 2013) des Projektes anfallen würden. Hier ist insbesondere die Entwicklung eines MIMO Array-Ansatzes zu nenne, die von der Software bereits nahezu abgeschlossen ist.

Vorgesehen ist noch eine voll-realzeitliche Signalverarbeitung.

7. Anhang

Nicht öffentlich