



Hochschule  
Bonn-Rhein-Sieg  
University of Applied Sciences



---

# Abschlussbericht

## Resilienz des Deutsch-Französischen Eisenbahn- Hochgeschwindigkeitsverkehrs – REHSTRRAIN

### Teilvorhaben 6: „Abstandsfähige Sicherheitsmaß- nahmen“

Förderkennzeichen 13N13787

Förderzeitraum 01.10.2015 – 31.01.2018

**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](mailto:peter.kaul@h-brs.de)

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung

Autoren: Stephan Maurer, Peter Kaul



# **Schlussbericht**

**zum Verbundprojekt**

**Resilienz des Deutsch-Französischen Eisenbahn-  
Hochgeschwindigkeitsverkehrs – REHSTRAIN**

**Teilvorhaben 6: „Abstandsfähige Sicherheitsmaßnahmen“**

**Förderkennzeichen 13N13787**

**Förderzeitraum 01.10.2015 – 31.01.2018**

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

## Inhalt

Abbildungsverzeichnis .....	3
I. Kurzdarstellung .....	5
I.1 Aufgabenstellung .....	5
I.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde.....	5
I.2.1 Motivation.....	5
I.2.2 Institut für Sicherheitsforschung der Hochschule Bonn-Rhein-Sieg .....	5
I.3 Planung und Ablauf des Vorhabens .....	6
I.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand .....	6
I.4.1 Sprengstoffdetektion .....	6
I.4.2 Detektion von Triacetontriperoxid und Präkursoren .....	8
I.4.3 Detektion radioaktiver Quellen .....	11
I.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen .....	12
II. Eingehende Darstellung .....	12
II.1 Detaillierte Ergebnisse und Verwendung der Zuwendung.....	12
II.1.1 Nutzeranforderungen .....	12
II.1.2 Bedrohungsspektrum .....	12
II.1.3 Bestandsaufnahme .....	13
II.1.4 Präventionsstrategie .....	13
II.1.5 Kostenanalyse der Sicherheitsmaßnahmen .....	16
II.1.6 Bestandsaufnahme bzgl. Abstandsfähiger Sensoren/Detektoren und Trends zur Entdeckung von unkonventionellen Spreng- und Brandvorrichtungen (USBV) 16	
II.1.7 Aufbau eines Testbeds für CE –Sensoren .....	18
II.1.8 Entwicklung eines Multisensordatenfusion-Sicherheitskonzeptes .....	32
II.1.9 Entdeckung einer schmutzigen Bombe.....	33
II.1.10 Entdeckung relevanter organischer Marker mittels Mikrowaagen .....	34
III. Literatur .....	37

## Abbildungsverzeichnis

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. © Christopher Becher ..... 8
Abbildung 2:	Übersicht über die Dampfdrücke ausgewählter Sprengstoffe [Ewing 2013] HP: Wasserstoffperoxid, DADP: Diacetonperoxid, TATP: Triacetonperoxid, EGDN: Ethylenglycoldinitrat, NG: Nitroglycerin, PETN: Pentaerythryltetranitrat, 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..... 9
Abbildung 3:	Schematischer Aufbau der Gasmessstrecke ..... 14
Abbildung 4:	Konzentrationsabhängige Metalloxidgassensorantworten auf Aceton, Ethanol, H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> , Methylethylketon, Nitromethan und TATP ..... 15
Abbildung 5:	Schematischer Aufbau des Testbeds. Die blauen Pfeile indizieren die Luftströmung. .... 18
Abbildung 6:	Bemaßte Skizze und Foto des Testbeds in der Endausbaustufe, die horizontalen Pfeile indizieren die Luftströmung ..... 19
Abbildung 7:	Zuluftseite des Portals. a) mit Schlitzblende, b) ohne Schlitzblende 20
Abbildung 8:	a) Abluftseite des Portals mit Leitblechen. b) Abluftkanal mit Sensorarray, Photoionisationsdetektor (PID) und Luftströmungssensor..... 21
Abbildung 9:	Messpunkte zur Ermittlung des Strömungsprofils ..... 22
Abbildung 10:	Strömungsprofil für (A) 80 L/s und (B) 60 L/s Zuluft. Die Schlitzblendenbreite betrug jeweils $b_{\text{oben}} = 4 \text{ cm}$ und $b_{\text{unten}} = 1,5 \text{ cm}$ ..... 22
Abbildung 11:	Photoionisationsdetektor (PID)..... 23
Abbildung 12:	MOS-Array und Auslesem modul für die Halbleitersensoren ..... 24
Abbildung 13:	Substanzidentifizierung aus extrahierten Merkmalen der Sensorsignale a). Die Principal Component Analyse berechnet Hauptkomponenten b), die mit bekannten Clustern in Score plot c) verglichen werden und identifiziert Substanzen ..... 25

Abbildung 14:	Ablaufschema des Klassifikationsalgorithmus. Links: die im Einzelnen ablaufenden Schritte der Klassifizierung. Rechts: Kurzanmerkungen und Erläuterungen.....	26
Abbildung 15:	Geometrische Betrachtung der PCA. A: Ausgangsdaten, B: gedrehtes Koordinatensystem, C: Elimination nicht benötigter Hauptkomponenten (Achsen).....	28
Abbildung 16:	Screenshot der Auswertesoftware mit Sensorantworten auf die Exposition von Azeton. a) Signale der vier MOS, b) mittlere Luftgeschwindigkeit in Zu- und Abluft, c) Signal des PID, d) Scoreplot der PCA.....	29
Abbildung 17:	Feldversuch Mensa Rheinbach, a) Skizze des Eingangsbereichs mit Testbed, b) Versuchsbetrieb .....	30
Abbildung 18:	Auszug aus den Sensormessdaten des Feldversuchs.....	31
Abbildung 19:	Schematischer Versuchsaufbau zur Datenfusion von Bewegungsdaten und Sensorsignalen .....	32
Abbildung 20:	Videobeobachtung des Beobachtungsfeldes mit Kinect Kameras von oben .....	33
Abbildung 21:	Das user interface zum Versuchsaufbau. Links die Personentracks als nummerierte Kreise und die $\gamma$ -Detektoren als Quadrate. Auf der rechten Seite die Intensität der gemessenen $\gamma$ -Strahlung der einzelnen Detektoren. ....	33
Abbildung 22:	Strahlungsintensität der $^{137}\text{Cs}$ 3,7 MBq Quelle in Abhängigkeit der Entfernung (cps = counts per second). Die blaue Linie indiziert die natürliche Hintergrundstrahlung. ....	34
Abbildung 23:	Einfluss verschiedener Abschirmmaterialien und des Abstands der radioaktiven Quelle ( $^{137}\text{Cs}$ 0,185 MBq) auf den Detektor .....	34
Abbildung 24:	Quarzmikrowaage (QMB).....	35
Abbildung 25:	Affinitätsmaterialien zur Beschriftung von QMBs. Stoffbezeichnungen: 1 Natriumcholat, 2 MPI-7, 3 per-Allyl- $\gamma$ -cyclodextrin, 4 Huber-1,3,5-I6, 5 OD_202.....	36
Abbildung 26:	QMB-Messgerät mit 2€ Münze zum Größenvergleich.....	37

## **I. Kurzdarstellung**

### **I.1 Aufgabenstellung**

Das Ziel dieses Teilvorhabens ist es, eine Testumgebung zu realisieren, mit der Personen und Gepäck im Zugangsbereich von Bahnhöfen oder Zügen berührungslos auf bestimmte gasförmige Explosivstoffe bzw. deren Präkursoren, sowie radioaktive Substanzen, als Bestandteil von sog. „dirty bombs“, kontrolliert werden können. Dazu soll, auf der Basis der bisherigen Arbeiten des Antragstellers und seiner Unterauftragnehmer im gemeinsam bearbeiteten Projekt HAMLeT, ein verbessertes und weiterentwickeltes System zur berührungslosen Gassensorik und  $\gamma$ -Strahlendetektion aufgebaut werden. Die bisherigen Arbeiten haben in einer Machbarkeitsstudie gezeigt, dass es durch einen datenfusionierten Ansatz aus kinematischen und attributorischen Daten möglich ist, innerhalb von getrackten Personenströmen Einzelpersonen automatisiert zu erkennen, die bestimmte sensorische Merkmale (wie z.B. das Vorhandensein von ausgasenden chemischen Substanzen) aufweisen. Hierzu ist es notwendig, ein räumlich verteiltes Sensornetz aufzubauen, um eine räumlich-zeitlich-sensorische Bewertung der Personenströme vornehmen zu können.

### **I.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde**

#### **I.2.1 Motivation**

Die allgemeine Bedrohungslage, die über das Gesamtvorhaben bearbeitet werden soll, sieht die Möglichkeit des Angriffs durch Terroristen auf die Infrastruktur „Eisenbahn“ unter anderem mit Sprengmitteln, auch unter Beimischung von radioaktivem Material, vor. Eine Kontrolle von Passagieren und Gepäck findet bisher nicht statt und bietet potentiellen Attentätern vielfach ungehinderte Aktionsmöglichkeiten. Bedingt durch die derzeitige Struktur des öffentlichen Bahnverkehrs als Massenverkehrsmittel mit teilweise sehr hohem Fahrgastaufkommen ist der Einsatz von berührungslosen bzw. nicht-kooperativen Kontrolleinrichtungen, die für die Personenströme keine wesentliche Einschränkung bedeuten, das wünschenswerte Ziel. Die technische Umsetzung solcher Maßnahmen stellt eine große technische Herausforderung dar, um den störungsfreien Betrieb des Systems Schiene zu gewährleisten und gleichzeitig das Sicherheitsniveau zu erhöhen.

#### **I.2.2 Institut für Sicherheitsforschung der Hochschule Bonn-Rhein-Sieg**

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.

Die Arbeiten wurden von der Hochschule Bonn-Rhein-Sieg (HBRS) als Verbundpartner durchgeführt. In die Aktivitäten waren im Unterauftrag eingebunden die Fraunhofer FKIE (Entdeckung einer schmutzigen Bombe) und die Johannes Gutenberg Universität Mainz (Verwendung einer Quarzmikrowaage zum Nachweis volatiler organischer Komponenten).

### **I.3 Planung und Ablauf des Vorhabens**

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

### **I.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand**

Im Eisenbahnverkehr findet im Moment keine Kontrolle von Personen oder Gepäck auf Explosivstoffe oder andere Bedrohungen statt. Die zum Schutz kritischer Infrastruktur genutzten technischen Möglichkeiten werden z.Z. fast ausschließlich im Bereich der Luftfahrt über Portallösungen und individuelle Personenüberprüfungen eingesetzt. Als erste Ansätze für Schutzmaßnahmen im Fährverkehr wurde der Einsatz von Detektionsverfahren im Hafen und an Bord von Schiffen im Rahmen des BMBF Projekte VESPER<sup>Plus</sup> evaluiert.

#### **I.4.1 Sprengstoffdetektion**

Bei der Detektion von Explosivstoffen ist das Ziel festzustellen, ob sich ein Explosivstoff in einem Objekt (Gepäck, Frachtstück, Fahrzeug) oder an einer Person befindet. Es existiert eine Reihe von Verfahren, mit denen Objekte durchleuchtet werden können. Die Bekanntesten sind die auf Röntgenstrahlung basierenden, stationären Systeme an Flughäfen zur Gepäckkontrolle. Weitere Verfahren nutzen die Neutronenaktivierungsspektroskopie oder die Kernspinresonanzspektroskopie [Maneesha 2003, Lockwood 2003, Womble 2001]. Diese Verfahren weisen jedoch eine Reihe von Nachteilen auf. So ist keine chemische Identifizierung des (Explosiv-) Stoffes 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, zeitaufwändige Untersuchung per Hand notwendig. Darüber hinaus sind die dafür nötigen Systeme teuer, groß,

stellen hohe Anforderungen an die Infrastruktur und verwenden häufig gesundheitsgefährliche Strahlungsarten (Röntgen- oder Neutronenstrahlung). 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 existiert eine Vielzahl unterschiedlicher Systeme. Die Palette reicht von miniaturisierten und adaptierten Verfahren der instrumentellen Analytik und der klassischen Nasschemie (Gaschromatografie mit Wärmeenergie- oder Chemolumineszenzdetektor, Farbtests) über neueren Entwicklungen auf Basis der Ionenmobilitätsspektrometrie oder elektronischer Nasen bis hin zu biologischen bzw. biochemischen Sensoren wie dem Spürhund und antikörperbasierten Schnelltests [NIAG 2005, Moore 2005, Kolla 1997, Gardner 2004, Zalewska 2013, Lopez 2014, Bouhadid 2012, Caron 2010, Blue 2013, Lazarowski 2014]. 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 Wischprobenahme zugänglich gemacht werden. Eine Probenahme über die Gasphase hat den Vorteil, dass berührungslos untersucht werden kann und im Prinzip ein schnelles Absuchen ermöglicht werden kann. Im Bereich der Flughafensicherheit haben sich überwiegend Geräte mit Wischprobenahme durchgesetzt. Abbildung 1 gibt einen Überblick über die Verfahren zur Sprengstoffspurendetektion.

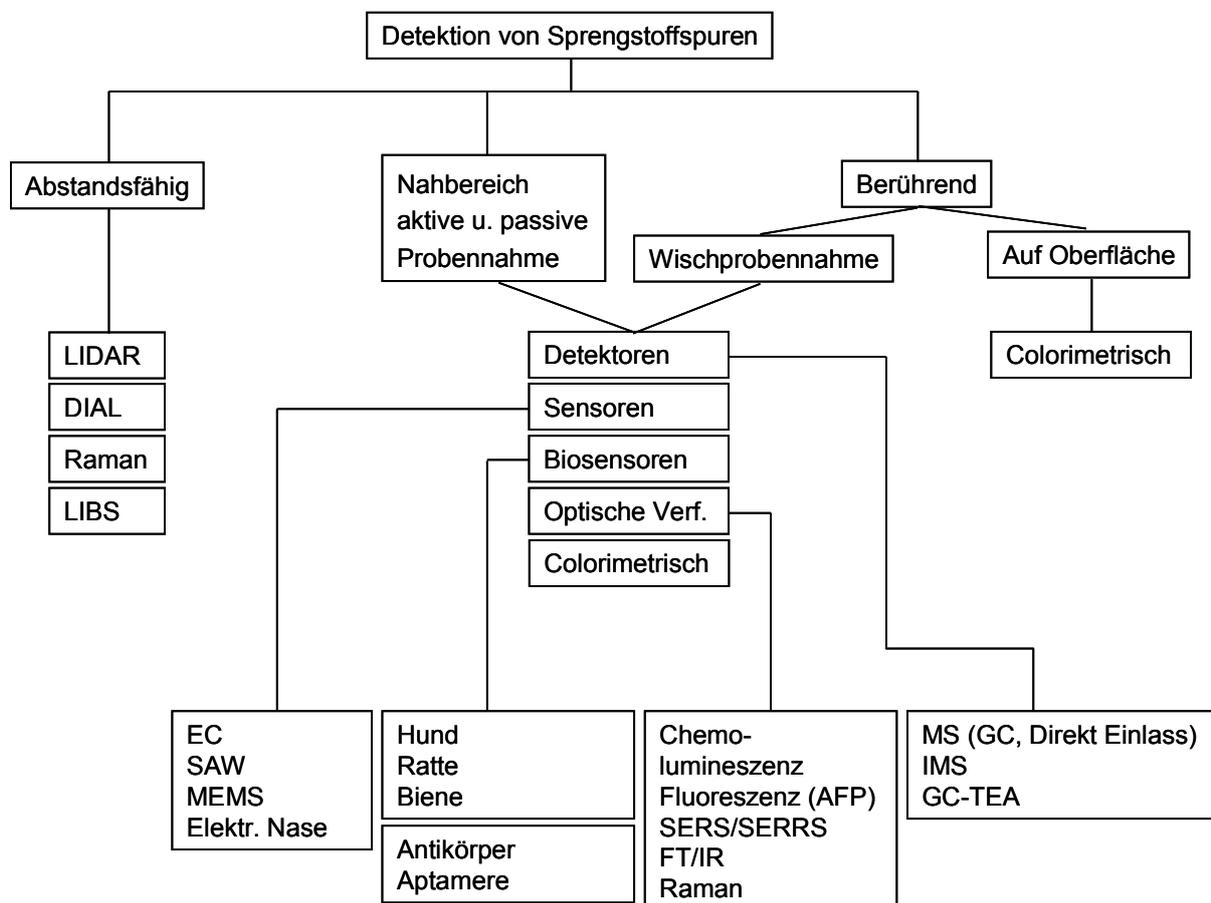


Abbildung 1: Übersicht über Verfahren zur Detektion von Explosivstoffspuren. LIDAR – light detection and ranging, DIAL – Differential absorption LIDAR, LIBS – Laser-induced breakdown spectroscopy, EC – Electrical conductivity, SAW – Surface acoustic wave, MEMS – Microelectromechanical sensors, SERS/SERRS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

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 marktverfügbaren 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.

#### I.4.2 Detektion von Triacetontriperoxid und Präkursoren

Triacetontriperoxid (TATP) ist ein sogenannter „homemade explosive“, der bereits bei Attentaten in London (2005) und Madrid (2004) sowie beim gescheiterten Attentat auf einen American Airlines Flug im Jahr 2001 verwendet wurde [Bhattacharjee 2008, Oxley 2006]. Die Herstellung ist sehr einfach und erfordert kein Fachwissen. Es werden Aceton, Wasserstoffperoxid und eine Säure benötigt. Der damit gewonnene Sprengstoff hat eine hohe Sprengkraft, ist aber nicht handhabungssicher und wird deshalb kommerziell nicht eingesetzt.

Im Gegensatz zu anderen Sprengstoffen besitzt TATP einen relativ hohen Dampfdruck (etwa 7000mal höher als TNT) und ist dem direkten Nachweis über die Gasphase zugänglich. Abbildung 2 gibt einen Überblick über die Dampfdrücke verschiedener Explosivstoffe. Unter realen Bedingungen kann die Konzentration durch Verpackung und Verdünnung durch Umgebungsluft jedoch drastisch abnehmen [Becher 2010]. Deshalb muss in der weiteren Betrachtung der in der Literatur beschriebenen Sensoren neben dem selektiven Nachweis von TATP auch auf eine hohe Nachweisempfindlichkeit geachtet werden.

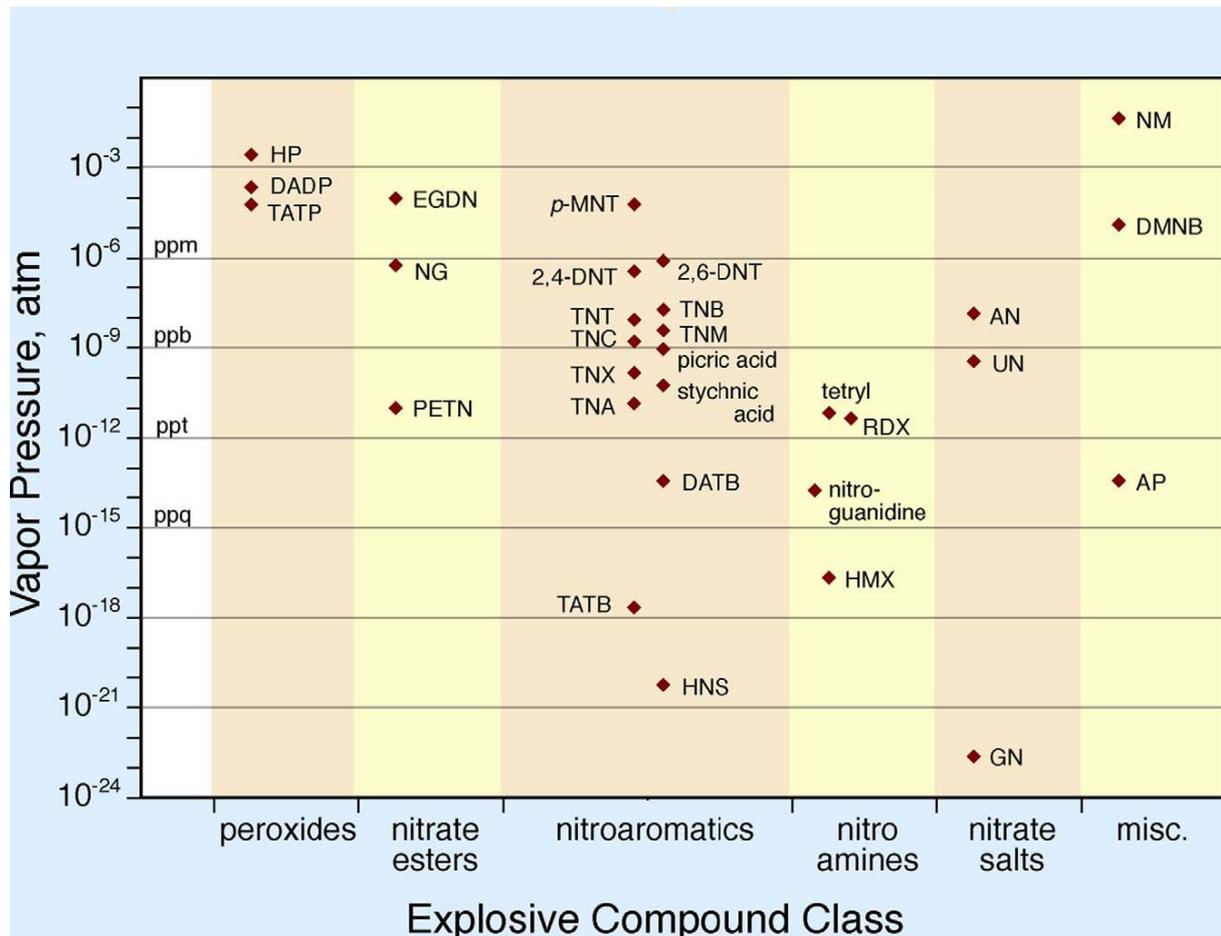


Abbildung 2: Übersicht über die Dampfdrücke ausgewählter Sprengstoffe [Ewing 2013] HP: Wasserstoffperoxid, DADP: Diacetonperoxid, TATP: Triacetonperoxid, EGDN: Ethylenglycoldinitrat, NG: Nitroglycerin, PETN: Pentaerythryltetranitrat, p-MNT: 4-Nitrotoluol, 2,6-DNT: 2,6-Dinitrotoluol, 2,4-DNT: 2,4-Dinitrotoluol, 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

Wie aus Abbildung 2 zu erkennen ist, hat TATP einen der höchsten Dampfdrücke. Somit besteht die Möglichkeit, TATP auch direkt in der Gasphase nachweisen zu können. Die Volatilität der anderen genannten Explosivstoffe ist in der Regel um Größenordnungen kleiner, so dass hier nicht davon auszugehen ist, dass ein direkter Nachweis in einer offenen Umgebung mit einfachen sensorischen Systemen möglich

sein wird. An dieser Stelle können allenfalls noch Präkursoren betrachtet werden, die typischerweise bei der Herstellung von Explosivstoffen und hier insbesondere bei Selbstlaboraten verwendet werden.

In den letzten Jahren wurden verschiedene sensorische und instrumentell-analytische Techniken für den Spurennachweis von TATP weiterentwickelt. Hierzu zählt z.B. die Ionenmobilitätsspektrometrie [Räsänen 2007, Buttigieg 2003] sowie die Massenspektrometrie/ Time of flight Massenspektrometrie (TOF-MS) [Rowell 2012, Aschenbruck 2012]. Beide Technologien zeichnen sich durch hohe Empfindlichkeiten sowie einen sehr selektiven Nachweis aus. Sie sind allerdings für den Einsatz auf Bahnhöfen oder in Zügen auf Grund des sehr hohen Preises und der komplizierten Bedienung ungeeignet. 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 [Laine 2008], Fluoreszenz [Malashikhin 2008], Chemolumineszenz [Maiolini 2009] sowie Biosensoren [Walter 2011] und biologisch inspirierte Techniken [Smith 2008].

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 wird gezeigt, dass mit dem Array ein selektiver Nachweis von TATP besonders gegenüber Wasserstoffperoxid möglich ist [Capua 2009]. Die Arbeitsgruppe um Prof. Waldvogel konnte die bereits im HAMLeT-Projekt eingesetzten Quarzmikrowaagen verbessern und miniaturisieren. Die Verringerung der Frequenzauflösung auf  $\pm 1\text{Hz}$  mit einer daraus resultierenden Detektionsgrenze von 3 Hz entspricht einer Verbesserung der Nachweisgrenze um den Faktor 20. Als Beispiel sei hier TNT genannt, die Detektionsgrenze (LOD(Labor)) für TNT konnte von 1 ppb auf 0,05 ppb gesenkt werden. Mit dem weiterentwickelten Array aus sechs Quarzmikrowaagen mit unterschiedlicher Beschichtung konnte eine Diskriminierung zwischen TATP, Di-tert-butylperoxyd,  $\text{H}_2\text{O}_2$ , Aceton und Wasser bei einer Nachweisgrenze von 1 ppm gezeigt werden [Lubczyk 2010].

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 [Lin 2010]. 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 die für dessen Synthese benötigten Precursoren Aceton und  $\text{H}_2\text{O}_2$ . Mit diesem System zeigen die Autoren den Nachweis von TATP unter realitätsnahen Umgebungen bis in den ppm- Bereich [Amani 2012]. 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 [Banerjee 2009, Royer 2012]. 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-Halbleitersensoren (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. nutzt dazu einen Sensor basierend auf Indiumoxid Nanopartikeln (ca. 16nm), welche eine stark verstärkten Reaktion bei TATP gegenüber anderen Substanzen wie Aceton und  $H_2O_2$  zeigt [Zhang 2010]. Dobrokhotov et al. nutzen für 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 Diskriminierung 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 [Dobrokhotov 2012].

### **I.4.3 Detektion radioaktiver Quellen**

Beim Einsatz schmutziger Bomben, engl. „dirty bombs“, werden radioaktive Stoffe mit herkömmlichen Sprengstoffen gemischt und zur Explosion gebracht [Medalia 2011]. Hierbei soll durch eine möglichst feine Verteilung der radioaktiven Partikel möglichst vielen Menschen einen großen gesundheitlichen Gefahr zugefügt werden. Erfolgt die Explosion der schmutzigen Bomben an neuralgischen Punkten, entsteht zusätzlich ein großer wirtschaftlicher Schaden, da die Dekontamination sehr viel Zeit in Anspruch nimmt, hohe Kosten verursacht und diese Bereiche über einen längeren Zeitraum nicht genutzt werden können.

Beim Zerfall radioaktiver Stoffe wird  $\alpha$ -,  $\beta$ - bzw.  $\gamma$ -Strahlung freigesetzt. Aufgrund ihrer unterschiedlichen Zusammensetzung unterscheiden sich die Detektionsverfahren [Medalia 2010].  $\alpha$ - und  $\beta$ -Strahlung können in der Regel nur aus kurzer Entfernung mit speziellen Detektoren nachgewiesen werden. Befinden sich die  $\alpha$ - und  $\beta$ -Strahler in einer einfachen Verpackung, können sie häufig nicht mehr bzw. nur mit hohem Aufwand detektiert werden.  $\gamma$ -Strahler hingegen werden nur durch wenige Materialien wie z.B. Blei teilweise absorbiert. Werden  $\gamma$ -Strahler in herkömmlichen Materialien transportiert, kann man diese, abhängig von deren Strahlungsintensität, häufig noch in einem Abstand von mehreren Metern nachweisen. Zur Detektion von  $\gamma$ -Strahlern werden häufig portable Geräte (Hand Helds) und Portale eingesetzt [Medalia 2011, Medalia 2010, Arlt 2004]. Beim Einsatz dieser Geräte kann, da nur einzelne Objekte / Personen untersucht werden, direkt die Quelle vor Ort identifiziert werden. Ist eine Zuordnung aufgrund einer größeren Anzahl Personen nicht möglich, müssen andere Verfahren eingesetzt werden.

Im Rahmen eigener Forschungen des Unterauftragnehmers FKIE wurden mehrere  $\gamma$ -Detektoren zur Detektion von  $\gamma$ -Strahlern installiert. Hierbei werden erste Informationen über das Vorhandensein von  $\gamma$ -Strahlern erhalten. Die Auswertung der Strahlungsintensität gibt erste Hinweise über die mögliche Entfernung der radioaktiven Quelle zum Detektor [Wieneke 2012]. Eine konkrete Zuordnung zum Träger der radioaktiven Quelle ist nur möglich, wenn der Träger bzw. sehr wenige Personen sich in unmittelbarer Nähe zum Detektor aufhalten. Durch den zusätzlichen Einsatz von Lasertracking-Verfahren und Datenfusion [Wieneke 2009, Wieneke 2012] konnte der Träger des  $\gamma$ -Strahlers ermittelt werden. Befindet sich eine größere Anzahl Personen auf engem Raum, kann das Lasertracking-Verfahren mehrere sich gegenseitig abdeckende Personen nicht mehr korrekt erkennen. Eine Zuordnung der radioaktiven Quelle zu einer Person ist dann nicht mehr möglich.

Neuere Verfahren, die es ermöglichen eine radioaktive Quelle in einer größeren Menschengruppe zu detektieren und einer Person zuzuordnen sind nicht bekannt.

### **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.

## **II. Eingehende Darstellung**

### **II.1 Detaillierte Ergebnisse und Verwendung der Zuwendung**

Die HBRS arbeitete im Rahmen des Gesamtvorhabens an diversen Arbeitspaketen mit. Es werden nur die spezifischen Arbeiten und Ergebnisse des Zuwendungsempfängers und seiner Unterauftragnehmer in den relevanten Teilarbeitspaketen beschrieben. Die vollständige Darstellung der Arbeitspakete ist in der Gesamtvorhabenbeschreibung zu finden.

#### **II.1.1 Nutzeranforderungen**

Die Ziele des Arbeitspaketes waren die Definition der Nutzeranforderungen zur Realisierung einer berührungslosen und nicht-kooperativen Personenüberwachung auf gasförmige Leitsubstanzen und radioaktive Stoffe als Sicherheitsassistenzsystem.

#### **II.1.2 Bedrohungsspektrum**

Ziel des Arbeitspaketes war die Festlegung der Rolle von terroristischen Anschlägen im Bedrohungsspektrum durch Sprengstoffattentate inkl. radioaktiver Materialien. Es wurden relevante chemische Komponenten für die Gasphasendetektion ausgewählt, die eine Relevanz für Explosivstoffe haben und die in der Gasphase mit ausreichender Konzentration nachweisbar sind. Als wesentliche Quellen wurden dazu Informationen eines LKA, des Bundesverteidigungsministeriums über Funde von Selbstlaboraten in Einsatzgebieten und das Online-Magazin „Inspire“ der Al-Qaeda der Arabischen Halbinsel (AQAP) ausgewertet. Diese Informationen sind vertraulich und nicht Bestandteil des öffentlichen Berichts.

### II.1.3 Bestandsaufnahme

Ziel des Arbeitspaketes war die Bestandsaufnahme zum Stand der Technik für den Nachweis von Explosivstoffen und radioaktiven Substanzen im Projektkontext und der weitere Forschungsbedarf formuliert. Der Stand der Technik bzgl. der Resilienzforschung mit den Schwerpunkten Konzepte der Verwundbarkeit, technische Lösungen zur Verringerung der Verwundbarkeit und Forschungsbedarf speziell im Bereich der Sensoren / Detektoren wurde ermittelt.

### II.1.4 Präventionsstrategie

Ziel des Arbeitspaketes war die in AP 2.2 definierten Substanzen mit verschiedenen Metalloxidgassensoren im Labormaßstab unter definierten Bedingungen Messungen durchzuführen und Detektionslimits zu bestimmen.

Metalloxid Halbleitersensoren (MOX) beruhen auf dem Prinzip der Interaktion zwischen Gasen und polykristallinen Halbleitermaterialien. Gemessen wird hierbei der Widerstand einer Schicht halbleitender Metalloxide z.B.  $\text{SnO}_2$ ,  $\text{ZnO}_2$ ,  $\text{WO}_3$ ,  $\text{In}_2\text{O}_3$ . Am weitesten verbreitet ist hierbei das  $\text{SnO}_2$ , 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  $\text{SnO}_2$  liegen dabei die einzelnen Kristalle in einem unterstöchiometrischen Verhältnis von Zinn zu Sauerstoff vor, so dass sich ein realer Kristall der Form  $\text{SnO}_{2-n}$  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  $\text{O}_2^-$ , 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.

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 Widerstand des Halbleiters steigt. [Gründler 2004]

Die Messungen wurden in einer Gasmessstrecke nach dem Schema in Abbildung 3 durchgeführt. Der Volumenstrom Testgas wurde über Massendurchflussregler (MFC 1-6) eingestellt, die entweder mit synthetischer Luft oder fertigen Testgasmischungen beaufschlagt werden. Über das Analyt Reservoir 1 wurden flüssige Testsubstanzen und über das Analyt Reservoir 2 feste Testsubstanzen zu dotiert. Die sich dabei einstellenden Konzentrationen im Gasstrom ergeben sich aus den Substanzspezifischen Dampfdrücken. Über den Massenflussregler MFC 6 wurde ein mit H<sub>2</sub>O gesättigter Luftstrom erzeugt, der über geregelte Vermischung eine konstante Feuchte des zu messenden Gasstroms von 50% rH gewährleistete. Dieser Gasstrom strömte durch die Sensormesskammer in der die Gassensoren eingebaut waren. Die Versuche wurden mit einem konstanten Volumenstrom von 200 mL/min durchgeführt. Temperatur und Feuchte des Gasstroms wurde vor und hinter der Sensormesskammer mit Temperatur/Feuchte Sensoren kontrolliert.

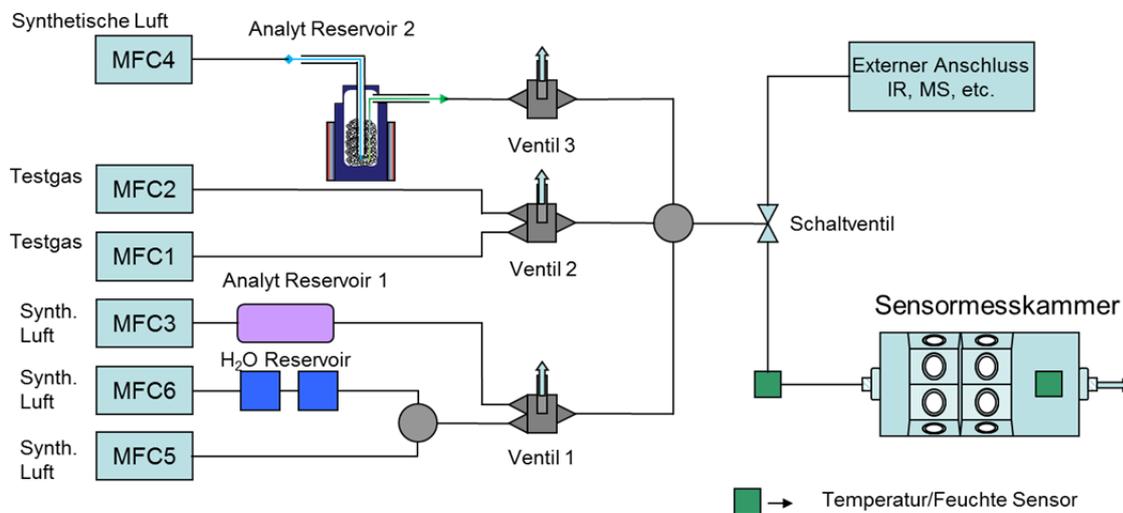


Abbildung 3: Schematischer Aufbau der Gasmessstrecke

Für die Versuche wurden die in Tabelle 1 aufgeführten Sensoren verwendet. Für die Vermessung von Aceton wurde ein kommerzielles Prüfgas mit einer Konzentration von 500 ppm Aceton über den MFC 2 eingespeist. TATP wurde auf Korundkugeln aufgezogen und über das Reservoir 2 eingebracht. Ethanol, Methylethylketon, Nitromethan und H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (50%) als Flüssigkeiten im Reservoir 1 vorgelegt.

Tabelle 1: Liste der in der Gasmessstrecke verwendeten Sensoren

Nr.	Bezeichnung	Einsatzgebiet lt. Herstellerangaben
1	1533	Die Sensoren der 1000er Serie sind breitbandig und besonders geeignet zur Lecksuche brennbarer Gase (Umweltsensortechnik GmbH UST)
2	2533	Die Sensoren der 2000er Serie haben eine hohe CO-, H <sub>2</sub> - und C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH-Empfindlichkeit und eine geringe CH <sub>4</sub> -Empfindlichkeit (Umweltsensortechnik GmbH UST)
3	3533	Die Sensoren der 3000er Serie haben eine hohe Empfindlichkeit für Kohlenwasserstoffe C <sub>x</sub> H <sub>y</sub> (von C <sub>1</sub> bis C <sub>8</sub> ) (Umweltsensortechnik GmbH UST)
4	4533	Die Sensoren der 4000er Serie sind für die NH <sub>3</sub> -Detektion entwickelt und haben eine geringe Querempfindlichkeit gegen CH <sub>4</sub> , CO und H <sub>2</sub> (Umweltsensortechnik GmbH UST)
5	5533	Die Sensoren der 5000-Serie eignen sich zur NO <sub>2</sub> - und O <sub>3</sub> -Detektion (Umweltsensortechnik GmbH UST)
6	ASMLK	Dieser Sensor hat eine hohe Empfindlichkeit auf CH <sub>4</sub> (Applied Sensors)
7	2602	Sensor mit hohe Sensitivität auf VOCs und Gerüche, wie Ammoniak und Schwefelwasserstoff (FIGARO USA Inc.)
8	2620	Sensor mit hohe Sensitivität auf Alkohol und organische Lösemittel (FIGARO USA Inc.)

Die Abbildung 4 zeigt beispielhaft die konzentrationsabhängigen Widerstandsänderungen auf die untersuchten Substanzen. Die Messwerte sind als normiertes Sensorsignal  $(R_0 - R_c) / R_0$  aufgetragen. Die Darstellungen beschränken sich auf den unteren Konzentrationsbereich. Weitere Stoffe wurden untersucht, die Ergebnisse sind jedoch vertraulich und nicht Bestandteil des öffentlichen Berichts.

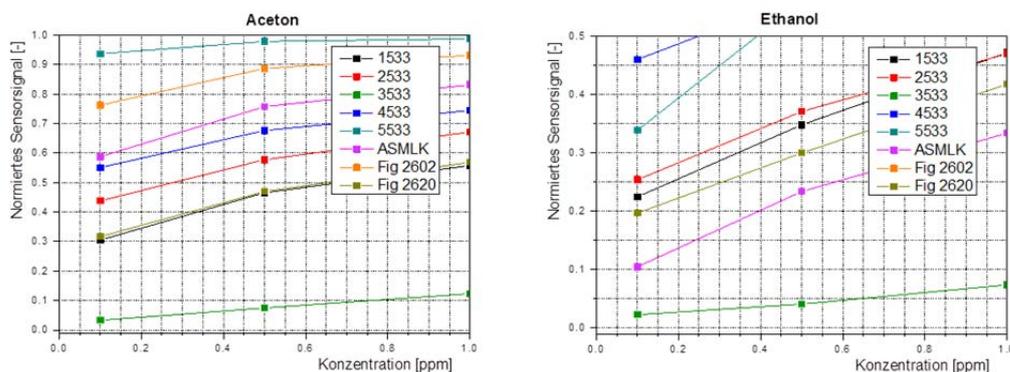


Abbildung 4: Konzentrationsabhängige Metalloxidgassensorantworten auf Aceton, Ethanol, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, Methylthyketon, Nitromethan und TATP

Auf Grund der in der Gasmessstrecke einstellbaren Verdünnungsstufen konnte für Substanzen mit einem hohen Dampfdruck (Aceton, Ethanol, Methylthyketon und Nitromethan) experimentell kein konzentrationsabhängiges Detektionslimit ermittelt

werden. Hier konnten jeweils als minimale Konzentration 100 ppb Substanz eingestellt werden. Für H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> wurden 500 ppb und für TATP 50 ppb erreicht.

### **II.1.5 Kostenanalyse der Sicherheitsmaßnahmen**

Ziel des Arbeitspaketes war die Kalkulation der Kosten des Sicherheitsassistenzsystems. Dazu wurden von HBRS und FKIE zu Sensoren und Detektoren notwendigen Beschaffungs- und Betriebskosten ermittelt, bzw. anhand von Plausibilitätsüberlegungen abgeschätzt.

### **II.1.6 Bestandsaufnahme bzgl. Abstandsfähiger Sensoren/Detektoren und Trends zur Entdeckung von unkonventionellen Spreng- und Brandvorrichtungen (USBV)**

Ziel des Teilarbeitspaketes war anhand einer intensiven Marktrecherche nochmals detailliert alle technischen Möglichkeiten zur Detektion von chemischen Risiken, insbesondere von Explosivstoffen, zusammenzustellen. Dies geschah auch mit der Zielrichtung, dass Anbieter anderer als die bereits im Teilvorhaben eingeplanten Detektionsmethoden während der Laufzeit gezielt anzusprechen, um diese im finalisierten Messportal unter Szenario-Bedingungen in AP8.2 zu testen. Es wurden erste konzeptionelle Spezifikationen für technische Lösungen erstellt.

Sensoren/Detektoren im Projekt erfordern die Fähigkeit volatile organische Komponenten (VOCs) in einem Luftstrom zu detektieren. Diese Anforderung erfüllen die folgenden marktverfügbaren Techniken:

- Ionenmobilitäts Spektrometer trennen ionisierte VOCs, die in einer Driftröhre entgegen eines Gasstroms in einem elektrischen Feld wandern und identifizieren diese anhand der Driftzeit zum Erreichen des Detektors. Hierzu gibt es ein verfügbares Scan-Portal.
- Massenspektrometer nutzen verschiedene Ionisierungs- und Messmethoden, um das Masse-zu-Ladungsverhältnis von Molekülen und ihrer Fragmente zu bestimmen. Diese können mit einer Vortrennung von Stoffgemischen, z.B. einer Gaschromatographie, gekoppelt werden.
- Detektionstechnologien basierend auf Fluoreszenz nutzen verstärkende fluoreszierende Polymere (Amplifying Fluorescent Polymers AFP). Dabei reduzieren die Analyten die Lichtemission von Polymeren mit denen sie interagieren. Diese Reduktion korreliert mit der Stoffmenge.
- Gassensoren auf der Basis von mikrostrukturierten Metalloxid-Halbleitern (Metal Oxide Sensors MOS) reagieren durch Oxidation oder Reduktion von Molekülen an ihrer spezifisch-beschichteten Oberfläche mit einer Widerstandsänderung. Sie sind für viele chemische Substanzklassen kommerziell erhältlich.
- Photoionisationsdetektoren (PID) ionisieren Moleküle mit UV-Licht und messen den ausgelösten Strom an einem Amperometrischen Detektor.

Kombinationen aus den obengenannten Techniken werden zur Steigerung der Sensitivität und Selektivität bei der VOC-Detektion genutzt. Eine kommerzielle Lösung nutzt beispielweise IMS, PID, MOS.

In Tabelle 2 sind die verschiedenen Techniken aufgelistet. Sie vergleicht qualitativ die relevanten Parameter Preis, Selektivität, Sensitivität, Analysezeit und Anzahl der detektierbaren Substanzen.

Tabelle 2: Vergleich der verschiedenen Detektionstechniken für VOCs

Technik	Preis	Selektivität	Sensitivität	Analysezeit	Anzahl der detektierbaren Substanzen
IMS	+	+	+	-	+
MS	++	++	++	+	++
Fluoreszenz	+	0	0	+	0
PID	-	0	0	0,+	0
Kombinierte Verfahren	+	+	+	-	+
Halbleitersensoren	--	Abhängig von der Anzahl der Sensoren im Array	Ist zu bestimmen	+	Ist zu bestimmen

Die erstellte Übersicht ist detailliert im Report L8.1 (Anlage "Contactless detectors for chemical threats - Market overview and trends") aufgelistet. Am Markt sind speziell für die Detektion von Explosiv- oder Gefahrstoffen entwickelte Geräte verfügbar. Sie sind oft für den mobilen Gebrauch durch das Militär- oder Sicherheitspersonal konzipiert.

Die Auswahl geeigneter Techniken hat zwei Hauptanforderungen. Die Erste ist, dass für die Kontrolle eines größeren offenen Bereichs, wie einen Bahnhof, eine sehr große Anzahl von Messsystemen benötigt wird. Dies bedeutet, dass sich der finanzielle Aufwand für Maßnahmen darstellen lassen muss. Die Zweite ist die Schnelligkeit der Analyse bis zu einer, idealerweise; 'Ja/Nein'-Aussage. Diese muss innerhalb weniger Sekunden generiert werden.

- IMS ist eine der weitverbreitetsten Techniken um Explosivstoffe oder gefährliche Substanzen im Feldeinsatz nachzuweisen. Neben dem hohen Preis der einzelnen Systeme ist die Analysezeit von 10s und mehr für den vorgeschlagenen Einsatz zu lang. Auf Grund des Messprinzips, der Messung von Driftzeiten in einer Driftröhre, ist nicht zu erwarten, dass sich zukünftig eine signifikante Reduzierung der Messzeiten erreichen lässt.
- Massenspektrometrie (MS) ist der 'Goldstandard' für den Nachweis und die Identifikation von VOCs. Letzlich ist hier der hohe Preis der Einzelsysteme und die Betriebskosten für einen flächendeckenden Einsatz als Ausschlusskriterium zu sehen. Bei der Bewertung der Leistungsfähigkeit oder der Entwicklung anderer Analysesysteme ist sie aber als Referenzmethode sinnvoll.

- Auf Fluoreszenzmessungen basierende Systeme sind kostenintensiv und lassen für die zu erwartenden VOC-Konzentrationen in der Umgebungsluft im RE(H)STRAIN-Szenario eine unzureichende Sensitivität erwarten.
- PID-Sensoren sind zum Nachweis sehr geringer Konzentrationen von VOCs als Summenparameter zur Ergänzung und Erweiterung von Messsystemen einsetzbar. Ein wesentlicher Vorteil ist der geringe Preis bei hoher Sensitivität.
- Marktverfügbare Geräte, wie der GDA, die verschiedene Nachweismethoden kombinieren enthalten oft ein IMS. Damit kommen hier die obengenannten Nachteile zum Tragen.

### II.1.7 Aufbau eines Testbeds für CE –Sensoren

Das Arbeitspaket umfasst die Konzeption, die Planung und den Bau der Testumgebung zur Detektion der im RE(H)STRAIN-Kontext definierten Bedrohungsszenarien. Die Basis ist das Konzept des HAMLeT-Demonstrators bei dem quer zur Bewegungsrichtung eine Luftströmung generiert wird, die von passierenden Personen emittierte VOCs zu einer Sensoreinheit transportiert (Abbildung 5).

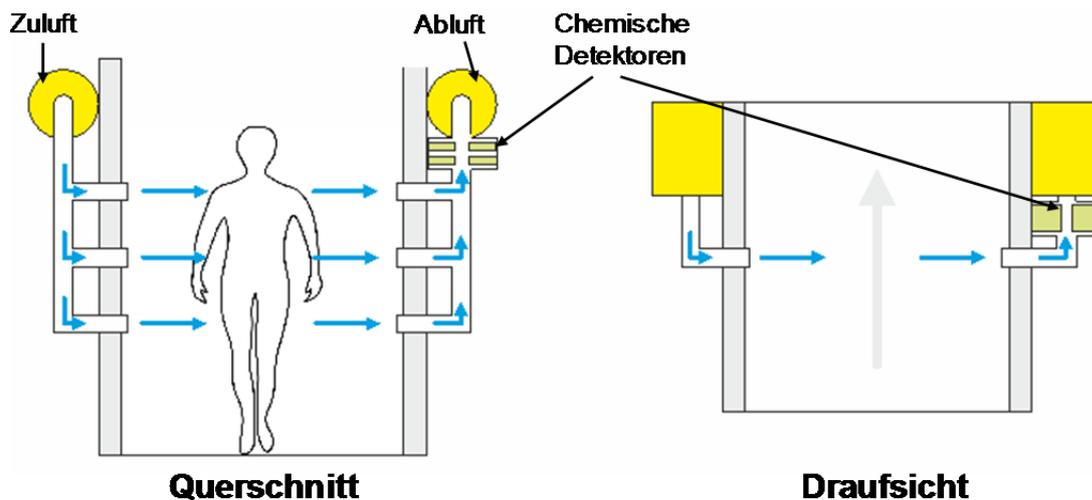


Abbildung 5: Schematischer Aufbau des Testbeds. Die blauen Pfeile indizieren die Luftströmung.

Weiterhin wurde die ausgewählte Gassensorik implementiert und mit Hilfe der spezifisch entwickelten Software verschiedene Substanzen getestet. Abschließend erfolgte der Einsatz in einem realen Umfeld, um die Einsatzfähigkeit des Systems zu untersuchen.

#### a) Versuchsaufbau

Für die technische Realisierung des Versuchsaufbaus wurden die folgenden Rahmenbedingungen definiert:

- Personen durchschreiten vereinzelt die Messstrecke in Fußgängertempo.
- Die freie Durchgangsbreite beträgt 1,20 m.

- Die Konstruktion ist selbsttragend, kann für einen schnellen Auf- und Abbau zerlegt werden und ist transportabel.
- Die Zu- und Abluft wird über zwei getrennte, regelbare Lüfter realisiert, deren Luftstrom zu Kontrollzwecken mit eingebauten Strömungssensoren überprüft und ggf. geregelt wird.
- Um Kontaminationen durch Testsubstanzen im Messbetrieb im Labor zu vermeiden und den Arbeitsschutz-rechtlichen Vorgaben zu genügen werden die Zu- und Abluft über Aktivkohlefilter geleitet.
- Die Geschwindigkeit der Luftströmung im Portal soll einerseits von Personen nicht als störend empfunden werden und andererseits die Zeit bis VOCs die Sensorik erreichen möglichst kurz gehalten werden.

Die Konstruktion ist mit 40 mm x 40 mm Aluminiumprofilen der Fa. Maytec ausgeführt. Diese Profile sind mit Nuten versehen, die über verschiedene Verbindertypen miteinander verbunden werden können. Dies gewährleistet größtmögliche Flexibilität und Stabilität der Konstruktion. Die Zuluft- und Abluftseiten sind jeweils als eigene Einheit mit eingebautem Lüfter ausgeführt (Abbildung 6). Diese Einheiten werden über eine oberliegende und zwei

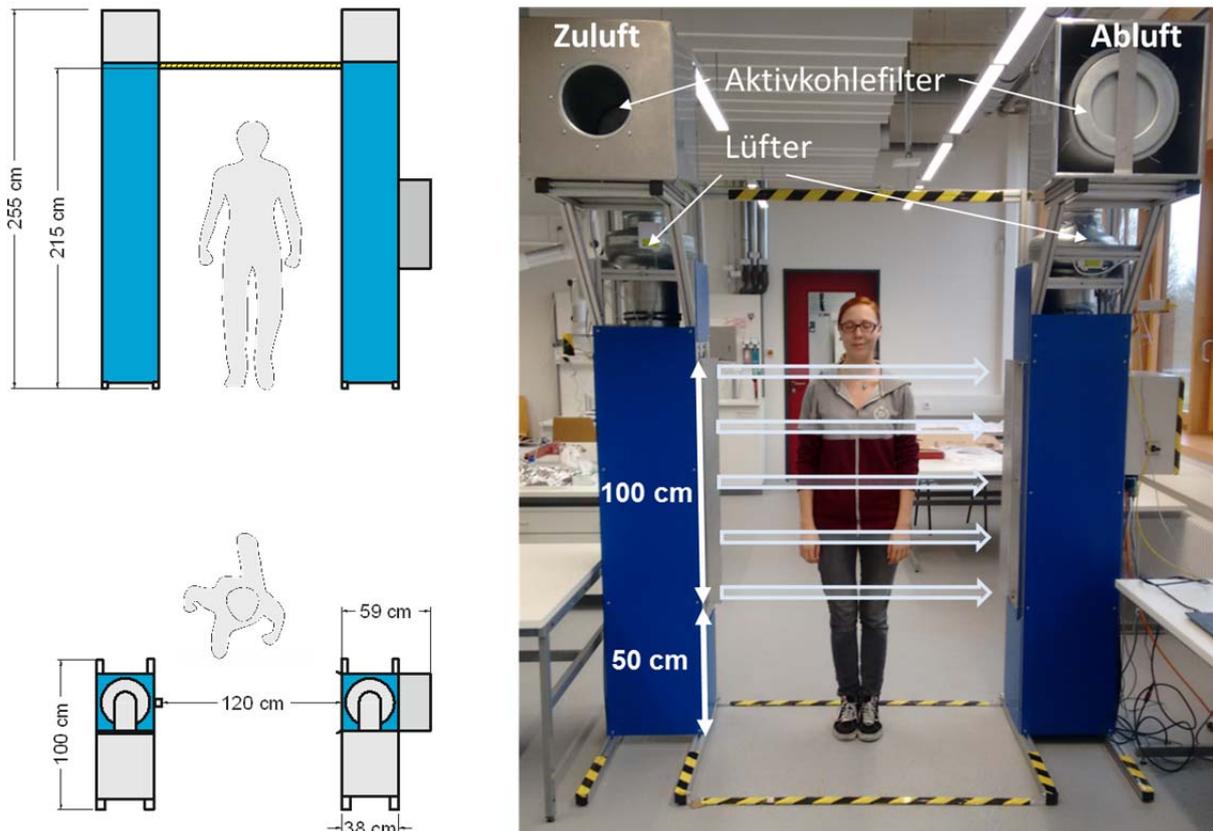


Abbildung 6: Bemaßte Skizze und Foto des Testbeds in der Endausbaustufe, die horizontalen Pfeile indizieren die Luftströmung

untenliegende Streben miteinander verschraubt. Die in Edelstahlblechgehäusen gefassten Aktivkohlefilter werden an den Zu- bzw. Abluftstutzen der Lüftermotoren befestigt. Damit sind die Kriterien für eine selbsttragende, zerlegbare Konstruktion erfüllt.

Die in Abbildung 6 dargestellte Zuluftführung ist fertigungsbedingt auf 100cm Höhe beschränkt und beginnt 50 cm über dem Bodenniveau. Damit sind für die meisten Personen der Oberkörper und die Oberschenkel innerhalb des angeblasenen Bereichs. Dies wurde als ausreichend für die Laboruntersuchungen erachtet.



Abbildung 7: Zuluftseite des Portals. a) mit Schlitzblende, b) ohne Schlitzblende

Die Abbildung 7 zeigt die Zuluftseite des Portals. Der Luftstrom wird über die Schlitzblende (Abbildung 7 a)) fokussiert und über Leitbleche im Inneren der Zuluftsäule (Abbildung 7 b)) verteilt. Die Kombination aus SchlitzEinstellung und Volumenstrom bzw. Luftgeschwindigkeit bestimmt das vertikale Strömungsprofil. Die Schlitzblende läuft dabei von oben nach unten konisch zusammen. Dies ergab sich aus den Messungen zum Strömungsprofil, die im folgenden Unterkapitel erläutert werden.

Die Abluftseite des Portals (Abbildung 8 a)) ist ebenfalls mit Leitblechen ausgestattet, die die von der Zuluftseite geförderte Luftmenge auf den Abluftkanal fokussieren. Im Inneren des Abluftkanals (Abbildung 8 b)) ist die chemische Sensorik, bestehend aus dem MOS-Array und dem Photoionisationsdetektor, und der Luftströmungssensor eingebaut. Im oberen Teil des Zuluftkanals (Abbildung 7) ist ein baugleicher Luftströmungssensor eingesetzt worden.

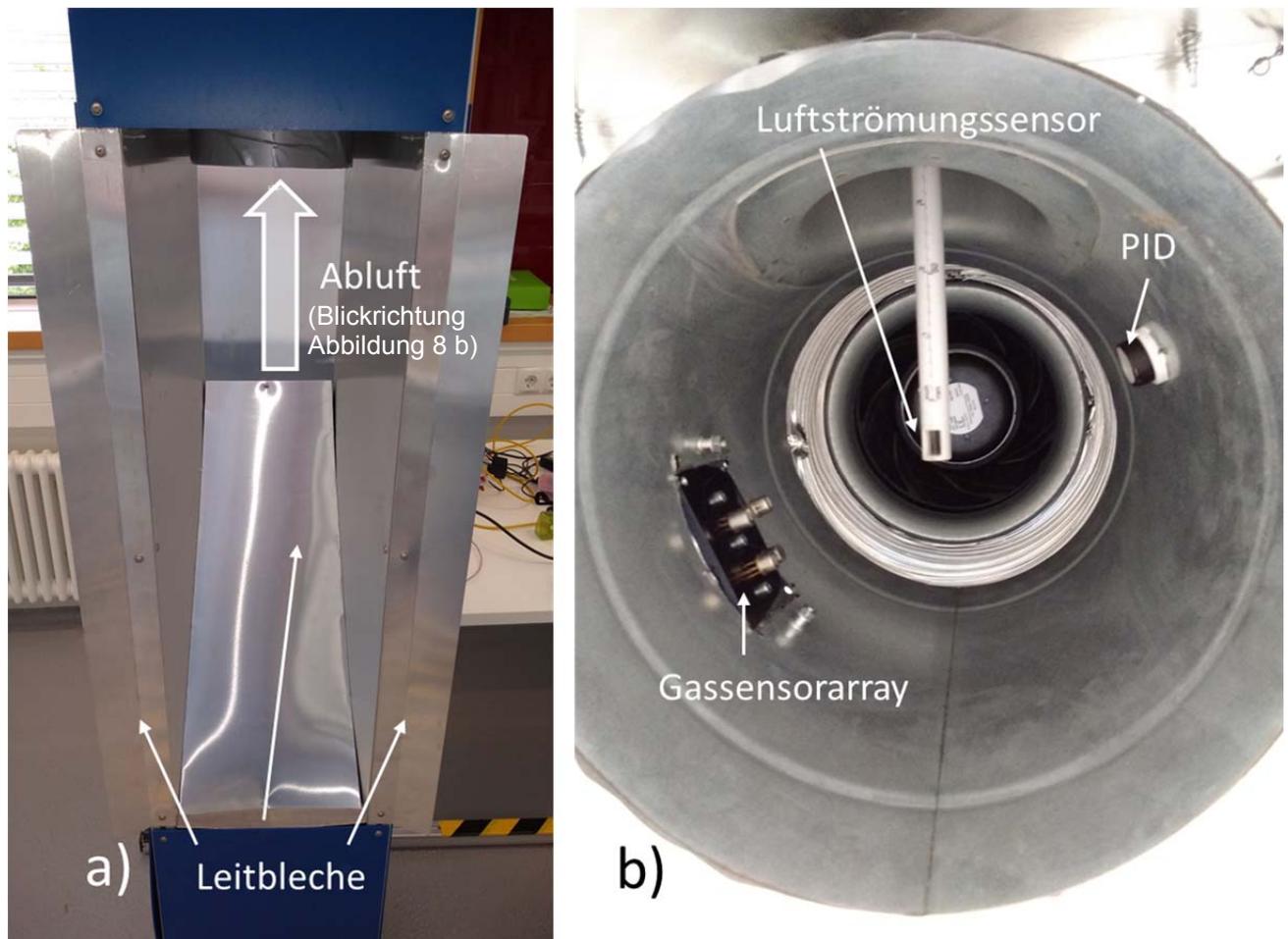


Abbildung 8: a) Abluftseite des Portals mit Leitblechen. b) Abluftkanal mit Sensorarray, Photoionisationsdetektor (PID) und Luftströmungssensor

#### b) Bestimmung des Strömungsprofils

Das Strömungsprofil im Messportal wird durch die Kombination aus SchlitzEinstellung und Volumenstrom bzw. Luftgeschwindigkeit der Zuluftseite bestimmt. Variationen des Volumenstroms auf der Abluftseite zeigten, dass dessen Einfluss auf die Ausbildung des Strömungsprofils vernachlässigbar ist.

Zur Bestimmung der Luftgeschwindigkeit wurde ein Flügelradanemometer verwendet, das einen Arbeitsbereich von 0,1 – 20 m/s hatte und einen Strömungsquerschnitt von 15 cm Durchmesser abbildete. Das Profil wurde anhand von 40 Messpunkten in der vertikalen Mittelachse des Portals erstellt (Abbildung 9).

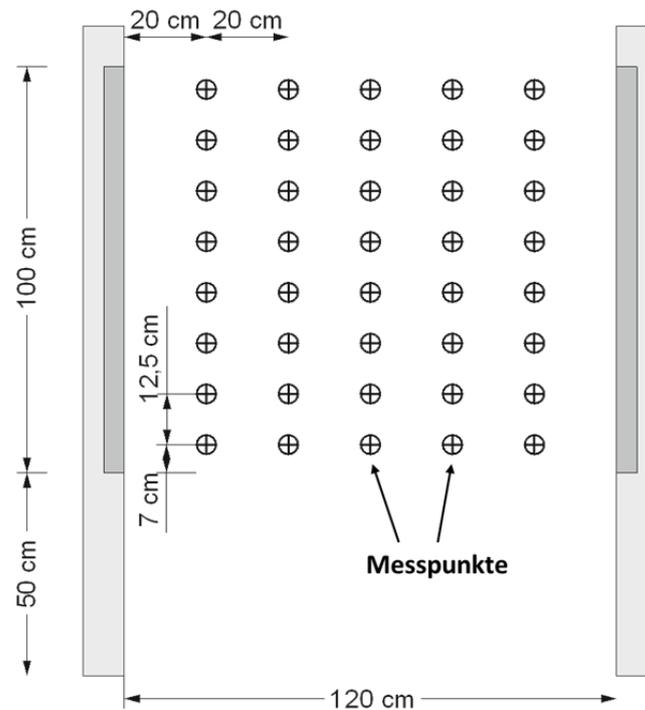


Abbildung 9: Messpunkte zur Ermittlung des Strömungsprofils

Aus den ermittelten Messwerten wurden die Strömungsprofile durch Interpolation gewonnen und grafisch als Konturplot dargestellt. In Abbildung 10 sind beispielhaft zwei Betriebszustände abgebildet.

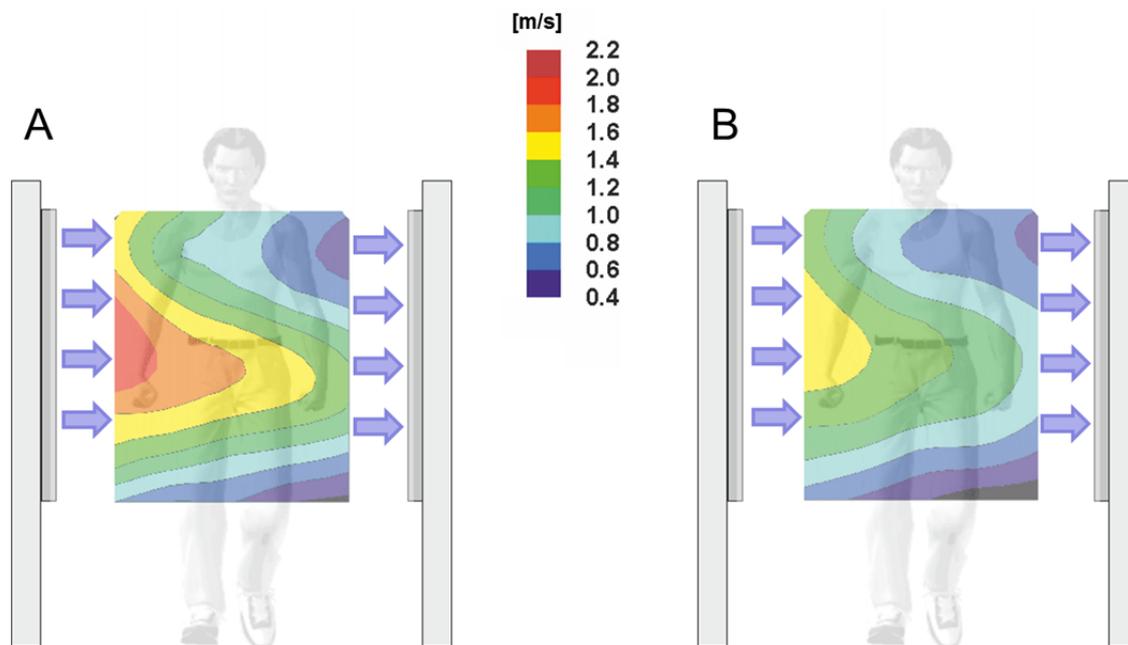


Abbildung 10: Strömungsprofil für (A) 80 L/s und (B) 60 L/s Zuluft. Die Schlitzblendenbreite betrug jeweils  $b_{\text{oben}} = 4 \text{ cm}$  und  $b_{\text{unten}} = 1,5 \text{ cm}$

Als Betriebsparameter für den Einsatz des Messportals wurden diejenigen nach Abbildung 10 (B) ausgewählt. Diese Auswahl ergab sich aus der für die Ausbildung eines ausreichend schnellen Luftströmung über den Querschnitt bei akzeptablen Luftmengen. Eine möglichst geringe Luftmenge vermeidet unerwünschte

Verdünnungseffekte, die auf die Nachweisfähigkeit von volatilen Substanzen direkten Einfluss haben. Die durch die eingestellten Betriebsparameter erzielten Strömungsgeschwindigkeiten wurden subjektiv als nicht störend im Durchgang durch das Messportal bewertet.

Aus der Geometrie des Portals ergibt sich mit dem ausgebildeten Strömungsprofil, dass volatile chemische Komponenten in max. einer Sekunde die Sensorik zum Nachweis der VOCs erreichen.

### c) Sensorik

Mit den Ergebnissen aus AP 6.2 wurden ein Halbleitersensoren- (MOS-) Array definiert, dessen eingesetzte Sensortypen in Tabelle 3 aufgelistet sind. Die von den Herstellern vorgeschlagenen Einsatzgebiete ergeben für die gewählte Kombination ein breitbandiges Detektionsspektrum an chemischen Substanzklassen.

Tabelle 3: Liste der verwendeten Halbleitersensoren (UST: Umweltsensortechnik GmbH, Figaro: FIGARO USA Inc.). Angaben lt. Hersteller

Nr.	Sensor	Heizspannung	Arbeitstemperatur	Einsatzgebiet lt. Hersteller
1	UST 1533	3,2 V	425 °C	breitbandiger Sensor, besonders geeignet zur Lecksuche brennbarer Gase
2	Figaro 2620	5 V	k.A.	Hohe Sensitivität auf Alkohol und organische Lösemittel
3	UST 3333	3,2 V	425 °C	Sensor für Kohlenwasserstoffe $C_xH_y$ (von $C_1$ bis $C_8$ )
4	UST 5533	1,8 V	220 °C	Sensor zur $NO_2^-$ und $O_3^-$ -Detektion

Zusätzlich wurde ein Photoionisationsdetektor (Abbildung 11) verwendet. Dieser Detektor ionisiert organische Moleküle mit einer miniaturisierten UV-Lampe. Die Intensität der UV-Strahlung ist so eingestellt, dass überwiegend organische Moleküle ionisiert werden. Diese werden an einem amperometrischen Detektor nachgewiesen. Damit fungiert der PID als VOC-Summendetektor. Für die Signalauswertung des MOS-Arrays liefert er die grundsätzliche Aussage, ob VOCs gemessen werden oder nicht. Der PID gibt als Messsignal eine analoge Spannung aus, die proportional zum gemessenen Strom ist.



Abbildung 11: Photoionisationsdetektor (PID)

Die von den Luftströmungssensoren gelieferte Messspannung wird zusammen mit dem Signal des PIDs über einen A/D-Wandler via USB an die Auswertesoftware übergeben.

Die vier Metalloxidsensoren sind zu einem Array verknüpft. Das Auslesen der Messwerte, die A/D Wandlung und die Anbindung über TCP/IP an die Steuer- und Auswerteeinheit übernimmt ein Auslesemodul (Abbildung 12). Es stellt gleichzeitig die Heizspannung für die Einstellung der Betriebstemperatur des jeweiligen Sensors zur Verfügung.

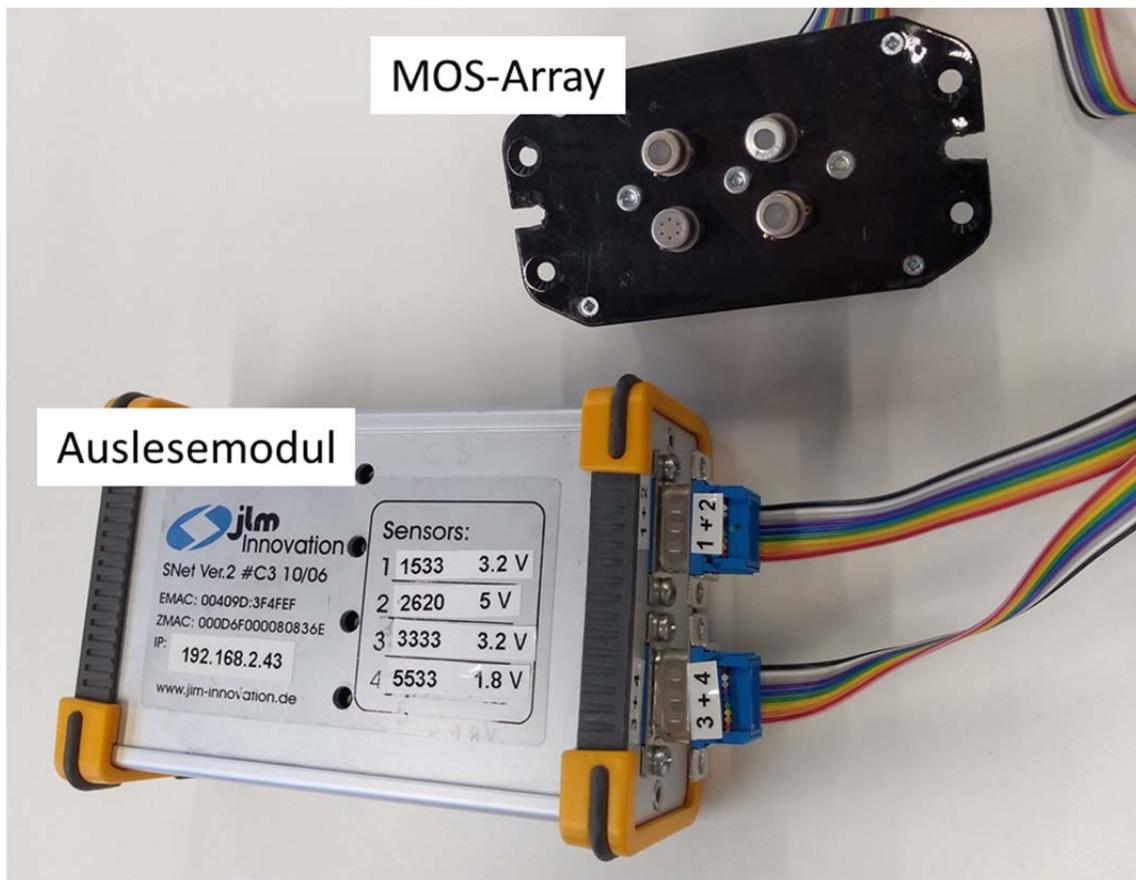


Abbildung 12: MOS-Array und Auslesemodul für die Halbleitersensoren

#### d) Signalauswertung

Die via TCP/IP vom MOS-Array und via USB vom PID übertragenen Messwerte werden mit der Auswertesoftware auf Basis von LabView® weiterverarbeitet. Die Datenaufnahme erfolgt mit einer Rate von 2 Hz. Die automatisierte Prozessierung wendet die Methode der Principal Component Analysis (PCA) an. Dabei werden aus den vorher angelernten VOCs Merkmale extrahiert und eine Clusteranalyse durchgeführt. In Abbildung 13 ist beispielhaft die Anwendung für einen dreidimensionalen Score plot aufgetragen. Die Merkmale der Anlernphase vermessenen, bekannten Substanzen ergeben im Score plot Cluster. Die Identifizierung von unbekanntem Proben erfolgt über den Vergleich der extrahierten Merkmale mit denen der bekannten Proben. Ergeben sich im Scoreplot Übereinstimmungen ist die unbekannt Probe identifiziert.

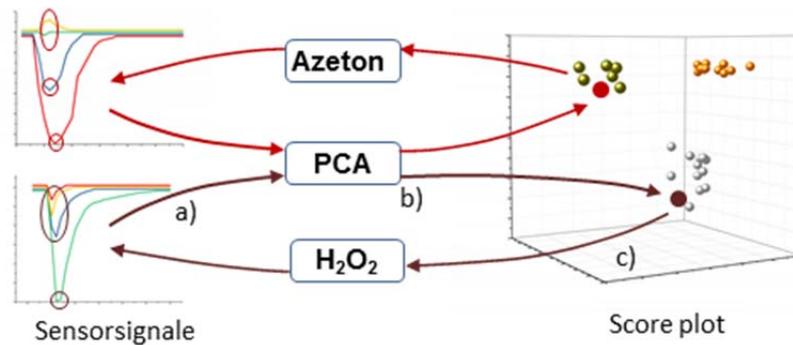


Abbildung 13: Substanzidentifizierung aus extrahierten Merkmalen der Sensorsignale a). Die Principal Component Analyse berechnet Hauptkomponenten b), die mit bekannten Clustern in Score plot c) verglichen werden und identifiziert Substanzen

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 20 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 20-dimensionalen Feature-Vektoren mittels des Verfahrens der Hauptkomponentenanalyse (PCA) auf sechs 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 [Bicego 2002] angewandt. Nachfolgendes Ablaufschema in Abbildung 14 zeigt die Teilschritte der Klassifizierung die im weiteren näher erläutert werden.

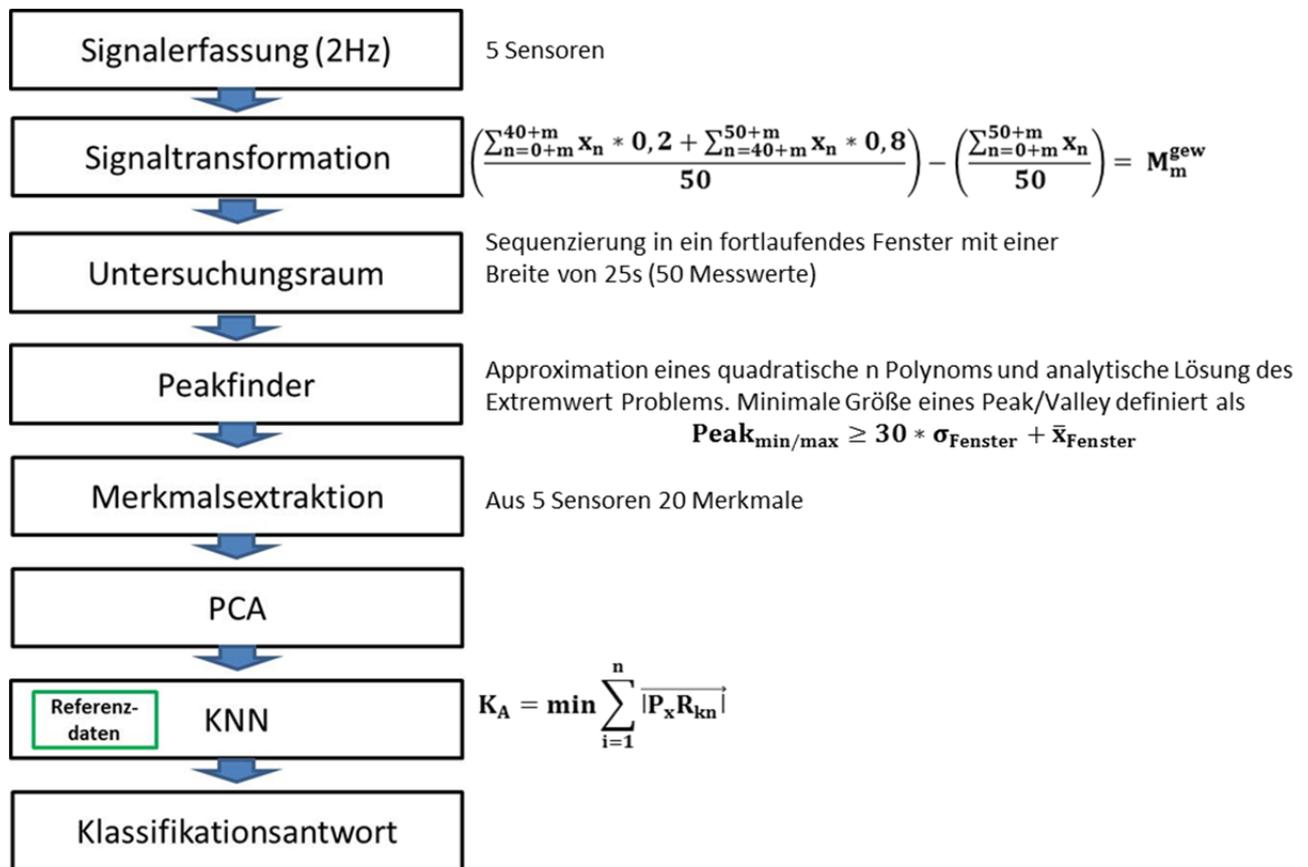


Abbildung 14: Ablaufschema des Klassifikationsalgorithmus. Links: die im Einzelnen ablaufenden Schritte der Klassifizierung. Rechts: Kurzanmerkungen und Erläuterungen.

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:

$$\mathbf{Peak}_{\min/\max} \geq 30 * \sigma_{\text{Fenster}} + \bar{x}_{\text{Fenster}} \quad (2)$$

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

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 [Mitrovics 2004, Kessler 2007]. Die durch die Merkmalsextraktion erhaltenen Daten (Objekte) sind gegeben durch Merkmalsvektoren der Form:  $P_x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ . 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 20-dimensional.

Die PCA ist nun als Lösungswerkzeug zu verstehen, welches nach den  $n$ -Hauptkomponenten, also den  $n$  unkorrelierten Linearkombinationen der Matrix  $\underline{X}$  mit maximaler Varianz sucht. Zur Lösung dieses Problems werden die Eigenwerte und Eigenvektoren der Kovarianz- bzw. Korrelationsmatrix von  $\underline{X}$  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 15 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 neuen Achsen  $x'$  und  $y'$  bilden. Wie leicht zu erkennen ist wird das System durch die Achse  $x'$  im gedrehten Koordinatensystem fast gänzlich beschrieben, 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.

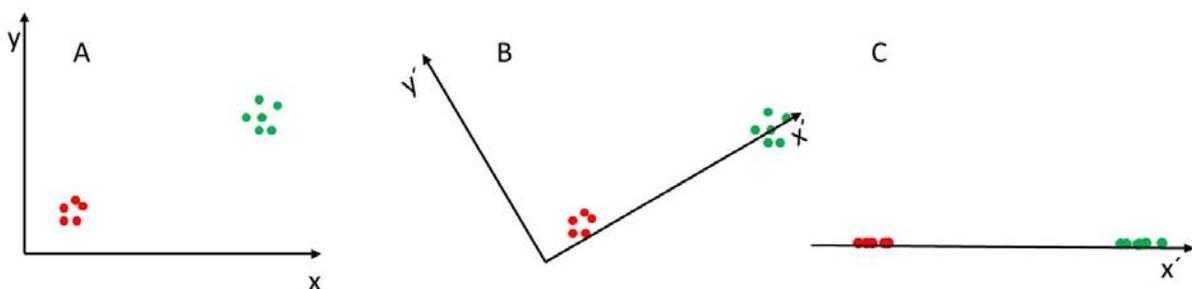


Abbildung 15: Geometrische Betrachtung der PCA. A: Ausgangsdaten, B: gedrehtes Koordinatensystem, C: Elimination nicht benötigter Hauptkomponenten (Achsen)

### 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.

$$K_A = \min \sum_{i=1}^n |\mathbf{P}_x \mathbf{R}_{kn}| \quad (3)$$

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  $\mathbf{P}_x$  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.

Die Vermessung der Referenzsubstanzen und die daraus extrahierten Merkmale zeigten, dass sich die Stoffklassifizierung auf 6 wesentliche Merkmale stützen kann. Diese Merkmale sind die relativen Signalmaxima der vier Metalloxidsensoren ( $(R_0 - R_x)/R_0$ ), des relativen Signalminimums des Sensors 4 und des absoluten Maximum des PIDs (Sensor 5). Die Abbildung 16 zeigt im Screenshot der Auswertesoftware die Signalantworten auf Azeton.

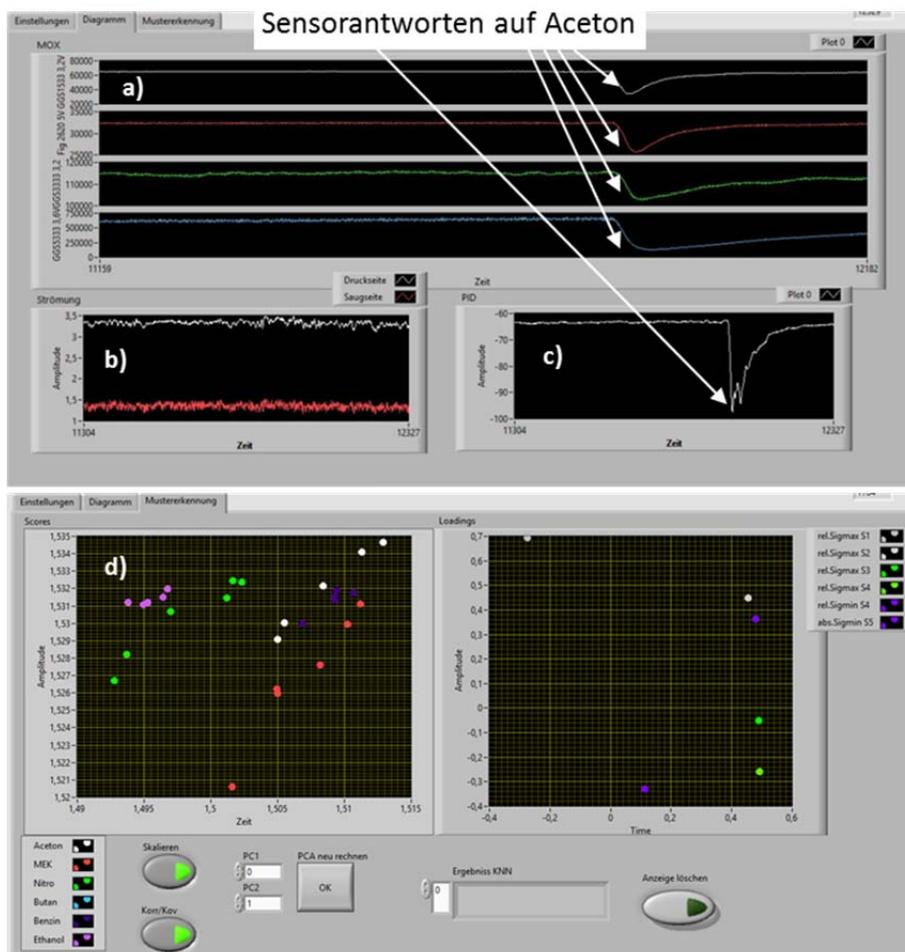


Abbildung 16: Screenshot der Auswertesoftware mit Sensorantworten auf die Exposition von Azeton. a) Signale der vier MOS, b) mittlere Luftgeschwindigkeit in Zu- und Abluft, c) Signal des PID, d) Scoreplot der PCA

### e) Feldtest

Der ursprünglich angedachte Feldtest in der realen Umgebung eines Bahnhofs konnte auf Grund der fehlenden Zusage durch den assoziierten Partner Deutsche Bahn AG nicht durchgeführt werden.

Alternativ wurde das Testbed im Eingangsbereich der Mensa der Hochschule Bonn-Rhein-Sieg in Rheinbach installiert und ein 2-tägiger Feldtest an dieser Stelle durchgeführt. Der Eingangsbereich besteht aus einer Schleuse mit vier automatischen Glastüren (Abbildung 17).

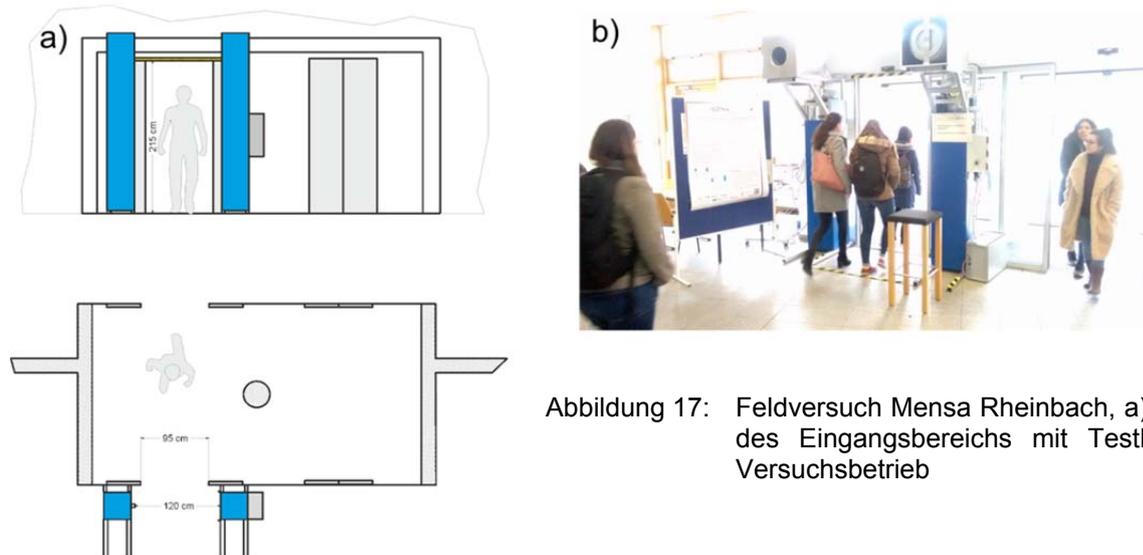


Abbildung 17: Feldversuch Mensa Rheinbach, a) Skizze des Eingangsbereichs mit Testbed, b) Versuchsbetrieb

Während des Versuchsbetriebs passierten ca. 450 Personen in wechselnder Personenanzahl und Frequenz das Portal. Es war den Personen freigestellt durch das Testbed zu gehen oder an der nicht überwachten Eingangsseite das Gebäude zu betreten oder zu verlassen. Die Detektionsfähigkeit der Sensorik wurde vom betreuenden Personal mit Benzin oder Azeton Proben unregelmäßig überprüft. Während des Feldversuchs wurde vom betreuenden Personal handschriftlich Protokoll über besondere Ereignisse geführt. Diese wurden mit den aufgenommenen Sensordaten korreliert (Abbildung 18). Zu Testzwecken wurden im Messportal Rauch von E-Zigaretten und normalen Zigaretten eingeblasen.

Die wesentlichen Ergebnisse des Feldversuches vom 16.01.2018 und 17.01.2018 sind:

- 450 Personen passierten den Messaufbau,
- Kein false-negative Alarm
- Kein false-positive Alarm
- Geringer Einfluss von Zigaretten und E-Zigaretten

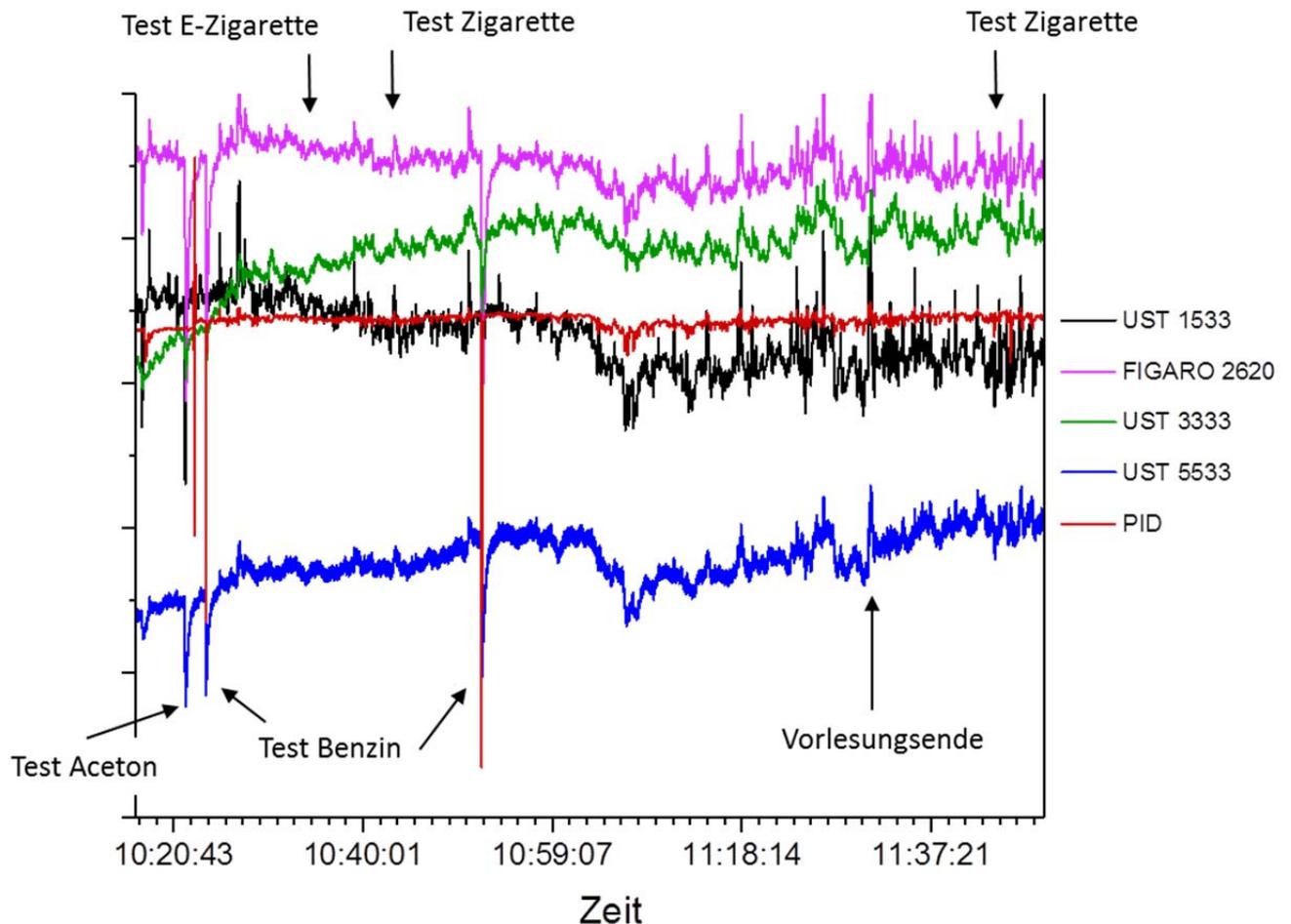


Abbildung 18: Auszug aus den Sensormessdaten des Feldversuchs

Mit diesem Feldtest konnte gezeigt werden, dass die Messungen im realen Einsatz stabil und ohne Störungen läuft. Der Einfluss des Betriebs in einer offenen Umgebung zeigt sich, im Vergleich zu den kontrollierten Bedingungen im Labor, in einem stärkeren Signalgrundrauschen der Metalloxidgassensoren. Dies lässt sich durch den Einfluss erhöhter Luftquerströmungen durch Öffnen und Schließen der Schiebetüren erklären. An den Versuchstagen herrschte zudem außerhalb des Gebäudes starker Wind, der bei geöffneten Schiebetüren zusätzliche Luftturbulenzen verursachte. Für zukünftige Arbeiten sollten diese Umgebungseinflüsse stärker in Betracht gezogen werden. Größere Personengruppen, die das Testbed teilweise trotz der angedachten Personenvereinzlung parallel oder sehr engstehend (Abbildung 17 b)) passierten, beeinflussten das Signalrauschen zusätzlich (Abbildung 18, Markierung „Vorlesungsende“). Hier ist künftig auf einer bessere Führung der Personenströme zu achten.

## II.1.8 Entwicklung eines Multisensordatenfusion-Sicherheitskonzeptes

Dieses Arbeitspaket wurde im Unterauftrag von Fraunhofer FKIE bearbeitet.

Ziel des Arbeitspaketes war die Entwicklung des Konzeptes eines Sicherheitsassistenzsystems mit multisensorieller Anbindung, eines Multisensordatenfusion-Sicherheitskonzeptes. Dazu sollten die Daten aus dem Einsatz von heterogener Sensorik algorithmisch zu einem Lagebild fusioniert werden, das zur Beurteilung von Bedrohungssituationen die notwendigen Informationen bereitstellt. Die kinetischen Daten der im Überwachungsbereich sich bewegenden Personen werden mit Kameras aufgezeichnet, ausgewertet und mit den Messsignalen heterogener Sensoren, die keine Ortsauflösung zulassen, fusioniert (Abbildung 19).

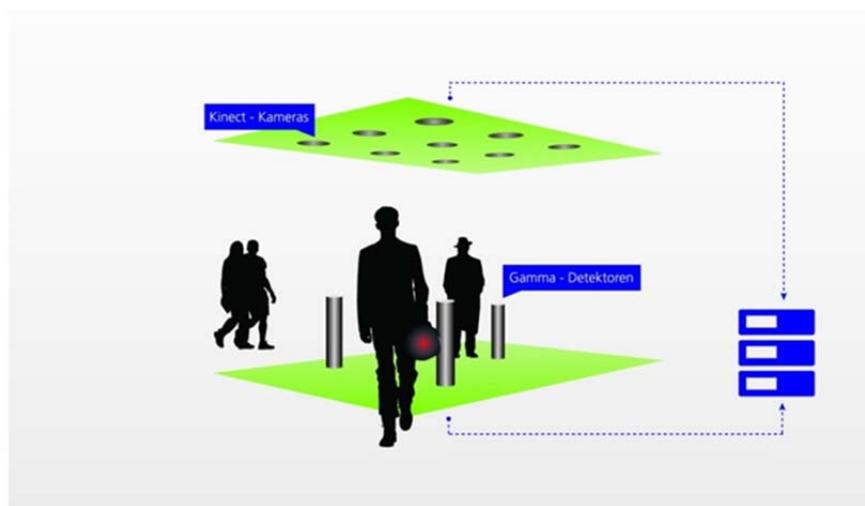


Abbildung 19: Schematischer Versuchsaufbau zur Datenfusion von Bewegungsdaten und Sensorsignalen

Dazu wurde auf dem Gelände der Fraunhofer FKIE ein Versuchsfeld realisiert, das zusammen mit den Ergebnissen aus AP 8.4 den Träger eines  $^{60}\text{Co}$  und  $^{137}\text{Cs}$   $\gamma$ -Strahlers identifiziert und im Beobachtungsfeld per Videotracking verfolgt (Abbildung 20). Das Versuchsfeld hatte eine Größe von 8 m x 8 m. Auf dem Feld waren verteilt fünf  $\gamma$ -Detektoren platziert. Für das Personentracking waren acht kinect kameras in einer Höhe von ca. 3 m montiert. Im Rahmen des Workshops am 07.03.2017 wurden die „dirty-bomb“-Detektion und das Personentracking demonstriert (Abbildung 21).



Abbildung 20: Videobeobachtung des Beobachtungsfeldes mit Kinect Kameras von oben

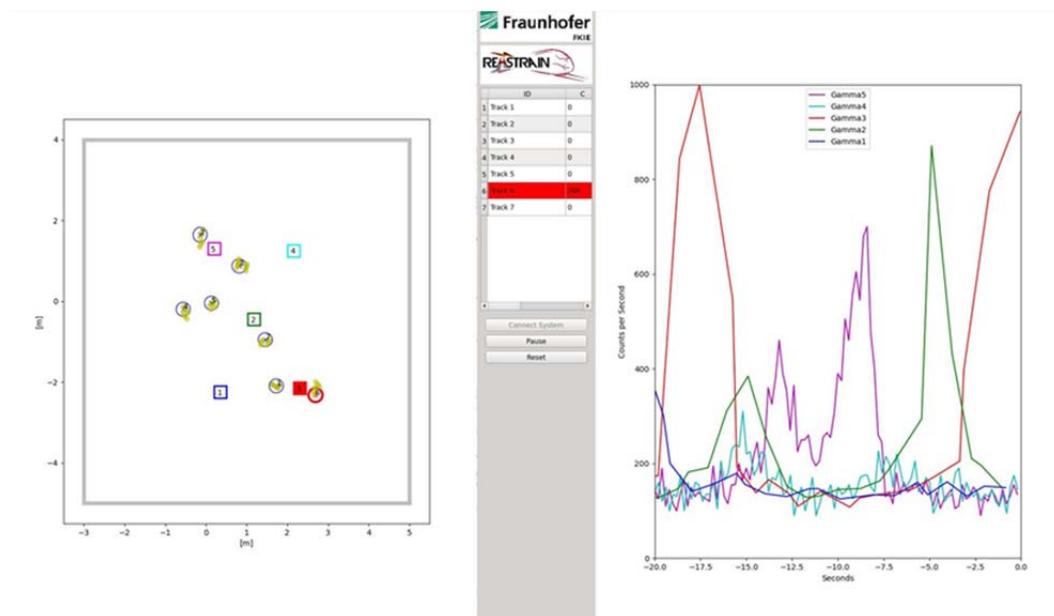


Abbildung 21: Das user interface zum Versuchsaufbau. Links die Personentracks als nummerierte Kreise und die  $\gamma$ -Detektoren als Quadrate. Auf der rechten Seite die Intensität der gemessenen  $\gamma$ -Strahlung der einzelnen Detektoren.

Detailliertere Informationen sind vertraulich und nicht Bestandteil des öffentlichen Berichts.

### II.1.9 Entdeckung einer schmutzigen Bombe

Dieses Arbeitspaket beinhaltet die Detektion von radioaktiven Bedrohungen, wie sie von „dirty-bombs“ ausgehen und wurde von Fraunhofer FKIE als Unterauftrag bearbeitet.

Dazu wurde untersucht welche Strahlungsintensität in Abhängigkeit der Entfernung der verwendeten Strahlungsquellen mit den  $\gamma$ -Detektoren messbar war (Abbildung 22).

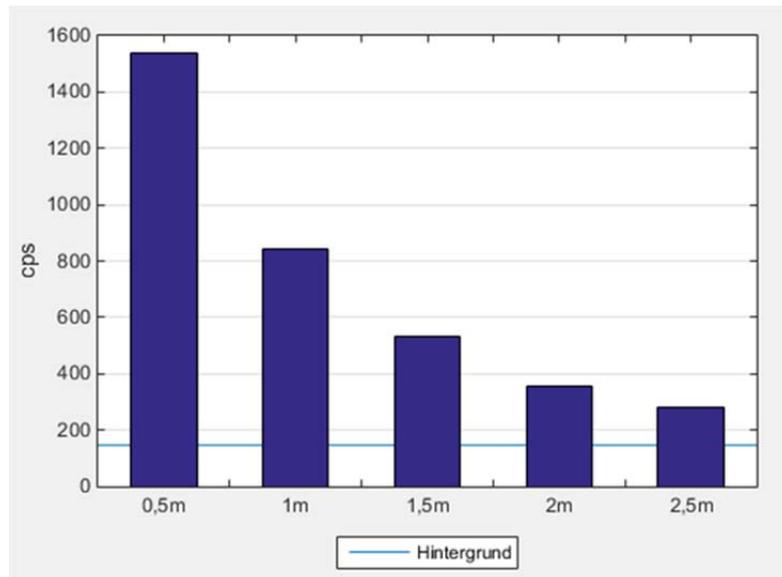


Abbildung 22: Strahlungsintensität der  $^{137}\text{Cs}$  3,7 MBq Quelle in Abhängigkeit der Entfernung (cps = counts per second). Die blaue Linie indiziert die natürliche Hintergrundstrahlung.

Weiterhin wurde der Einfluss verschiedener Abschirmmaterialien auf die Intensität der Strahlung untersucht (Abbildung 23).

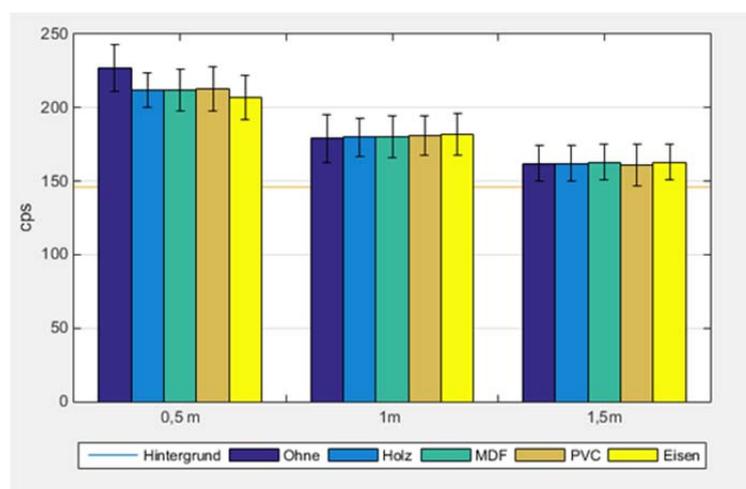


Abbildung 23: Einfluss verschiedener Abschirmmaterialien und des Abstands der radioaktiven Quelle ( $^{137}\text{Cs}$  0,185 MBq) auf den Detektor

Detailliertere Informationen sind vertraulich und nicht Bestandteil des öffentlichen Berichts.

## II.1.10 Entdeckung relevanter organischer Marker mittels Mikrowaagen

Dieses Arbeitspaket wurde im Unterauftrag von der Johannes Gutenberg Universität Mainz bearbeitet

Ziel des Arbeitspaketes war es die spezifischen Bedrohungen, wie sie in AP 2.2 beschrieben wurden mit Quarzmikrowaagen (QMB) zu detektieren. Die Selektivität auf bestimmte chemische Moleküle sollte durch Beschichtung der QMB-Oberflächen mit Affinitätsmaterialien erreicht.

Das Schwingungsverhalten von Quarzmikrowaagen (Abbildung 24) ist abhängig von verschiedenen Faktoren, die mit der Sauerbrey Gleichung (4) beschrieben werden.



Abbildung 24: Quarzmikrowaage (QMB)

$$\Delta f_F = - \frac{f_0^2}{N \cdot \rho_{\text{quartz}} \cdot F} \cdot \Delta m_F \quad (4)$$

In Gleichung (4) sind  $A$  die oszillierende Fläche,  $N$  die Frequenzkonstante,  $\rho$  die Dichte des Quarzmaterials. Die Variation der oszillierenden Masse  $\Delta m$  resultiert in einer Verschiebung  $\Delta f_0$  der Resonatorgrundfrequenz  $f_0$ . Durch Beschichten der QMB-Oberfläche mit Affinitätsmaterialien (Abbildung 25) mittels Elektropray wird die Selektivität für bestimmte VOCs erhöht.

Für den Nachweis der Selektivität und Sensitivität des Verfahrens wurden 6 QMBs zu einem Array zusammengefasst. Dabei wurden 5 verschieden beschichtete Waagen für die Stoffidentifikation benutzt, der Sechste wurde zur Messung der Luftfeuchte verwendet, die eine wichtige Einflussgröße auf die stoffspezifische Sensitivität der anderen Waagen hat und mit deren Messwerten korreliert wurde.

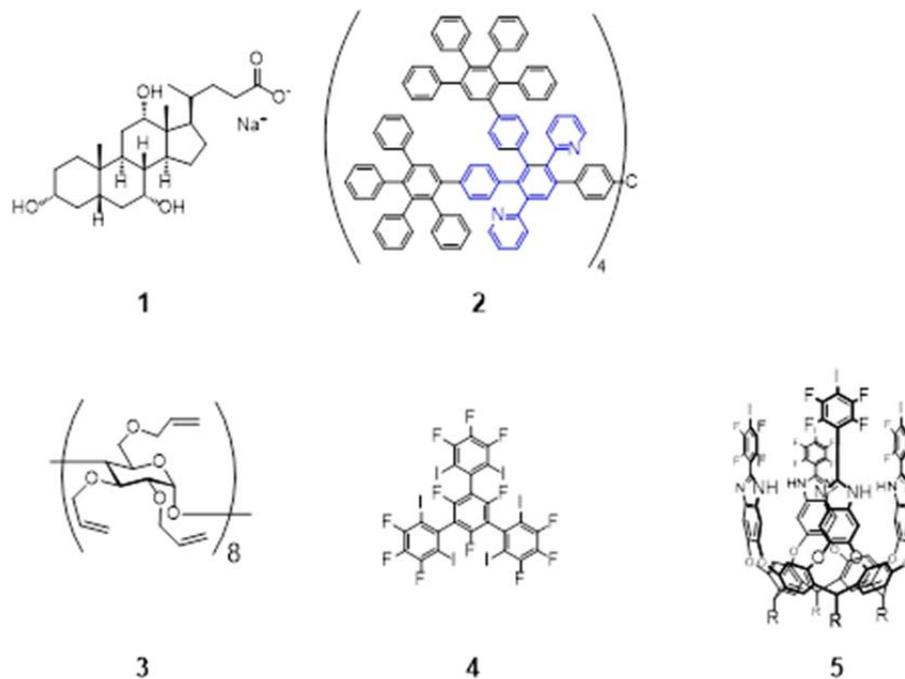


Abbildung 25: Affinitätsmaterialien zur Beschichtung von QMBs. Stoffbezeichnungen: 1 Natriumchololat, 2 MPI-7, 3 per-Allyl- $\gamma$ -cyclodextrin, 4 Huber-1,3,5-I6, 5 OD\_202

Im Labormaßstab wurden Untersuchungen mit Aceton, TATP, Benzin, Nitromethan und Ethanol durchgeführt. Dabei wurden die in Tabelle 4 aufgeführten Detektionslimits bestimmt. In Voruntersuchungen konnte gezeigt werden, dass Wasserstoffperoxid ( $H_2O_2$ ) die Affinitätsmaterialien dauerhaft schädigt. Daher wurde auf den Nachweis dieser Substanz verzichtet.

Tabelle 4: Detektionslimits des QMB-Arrays für ausgewählte Substanzen

Substanz	Detektionslimit
TATP	185 ppb
Aceton	1565 ppm
Benzin	48 ppm
Nitromethan	364 ppm
Ethanol	70 ppm

Das QMB-Sensorarray wurde in ein handheld-Gehäuse für den mobilen Einsatz eingebaut (Abbildung 26). Dieses wurde im Rahmen des Workshops am 07.03.2017 bei FKIE in Wachtberg im Testbed (AP 8.2) implementiert. Die Testläufe mit den verschiedenen Substanzen zeigten, dass die Sensitivität des QMB-Arrays in dieser Messumgebung nicht ausreichend ist. Ein Einsatz als Detektor für verdächtige Substanzfunde ist hier realistischer.



Abbildung 26: QMB-Messgerät mit 2€ Münze zum Größenvergleich

Detailliertere Informationen sind vertraulich und nicht Bestandteil des öffentlichen Berichts.

### III. Literatur

[Amani 2012] 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).

[Arlt 2005] M. Swoboda, R. Arlt, V. Gostilo, A. Lupilov, M. Majorov, M. Moszynski, A. Syntfeld, "Spectral gamma detectors for hand-held radioisotope identification devices (RIDs) for nuclear security applications", *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 52-6, 3111–3118, (2005).

[Aschenbruck 2012] 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

[Banerjee 2009] 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).

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

[Bhattacharjee 2008] Y. Bhattacharjee; "New Efforts to Detect Explosives Require Advances on Many Fronts", *Science* 320, 1416 (2008).

[Bicego 2002] M. Bicego, G. Tessari, G. Tecchiolli, M. 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

[Blue 2013] R. Blue, Z. Vobecka, P.J. Skabara, D. Uttamchandani, "The development of sensors for volatile nitro-containing compounds as models for explosives detection", *Sens. Actuators B: Chem.* 176, p. 534–542 (2013).

[Bouhadid 2012] M. Bouhadid, T. Caron, F. Veignal, E. Pasquinet, A. Ratsimihety, F. Ganachaud, P. Montméat, Ability of various materials to detect explosive vapors by fluoro-cent technologies: a comparative, *Talanta* 100, p. 254–261 (2012).

[Buttigieg 2003] 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).

[Capua 2009] 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).

[Caron 2010] T. Caron, M. Guillemot, P. Montméat, F. Veignal, F. Perraut, P. Prené, F. Serein-Spirau, Ultra trace detection of explosives in air: development of a portable fluorescent detector, *Talanta* 81, p. 543–548 (2010).

[DobrokhotoV 2012] 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).

[Ewing 2013] 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).

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

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

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

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

[Laine 2008] 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).

[Lazarowski 2014] L. Lazarowski, D.C. Dorman, Explosives detection by military working dogs: olfactory generalization from components to mixtures, *Appl. Anim. Behav. Sci.* 151, p. 84–93 (2014).

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

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

[Lopez 2014] M. López-López, C. García-Ruiz, Infrared and Raman spectroscopy techniques applied to identification of explosives, *TrAC, Trends Anal. Chem.* 54, p. 36–44 (2014).

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

[Maiolini 2009] 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).

[Malashikhin 2008] 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).

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

[Medalia 2010] J. Medalia; “Detection of Nuclear Weapons and Materials-Science, Technologie, Observation”, *Congressional Research Service*, R40154, (2010).

[Medalia 2011] J. Medalia; “‘Dirty Bombs’: Technical Background, Attack Prevention and Response, Issues for Congress”, *Congressional Research Service*, R41890, (2011).

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

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

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

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

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

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

[Royer 2012] 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).

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

[Walter 2011] 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).

[Wieneke 2009] M. Wieneke, W. Koch; “Combined person tracking and classification in a network of chemical sensor”, *International Journal of Critical Infrastructure Protection* 2, 51-67, (2009).

[Wieneke 2012] M. Wieneke, W. Koch, H. Friedrich, S. Chmel (2012); “Localization and Tracking of Radioactive Source Carriers in Person Streams”, *Fusion 2012*, 15th International Conference on Information Fusion, p 1860 – 1867, (2012)

[Womble 2001] P.C. Womble., C. Campbell, 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)

[Zalewska 2013] A. Zalewska, P. Wojciech, W. Tomaszewski, Limits of detection of explosives as determined with IMS and field asymmetric IMS vapour detectors, *Forensic Sci. Int.* 226, p. 168–172 (2013).

[Zhang 2010] W-H. Zhang, W-D. Zhang, L-Y. Chen; “Highly sensitive detection of explosive triacetone triperoxide by an In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> sensor.”, *Nanotechnology* 21 315502 (2010)