



Abschlussbericht

zum Verbundprojekt

Transport alternativ betriebener Fahrzeuge auf RORO-Fährschiffen (ALBERO)

Teilvorhaben: Entwicklung und Aufbau gassensorischer
Systeme zur Überwachung von Fährdecks und Ladestationen
für alternativ betriebene Fahrzeuge auf RoRo Fährschiffen
(13N14684)

Berichtszeitraum: Aug. 2018-Dez. 2021

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

1	Aufgabenstellung	2
2	Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde	3
3	Planung und Ablauf des Vorhabens.....	5
4	Kurzdarstellung der durchgeführten Arbeiten	7
5	Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde	33
5.1	Stand der Technik.....	33
5.2	Bekannte Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechte	35
6	Zusammenarbeit mit anderen Stellen	36
7	Die wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises.....	37
8	Verwertung	37
9	Abbildungsverzeichnis	39
10	Tabellenverzeichnis	41
11	Veröffentlichungen im Rahmen des Projektes	41
12	Literaturverzeichnis.....	41

1 Aufgabenstellung

Im Gegensatz zu bisherigen konventionell betriebenen Fahrzeugen gehen von alternativ betriebenen Fahrzeugen (ABF) und ihren Kraftstoffen (Flüssig- bzw. Erdgas oder Wasserstoff, Strom/Batterien) neue und andere Gefahren aus. Das Teilvorhaben der H-BRS zielt auf die Entwicklung gassensorischer Systeme zur Detektion der Leckage von alternativen Antriebsstoffen bzw. der möglichen Gasentwicklung beim fehlerhaften oder unsachgemäßen Ladevorgang von Antriebsbatterien auf Fährdecks bzw. Ladestationen auf RoRo Fährschiffen. Ziel ist es über die frühzeitige Detektion die Gefährdung von Mensch und Schiff zu minimieren.

2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

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 zu betreiben. Der Fokus richtete sich hierbei auf den Bereich chemischer Detektionstechnologien. Besonders 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.

Besonderes Potenzial hat sich das IDT im Bereich der Sensorik sowie der Spurenanalytik (Gasphase, Wischprobeneffizienz, Feststoffphase) aneignen können.

Das ISF beteiligt sich seit Jahren erfolgreich an nationalen und internationalen Forschungsprojekten. Im Bereich der Gasphasendetektion sind dies beispielsweise:

- RE(H)STRAIN: „REsilience of the Franco-German High Speed TRAIN Network“ (BMBF, FKZ 13N13787)
- C-BORD: „effective Container inspection at BORDER control Points“ (EU-H2020, GA 653323)
- VESPER^{Plus}: „Verbesserung der Sicherheit von Personen in der Fährschiffahrt“ (BMBF, FKZ 13N1192)
- VESPER Unterauftrag: „Verbesserung der Sicherheit von Personen in der Fährschiffahrt“, Messkampagne zur Messung von oxidierenden und reduzierenden Gasen mit einem System aus Halbleitersensoren (BMBF Schutz von Verkehrsinfrastrukturen Förderkennzeichen: 13N96494 im Unterauftrag FKIE, 06/2009-05/2010)
- Untersuchungen zum Einfluss von Fremdgerüchen auf die Leistungsfähigkeit von Sprengstoffspürhunden und Aufbau einer klimatisierten olfaktorischen Messstrecke zur Ausbildung von Sprengstoffspürhunden (Projekt Maskierung) (BMVg, Förderkennzeichen: M/SAB X/9A008, 01/2010 - 09/2011)

- SISA I: Schnelle Identifikation von Explosivstoffen und Strategien für das Aufspüren von IED-typischen Signaturen
(BMVg, Förderkennzeichen: E/E210/8D005/7F206, 04/2008 – 12/2010)
- „DAT #7“ Aufbau eines Systems zur Detektion von Brandbeschleunigern im Rahmen der NATO-Aktivität „Defence against terrorism“
(BMVg im Unterauftrag von Fraunhofer FKIE, Wachtberg, 12/2007 – 09/2009)

Insbesondere Im Projekt VESPER^{Plus} konnten bereits Erfahrungen in der Gassensorik von Gefahrstoffen auf Fährschiffen gesammelt werden, auf denen im Projekt ALBERO aufgebaut werden kann.

3 Planung und Ablauf des Vorhabens

In dem Teilvorhaben: „Entwicklung und Aufbau gassensorischer Systeme zur Überwachung von Fährdecks und Ladestationen für alternativ betriebene Fahrzeuge auf RoRo Fährschiffen“ werden zusammengefasst nachfolgende Arbeitspakete bearbeitet:

- AP 1: Zusammenfassung der in alternativen Antrieben verwendeten Chemikalien und deren relevante physiko-chemischen Parameter.
- AP 2: Erstellung einer Liste von möglichen Technologien und Gassensoren, die als Detektoren für die in AP 1 ermittelten Gase an Bord infrage kommen.
- AP 3: Aufbau einer Anemometereinheit und Erfassung der Strömungsverhältnisse auf dem geschlossenen Fährdeck.

- AP 4: Entwicklung und Aufbau von Sensorsystemen zu Überwachung von ABF-Stellplätzen
 - AP 4.2: Erfassung der derzeit an Bord befindlichen Gassensorik
 - AP 4.3: Erfassung der Gasatmosphäre an Bord sowie Entwicklung zweier Sensoreinheiten (zentral und verteilt) für die Detektion von Emissionen aus havarierten ABF.
 - AP 4.4: Anpassung eines Brandmeldesystems Systems zur großflächigen Überwachung des Fahrzeugdecks sowie Aufbau und Test an Bord.
 - AP 4.7: Anpassung eines Gaswarnsystems (Verteiltes Sensorsystem) für ABF-Stellplätze sowie Aufbau und Test an Bord.

- AP 5: Entwicklung und Aufbau eines Systems zur Überwachung einer Ladestation
 - AP 5.2: Ermittlung geeigneter Orte für den Aufbau einer überwachten Ladestation
 - AP 5.3: Entwicklung / Anpassung von effizienten Detektionsverfahren zur Erkennung von Gefahren während des Ladevorganges
 - AP 5.5: Erarbeitung eines Sicherheitskonzeptes für den Ladestandort
 - AP 5.6: Aufbau, Inbetriebnahme und Test eines Ladeplatzdemonstrators an Bord

- AP 6: Bereitstellung von Lehrmaterialien zu Sensortechnologien

		ALBERO Laufzeit 01.08.2018 - 31.07.2021																																						
		Projektmonat																																						
Unterarbeitspakete HBRS		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36			
1.2	Verhalten altern. KS in Havarien																																							
2.5	Ableitung Schutzkonzept																																							
3.3	Ermittlung geeigneter Stellplätze																																							
4.2	Erfassung Sicherheitstechnik Fähre																																							
4.3	Entwicklung Gas-Detektion																																							
4.4	Anpassung Brandmelde-technik																																							
4.7	Sicherheitskonzept Stellplatz / Demonstrator																																							
5.2	Ermittlung geeignete Ladeplätze																																							
5.3	Detektionsverfahren Gefahren beim Laden																																							
5.5	Sicherheitskonzept Ladeplatz																																							
5.6	Aufbau Onboard-Ladestation																																							
6.3	Erstellen Lehrmaterialien																																							
Meilenstein																																								

Abbildung 1: zeitlicher Ablauf des Projektes

Bedingt durch die Pandemie konnten wichtige Arbeitspakete des Teilvorhabens aufgrund der eingeschränkten Reismöglichkeiten bzw. -verbote nicht innerhalb des ursprünglichen Zeitplans umgesetzt werden. Dies betraf nachfolgende Arbeitspakete:

AP 4.4: Anpassung Brandmeldetechnik

AP 4.7: Sicherheitskonzept Stellplatz

AP 5.3: Detektionsverfahren Gefahren beim Laden

AP 5.3: Sicherheitskonzept Ladeplatz

AP:5.6: Aufbau Onboard Ladestation

Gesamt- und Teilvorhaben wurden bis zum 31.12.2021 kostenneutral verlängert. Die H-BRS wurde im Verlängerungszeitraum von der Ahr-Flutkatastrophe im Juli 2021 stark betroffen, was zu weiteren Einschränkungen bei der Vorbereitung von Versuchen führte.

4 Darstellung der durchgeführten Arbeiten

AP-Nr. 1		Alternative Antriebsarten und deren Eigenschaften (1 PM)
Teil-AP-Nr. 1.2		Darstellung des Verhaltens alternativer Kraftstoffe in Havariesituationen

Wesentliche, für ein auf Gaswarner basierendes Detektionssystem relevante Gase, sind in nachfolgender **Tabelle 1** aufgeführt.

Tabelle 1: Liste der Zielstoffe aus ABF für eine frühzeitige Detektion von Fahrzeughavarien über Gasphasendetektoren und deren untere Explosionsgrenze in Luft (Quelle UEG-Werte: Gestis Stoffdatenbank)

Substanz	UEG
Methan (aus CNG, LNG)	4,4 %
Propan (aus LPG, CNG, LNG)	1,7 %
Butan (aus LPG, CNG, LNG)	1,4 %
Wasserstoff (aus Wasserstofffahrzeugen, Batterieelektrischen Fahrzeugen)	4,0 %

Im Brandfall oder beim Platzen von Batterien als Folge eines thermal-runaways, können eine Vielzahl weiterer, teilweise sehr toxischer Stoffe entstehen, deren

Zusammensetzung stark von dem verwendeten Batterietyp abhängig sind. Bei in der Literatur beschriebenen Tests konnte festgestellt werden, dass bereits frühzeitig CO₂ und H₂ als Oxidationsprodukte des Elektrolyten an der Oberfläche der Elektrode entsteht. Zusätzlich entstehen unter anderem kleine Mengen von CH₄, C₂H₄, C₂H₆ und C₃H₈. In Zellkomponenten, die Fluor enthalten bilden sich organische Fluor-Verbindungen. (Jie Sun, 2016)

Die bei einer Havarie von ABF auftretenden Gase können leichter (Wasserstoff>>Erdgas) oder schwerer als Luft sein (LPG). Die Platzierung der Sensoren bodennah oder unter der Decke könnte daher je nach Art des Gases Auswirkung auf die Detektion haben.

AP-Nr. 2		Gefahrenpotential alternativ betriebener Fahrzeuge auf RORO-Fährschiffen (1 PM)
Teil-AP-Nr. 2.5		Ableitung eines Schutzkonzeptes nach strukturierten Prioritäten

Kriterien für die Auswahl geeigneter Sensoren sind:

- Sensitivität
- Spezifität
- Selektivität
- Reaktionszeit
- Kosten (Marktverfügbarkeit, Beschaffung und Wartung)

Grundsätzlich geeignete, bereits kommerziell verfügbare Sensoren sind in Tabelle 2 dargestellt.

Tabelle 2: Auflistung möglicher Detektoren für einen Einsatz an Bord zur Detektion von Emissionen aus havarierten ABF

Szenario	Detektor	Analyt
Freisetzung von Gasen aus gasbetriebenen ABF	PID	Butan (LPG)
	Durchfluss NDIR Gassensor	Methan, Kohlenwasserstoffe (CNG, LNG)
	NDIR-Gassensor (geringere Empfindlichkeit)	Methan, Kohlenwasserstoffe (CNG, LNG)

	Elektrochemische Zelle	Wasserstoff
	Pellistor (geringe Empfindlichkeit)	Brennbare Gase, einschließlich Wasserstoff (CNG, LNG, Wasserstoff)
	Metalloxidsensoren (anfällig für Änderungen im chemischen Hintergrund)	Brennbare Gase (CNG, LNG, Wasserstoff)
Freisetzung aus Li-Ionen Akku im thermal-run-away	Elektrochemische Zelle	Wasserstoff
	Metalloxidsensoren (anfällig für Änderungen im chemischen Hintergrund)	Allgemein: Oxidierende oder reduzierende Gase, spezifisch: Wasserstoff

In Versuchen an Bord bei Normalbetrieb der Schiffventilation (10 Luftwechsel/h) wurden in einem Abstand von circa 12 m von der Emissionsquelle Verdünnungen um den Faktor 20 – 70 festgestellt werden. Die Verdünnung erfolgte dabei vor allem auf den ersten Metern der Ausbreitung. Eine Detektion von kleineren Gaslecks ist demnach auch in größerer Entfernung mit im ppm-Bereich anzeigenden Sensoren möglich.

Wasserstofffreisetzungen aus geschädigten Li-Ionen-Batterien sind hingegen in Konzentration und Menge deutlich niedriger. Chemische Sensoren müssen sich daher für eine Überwachung des Ladevorgangs nahezu unmittelbar am Fahrzeug befinden.

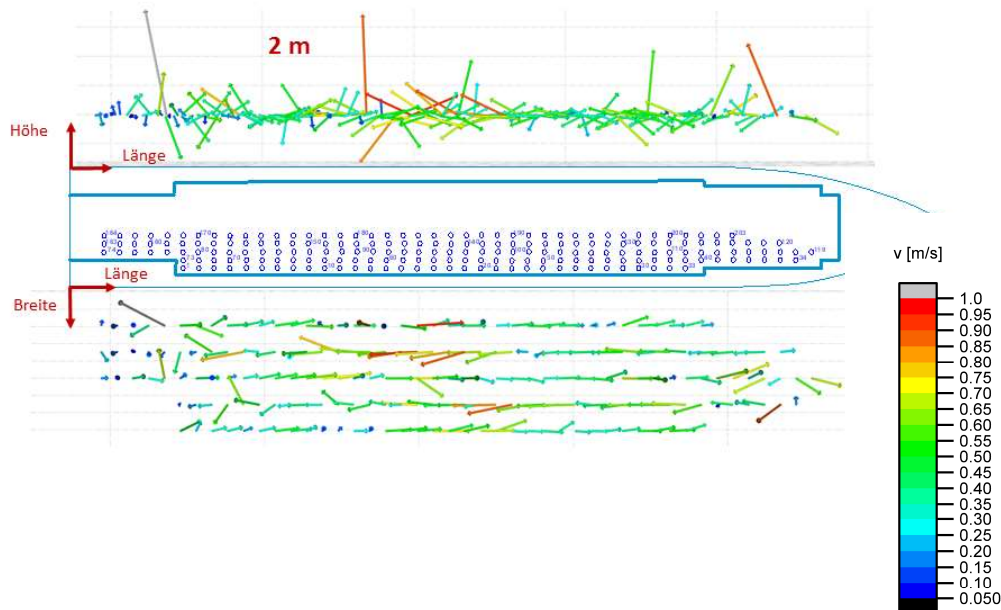
AP-Nr. 3		Boarding-Konzept (4 PM)
Teil-AP-Nr. 3.3		Ermittlung besonders geeigneter Stellplätze an Bord

Zusammen mit den Partnern wurden verschiedene ABF-Stellplatzkonzepte diskutiert. Dabei zeigte sich, dass eine Festlegung definierter ABF-Stellplätze an Bord

überwiegend nicht möglich war. Gründe hierfür waren eingeschränkte Möglichkeiten der Vorsortierung der Fahrzeuge (unzureichende Vorstaflächen im Hafen, Zeitbegrenzungen) als auch die stark wechselnde Auslastung mit verschiedenen Fracht- und Fahrzeugtypen. Letzteres führte zu großen Unterschieden in den Stauungskonzepten an Bord. So wurde festgestellt, dass für ABF bei geringer Auslastung der Fähre eine Stauung im offenen Fährdeck empfohlen werden kann. Bei höherer Auslastung, insbesondere bei Belegung offener Fährdecks mit Gefahrgut, würden ABF jedoch auf absehbare Zeit auf allen Fährdecks gestaut werden.

Bei Stauung auf dem offenen Fährdeck erübrigt sich die Gasphasendetektion, da durch Wind Gase schnell verdünnt werden. Bei Stauung im geschlossenen Fährdeck kann davon ausgegangen werden, dass ABF über die gesamte Länge des Ladedecks – vorzugsweise an den Außenspuren aufgrund der besseren Zugänglichkeit – abgestellt werden. Die Gasphasendetektion muss daher das gesamte Ladedeck und nicht nur einzelne Abschnitte erfassen. Im Rahmen des Projektes wurden hierfür ein verteiltes Sensornetzwerk und ein mit einem Sensorknoten versehenes Rauchabsaugsystem entwickelt.

Voraussetzung für eine Detektion der relevanten Stoffe mit den in **Tabelle 1** genannten Sensoren ist, dass die Gase möglichst schnell zum Detektionssystem gelangen. Um einen Eindruck von den Strömungsbedingungen auf dem Fährdeck zu bekommen wurde eine mobil und autark betreibbare 3D-Anemometereinheit aufgebaut und die Luftströmungen auf verschiedenen Fährdecks bei unterschiedlichen Ventilationsbedingungen vermessen. Beispielhaft sind die Ergebnisse der Luftströmungsmessungen auf der Fähre „Britannica“ in Abbildung 2 dargestellt.



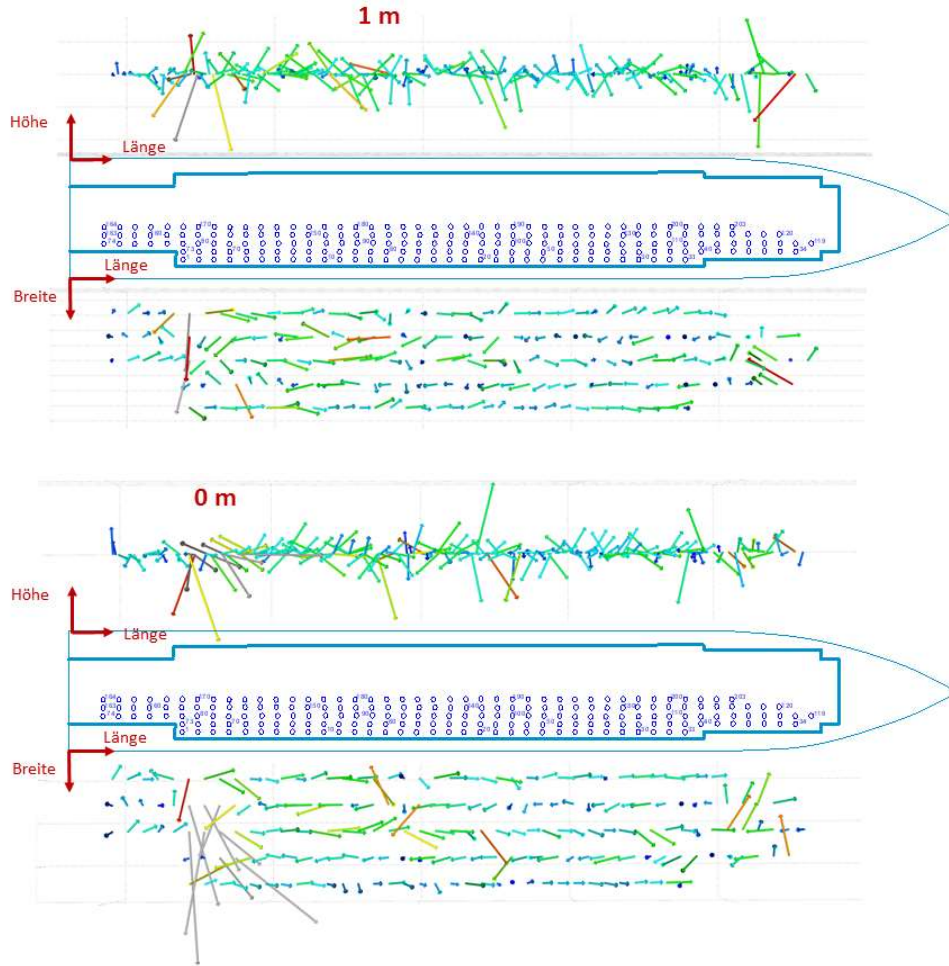


Abbildung 2: Messkampagne „Britannica“, Strömungsvektoren Deck 3, Höhe 0 m, 1 m und 2 m bei 10fachem Luftwechsel/h

Es zeigte sich, dass die Luftströmungen trotz erzwungener Lüftung vom Heck zum Bug kein einheitliches Bild zeigen. Die Strömungsgeschwindigkeiten lagen meist in einem Bereich $< 0,6$ m/sec. Teilweise bildeten sich zwischen den Fahrspuren gegenläufige Luftströmungen aus. Die Luftströmungen wurden erwartungsgemäß vom Lüftungsregime des Schiffes und der Beladung beeinflusst.

AP-Nr. 4		Der sichere Transport (24 PM)
Teil-AP-Nr. 4.2		Erfassung der derzeit auf den Ostseefähren vorhandenen Sicherheitstechnik

Es konnten nur wenige Hinweise auf die Existenz stationärer Gaswarnsysteme auf dem Fährdeck von Bestandsfähren gefunden werden. In einem Bericht („Studie zum Brandschutz bei der Beförderung von Fahrzeugen mit Elektroaggregaten oder mit Elektroantrieb auf RoRo- und RoPax-Schiffen“; Auftraggeber: BMVBS; 2013;

Berichtsnummer: 2013.003) wurde durch den Germanischen Lloyd zwar die Nutzung spezieller chemischer Sensorik als Frühwarnsystem zur Überwachung von batterieelektrischen Fahrzeugen (und weiteren ABF) diskutiert, jedoch sind entsprechende System bislang nicht an Bord installiert.

Seitens des Projektpartners Lloyds Register werden von RoRo/RoPax-Fähren keine stationären chemischen Gassensorsysteme für die Ladedecks gefordert. Anfragen bei den im Projekt beteiligten Reedern ergab, dass sich an Bord nur mobile Gaswarnsysteme befinden, welche bei Bedarf von der Crew zum Eigenschutz genutzt werden.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass im maritimen Bereich durchaus stationäre Systeme u. A. zur UEG-Überwachung eingesetzt werden. Die Überwachung von Fährdecks mittels Gasdetektoren erfolgt hingegen allem Anschein nach nur im Ausnahmefall, obwohl die Solas ein Lüftungsregime in Abhängigkeit von über Gasphasendetektoren festgestellte Belastung (CO, NO₂, UEG) grundsätzlich erlaubt. Die Überwachung brennbarer permanent Gase wird in dem Solas Circular (IMO - International Maritime Organisation, 2015) nicht explizit erwähnt.

Für den Arbeitsschutz existieren an Bord je nach Schiff einige einfache Sensor/Detektionssysteme. Üblich sind Drägerröhrchen und mobile Multigaswarnsysteme. Für die im Projekt betrachtete Fragestellung sind dabei nur Multigaswarnsysteme bzw. Einzelsystem zur Messung explosionsgefährlicher Atmosphären von Interesse. Diese basieren in der Regel auf wenig empfindlichen Pellistoren.

AP-Nr. 4		Der sichere Transport (24 PM)
Teil-AP-Nr. 4.3		Entwicklung von effizienten Gas-Detektionsverfahren
Teil-AP-Nr. 4.4		Anpassung von Brandmeldetechnik
Teil-AP-Nr. 4.7		Entwicklung eines ganzheitlichen Sicherheits-Konzeptes für ABF-Stellplätze an Bord und Umsetzung als Demonstrator an Bord

Im nachfolgenden Text wurden die Ergebnisse aus AP 4.3, 4.4 und 4.7 zusammengefasst.

Für die Festlegung von Alarmschwellen und die Auswahl geeigneter Sensoren müssen auch eventuell vorhandene Hintergrundkonzentrationen der Zielstoffe oder der eventuell störende chemische Hintergrund berücksichtigt werden. Über den Zeitraum einer Überfahrt konnten schwankende Wasserstoffkonzentration bis in den Bereich von circa 3 ppmV gemessen werden. Diese Konzentration liegt deutlich über dem natür-

lichen Hintergrund von 0,5 ppmV. Als mögliche Quellen wurden Korrosionsprozesse und Abgase diskutiert.

Autoabgase beim Be- und Entladeprozess führten beim NO_x-Sensor zu deutlichen Reaktionen.

Methan hat in der Umgebungsluft einen Anteil von circa 2 ppmV, während die Anteile von Propan und Butan \ll 1 ppmV liegen. Es gab im Rahmen der Untersuchungen an Bord keine Hinweise auf erhöhte Methanwerte oder schwankende Propan- und Butankonzentrationen $>$ 1 ppmV. Der Gesamt-VOC-Hintergrund – gemessen mit einem PID (MiniRae 3000; 10,6 eV) – schwankte bei Messungen auf den Ladedecks der Peter Pan, Hollandica und Britannica im Bereich von 0,0 – 2 ppmV (bezogen auf Isobutan als Kalibriergas). Als Quelle der VOC-Belastung konnte teilweise die Fracht (z.B. frisch geschnittenes Holz) der geladenen LKW identifiziert werden.

Der chemische Hintergrund wurde zudem während Überfahrten mit Direkt-Einlass Massenspektrometer gemessen. Erwartungsgemäß konnten Wasserstoff, Methan, CO₂, Argon und weitere typische Luftbestandteile sowie sehr geringe Mengen flüchtiger VOCs in der Luft gemessen werden. Das normale Lüftungsregime verhinderte erfolgreich die Ansammlung höherer Konzentrationen.

Es wurden zwei Sensorsysteme (verteilte Sensorknoten, zentraler mit einem Rauchsaugsystem gekoppelter Sensorknoten) aufgebaut, nach Tests wiederholt angepasst und an Bord installiert.

Für die vorgesehenen Messungen mit dem verteilten Sensorsystem sollten bis zu sechs verteilte Sensorknoten angebracht werden. Da die Messungen über einen längeren Zeitraum erfolgen sollten, kam eine Spannungsversorgung über Batterie oder Akku nicht in Betracht, sodass diese über Kabel erfolgen musste.

Sowohl die Stromversorgung als auch die Kommunikation erfolgten daher über selbst konfektionierte Kabel. Aufgrund der voraussichtlich erforderlichen Kabellänge, wäre eine zuverlässige Kommunikation über Ethernet kaum realisierbar gewesen, hier ist die maximale Länge auf ca. 100 m beschränkt. Daher wurde die Kommunikation zwischen den einzelnen Sensorknoten und einem zentralen Hub über EIA-422 implementiert, wodurch theoretisch Kabellängen von deutlich über 1000 m realisierbar sind.

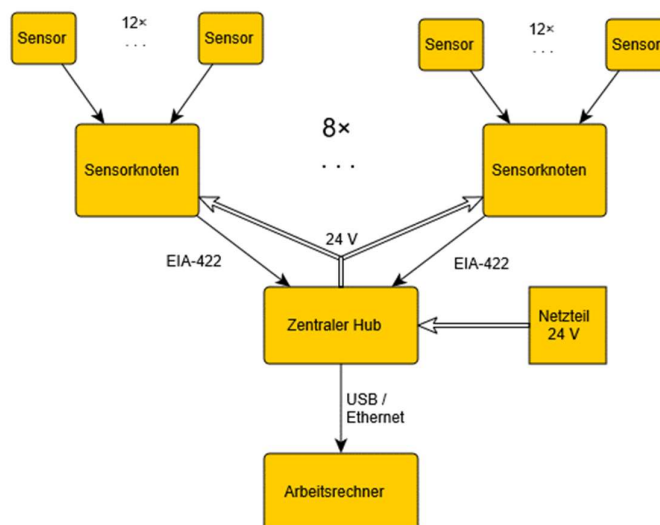


Abbildung 3: Schematische Übersicht des verteilten Sensorsystems zur Messung der Umgebungsluft

Der zentrale Hub verfügte über einen Mikrocontroller, welcher per UART über EIA-422-Treiber mit bis zu acht Sensorknoten kommuniziert. Auf der anderen Seite kommunizierte er wahlweise per USB (CDC) oder Ethernet (TCP) mit einem Arbeitsrechner, auf welchem auch die Speicherung der Messdaten erfolgte. Die zentrale Versorgungsspannung von 24 V (DC) wurde über ein externes Netzteil bereitgestellt und über den zentralen Hub (siehe **Abbildung 4**) auf die Sensorknoten verteilt. Die Struktur des Systems ist in **Abbildung 3** dargestellt.

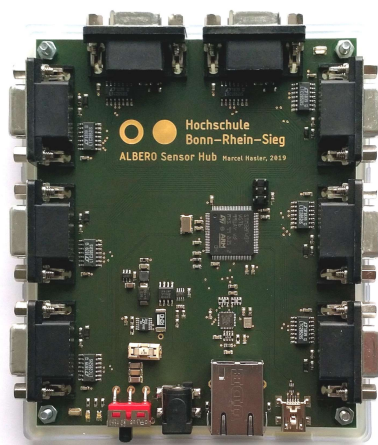


Abbildung 4: Anschlüsse des zentralen Hubs mit Anschlüssen für 24 V, Ethernet und USB (unten) sowie Anschlüssen für die Kommunikation mit bis zu acht Sensorknoten

Die Kommunikation zwischen dem zentralen Hub und den Sensorknoten auf der einen und zwischen Hub und Arbeitsrechner auf der anderen Seite erfolgte unabhängig von

der verwendeten Schnittstelle (USB oder Ethernet) über ein einheitliches, textbasiertes Protokoll.

Jeder Sensorknoten kann bis zu 9 Sensoren unterschiedlichen Typs aufnehmen.



Abbildung 5: Hauptplatine der Sensorknoten mit 9 bestückten Anschlüssen für Sensorplatinen

Da die Auswahl der zu verwendenden Sensoren zum Zeitpunkt der Entwicklung noch nicht feststand und zur Aufrechterhaltung der Flexibilität, wurden auf der Platine (**Abbildung 5**) insgesamt zwölf mögliche Anschlüsse vorgesehen.

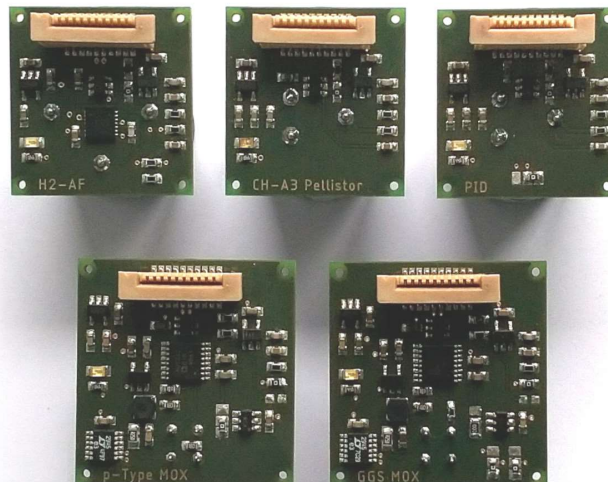


Abbildung 6: Sensorplatinen zum Ansteuern und Auslesen verschiedener Sensortypen

Da die Steuerung und das Auslesen der Sensoren auf jeweils unterschiedliche Weise erfolgen musste, wurden für jeden Sensortyp individuelle Adapter-Platinen entwickelt (**Abbildung 6**). Diese kleinen Platinen wurden über eine einheitliche Schnittstelle an den Sensorknoten angeschlossen.

Um die bestmögliche Signalqualität gewährleisten zu können, erfolgte die Analog-Digital-Umsetzung unmittelbar auf den Sensorplatinen selbst. Die Kommunikation zwischen Hauptplatine und den A/D-Umsetzern sowie weiteren benötigten Komponenten wurde mittels I²C, einem zuverlässigen standardisierten seriellen Datenbus, implementiert.

Da die Metalloxid-Halbleitersensoren über integrierte Heizelemente verfügen, welche jeweils mittels einer vorgeschriebenen, teilweise auch alternierenden angelegten Spannung gesteuert werden müssen, wurde für diese Sensoren zusätzlich eine Strom- und Spannungsüberwachung vorgesehen.

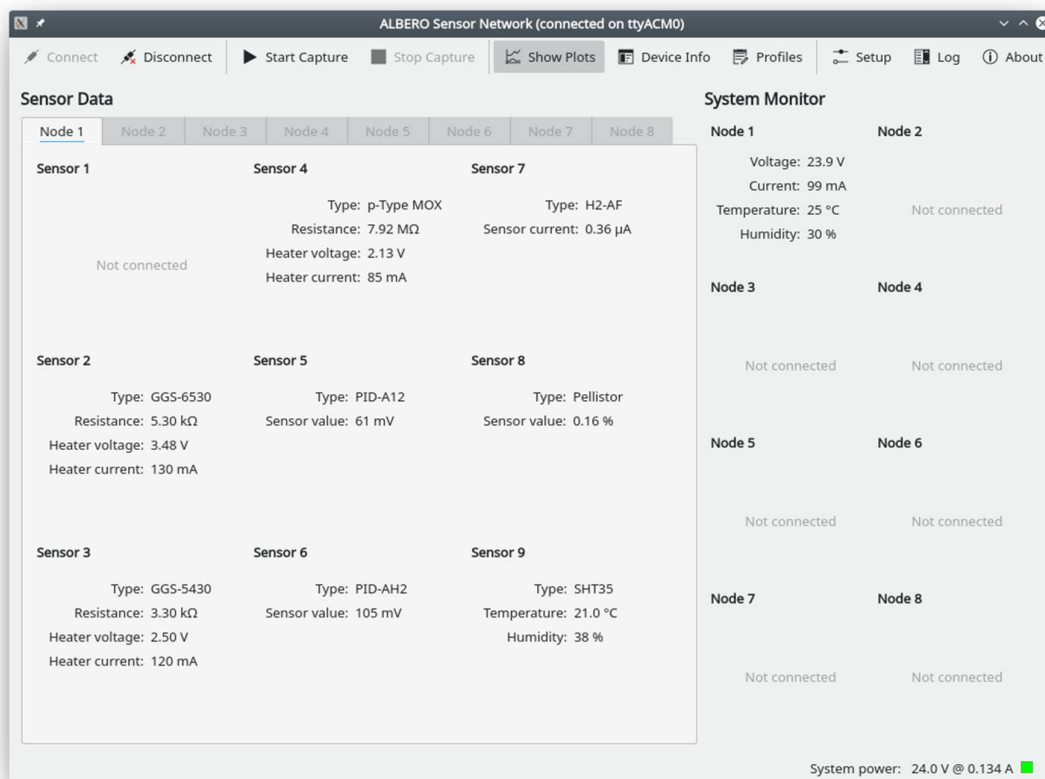


Abbildung 7: Screenshot von Benutzersoftware zur Steuerung des Sensorsystems und Aufzeichnung der Messdaten

Für manche MOX-Typen werden vom Hersteller die Anwendung von *Reset*-Zyklen empfohlen, bei welchen die Heizerspannung in einem festen zeitlichen Verhältnis – beispielsweise 5:1 – zwischen der regulären Betriebsspannung und einer deutlich höheren Reset-Spannung umgeschaltet wird. Die auf den Sensorplatinen implementierte Schaltung ermöglichte diese Umschaltung, wobei die beiden Spannungspegel sowie die Dauer des jeweiligen Pegels durch die Firmware auf der Hauptplatine des Sensorknotens gesteuert wurde und vom Anwender über eine Benutzersoftware

konfiguriert werden konnte.

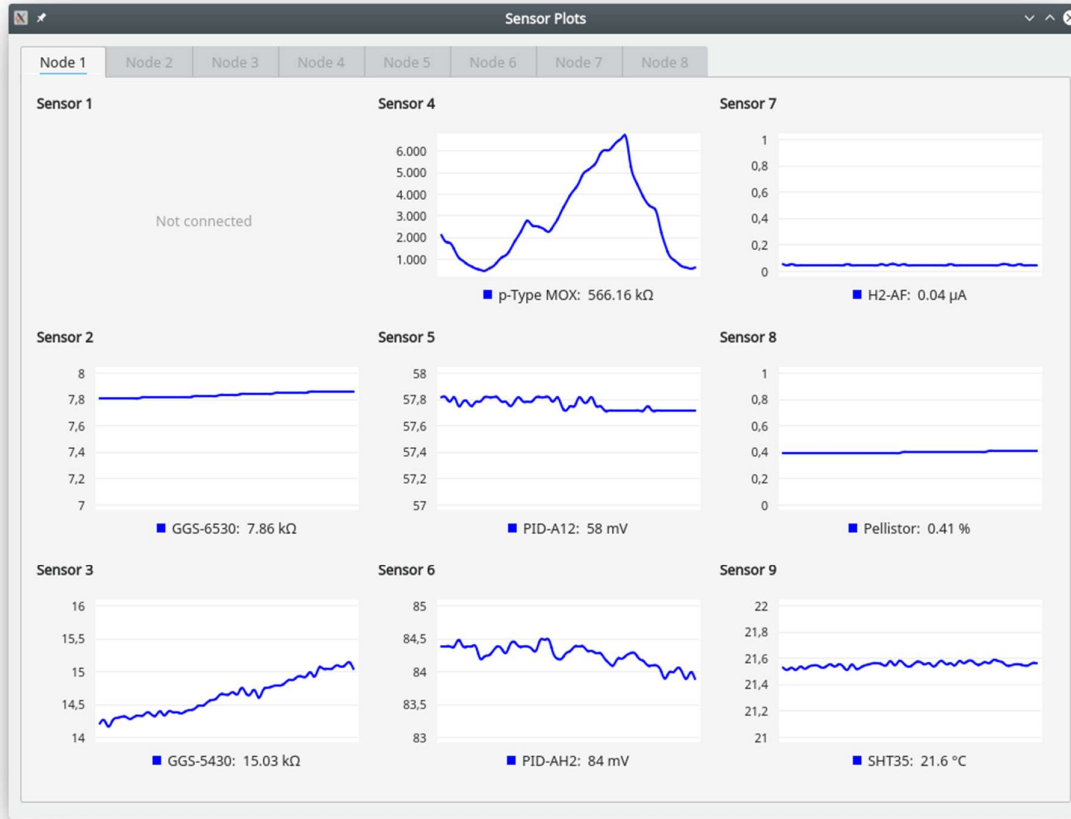


Abbildung 8: Screenshot der softwareseitigen Darstellung von Messkurven verschiedener Sensoren eines Messknotens (Node 1) Über die Reiter können die Messkurven weiterer Sensorknoten angezeigt werden, sofern installiert.

Die Software (Screenshots der von Benutzeroberfläche: **Abbildung 7**, **Abbildung 8**) ermöglichte darüber hinaus die Überwachung und Aufzeichnung sämtlicher Messwerte. Die Messdaten wurden im CSV-Format gespeichert, sodass die Daten später einfach in ein Tabellenkalkulationsprogramm oder eine eigene Anwendung importiert werden konnten. Um während längeren unbewachten Messreihen Datenverluste aufgrund fehlerhafter Datenträger ausschließen zu können, erfolgte die Speicherung der Daten optional redundant auf zwei Datenträgern simultan.

Die verwendeten Sensorknoten wurden über einen zentralen Hub gesteuert und ausgelesen (Abbildung 9). Der zentrale Hub verfügte über einen Mikrocontroller, welcher per UART über EIA-422-Treiber mit bis zu acht Sensorknoten kommunizierte. Auf der anderen Seite kommunizierte er wahlweise per USB (CDC) oder Ethernet (TCP) mit einem Arbeitsrechner, auf welchem auch die Speicherung der Messdaten erfolgte. Die zentrale Versorgungsspannung von 24 V (DC) wurde über ein externes Netzteil

bereitgestellt und über den zentralen Hub auf die Sensorknoten verteilt.

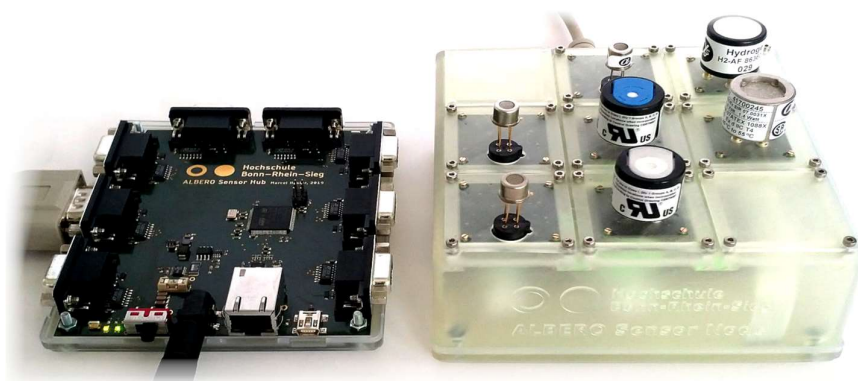


Abbildung 9: zentraler Hub sowie bestückter Sensorknoten für Labortestmessungen

Jeder Sensorknoten konnte bis zu 9 Sensoren unterschiedlichen Typs aufnehmen. Eingesetzt wurden die in der nachfolgenden **Tabelle 3** aufgeführten Sensoren.

Tabelle 3: Tabelle der getesteten Sensoren, ihrer Zielgase, Sensitivität sowie geplanter Anwendungsbereich; alle Sensoren wurden von AlphaSense UK bezogen

Bezeichnung	Typ	Zielgase	Sensitivität	Zu überwachendes ABF
GG5 6530	MOx	H ₂	Unterer ppmV-Bereich	Wasserstoff, Li-Ionen
GG5 5430	MOx	Ox. U. red. Gase	Unterer ppmV-Bereich	Alle
p-Type	MOx	Ox. U. red. Gase	Unterer ppmV-Bereich	Alle
PID A12	PID	Ionisierbare VOC	10-5000 ppmV	LPG, (Li-Ionen über VOC-Emissionen)
PID AH2	PID	Ionisierbare VOC	0,1-50 ppmV	LPG
H2-AF	EC	H ₂	Unterer ppmV-Bereich	Wasserstoff, Li-Ionen
CH-A3	Pellistor	Brennbare Gase	% Bereich	CNG, LNG, LPG

IRM-AT	Infrarot Thermopile	Methan	Ab 500 ppm	CNG, LNG
--------	------------------------	--------	------------	----------

Die erste Installation eines verteilten und zentralen Sensorsystems wurde erfolgreich an Bord installiert und getestet. Für einen Dauerbetrieb an Bord waren jedoch größere Modifikationen notwendig. So mussten aus Gründen des Brandschutzes Kunststoffrohre gegen Metallrohre ausgetauscht werden. Auch wurde der Schutz gegen Sprühwasser deutlich verbessert, da das Deck regelmäßig bis unter die Decke mit Wasser abgespült wurde.

Im engen Dialog mit der Schiffsführung und den Sicherheitsbeauftragten von Stena Line sowie den Fachleuten des Projektpartners Lloyds Register wurde die in Abbildung 10 dargestellte überarbeitete Installation entwickelt. Eine wesentliche Änderung war die neue Strömungsführung. Die RAS (Rauchansaugsystem) Ansaugpumpe förderte Luft durch vier vertikale Stahlrohre, die auf verschiedenen Höhen Öffnungen besaßen und bündig mit der Deckswand abschlossen. Der Durchmesser der Ansaugöffnungen (2,5 – 3,0 mm) war im Vergleich zum Rohrdurchmesser (23,5 mm) so klein, dass die Gefahr eines Hochsaugens von eventuell eintretendem Wasser vernachlässigt werden konnte. Die vertikalen Ansaugleitungen wurden in einem zentralen horizontalen Stahlrohr unterhalb der Deckenstreben gesammelt. Um den vorgeschriebenen Explosionsschutz einzuhalten, wurden die unteren Ansaugöffnungen oberhalb von 45 cm vorgesehen (Abbildung 10 A, Detailansicht). Die in wasserdicht eingehausten Sensorknoten 1-4 waren jeweils oberhalb der Ansaugöffnungen im Luftstrom platziert und in die Decksnischen eingerückt (Abbildung 10 B).

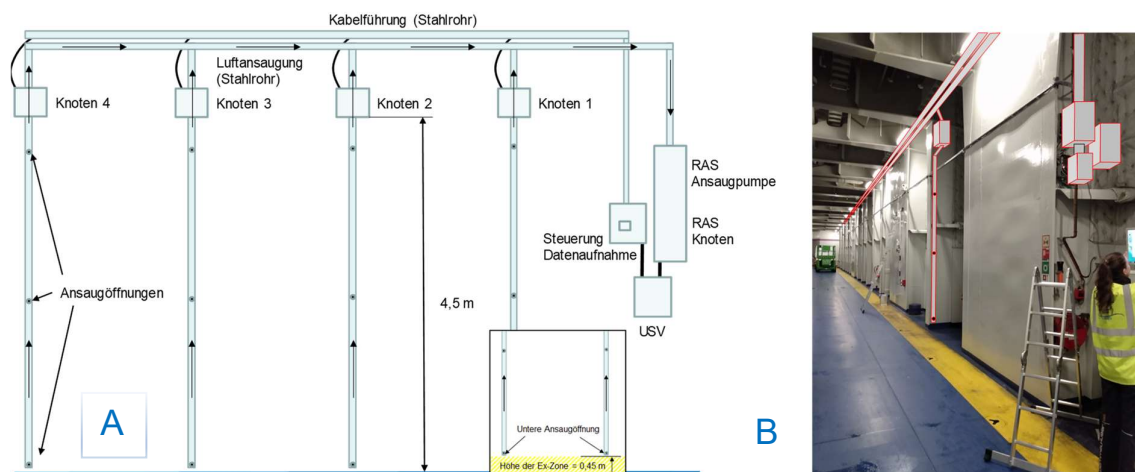


Abbildung 10: Optimierte On-board-Installation: A) Schema mit Luftströmungsführung, B) Visualisierung des Einbaus (rot markiert)

Am Ausgang der RAS Ansaugpumpe war der RAS Sensorknoten angeschlossen. Es war zusätzlich eine unterbrechungsfreie Stromversorgung (USV) integriert, die bei kurzzeitigen Spannungsausfällen oder -schwankungen den Betrieb aufrechterhielt. Die für die Kommunikation zwischen Sensorknoten und Hub sowie für die Spannungsversorgung notwendigen Kabel wurden in Stahlrohren geführt, die parallel zur horizontalen Luftansaugung verliefen.

Zum Schutz der Sensorknoten der verteilten Anordnung wurden diese in Aludruckgussgehäuse montiert (Abbildung 11).

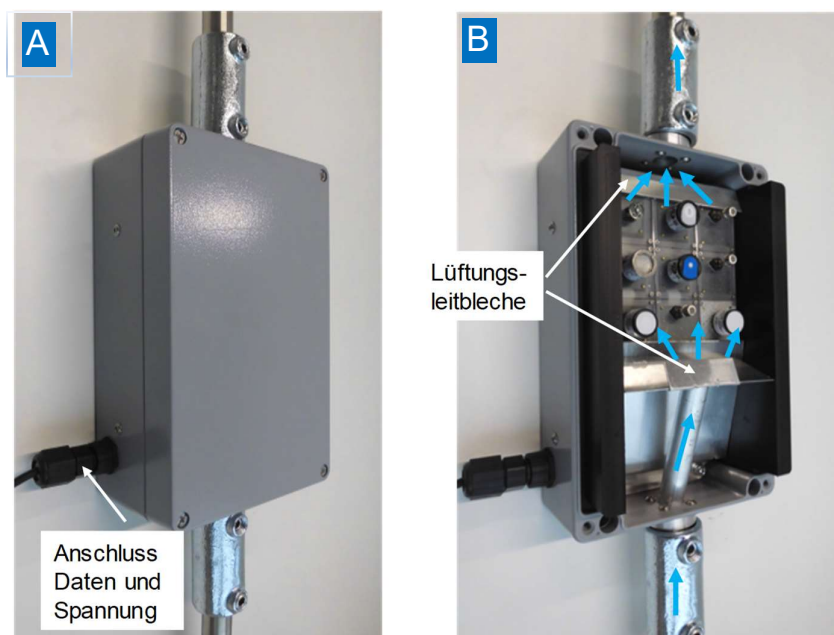


Abbildung 11: Sensorknotengehäuse der verteilten Anordnung. A) Aludruckgussgehäuse in IP 67 Ausführung, der Anschluss zur Spannungsversorgung und Datenübertragung entspricht IP 55, B) geöffnetes Gehäuse mit Lüftungsleitblechen, die blauen Pfeile indizieren die Luftströmung

Die für die Ansaugung der Decksatmosphäre notwendige Luftströmung wurde durch die Pumpe des Rauchansaugsystems (RAS) erzeugt. Sie saß am Ende des Rohrleitungssystems (Abbildung 10) und war ebenfalls in einem Aluminiumgehäuse verbaut. Ihr Ausgang war direkt mit dem RAS-Sensorknoten verbunden, der zum besseren Anströmverhalten in einer eigenen Einhausung untergebracht war.

Das an Bord der Hollandica installierte System wurde an Bord mittels der Freisetzung kleiner Gasmengen getestet. Die Freisetzung erfolgte in den Zwischenräumen zwischen den – häufig mit LKWs besetzten Fahrspuren.

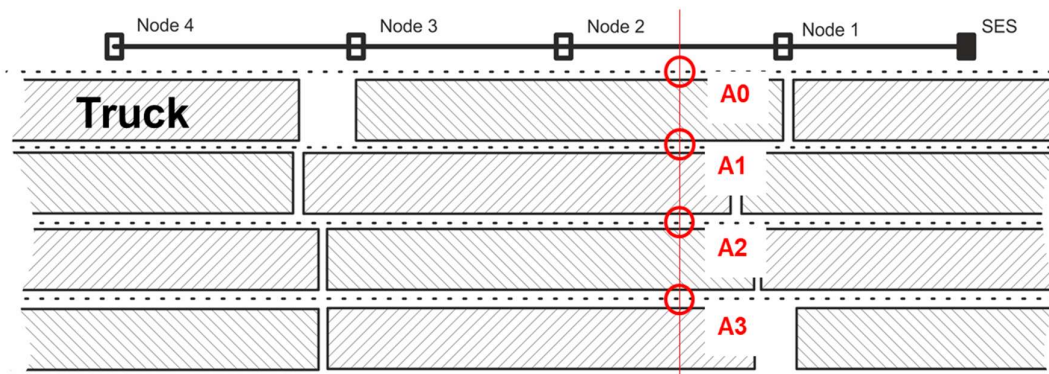


Abbildung 12: Schematische Darstellung der installierten Sensorsysteme (Node 1- 4: verteilte Sensorknoten, SES: Im Rauchansaugsystem integrierter zentraler Sensorknoten); in rot A0 – A3: Orte der Gasfreisetzung in Bodennähe. Die Entfernung zwischen Node 4 und SES beträgt circa 34 m). Das Fahrdeck wird von links nach rechts belüftet.

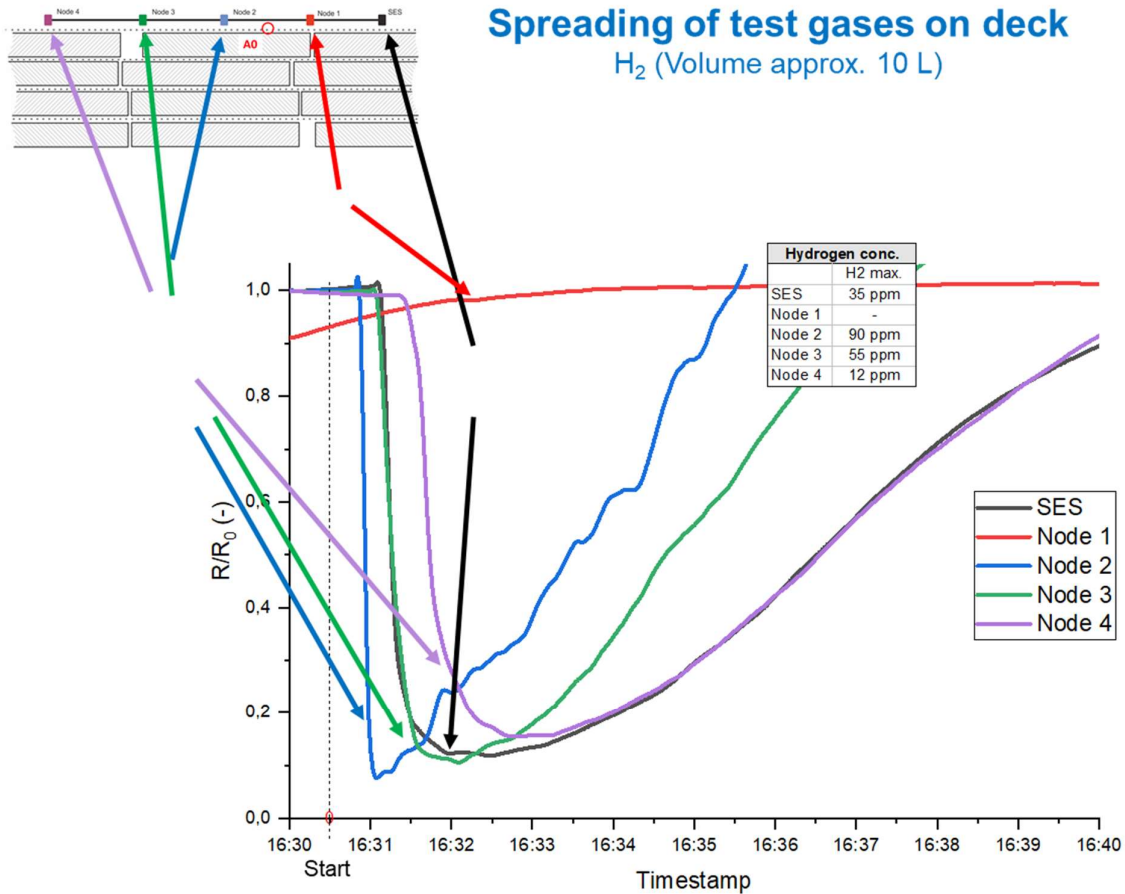


Abbildung 13: Sensorantworten des Wasserstoffsensors GGS 6530 (bei der Freisetzung von 10 L H₂ an Position A0 (rote Markierung) während einer Überfahrt). Die angegebenen Konzentrationen sind als Abschätzung zu verstehen, da sich der Sensor bei den genannten Konzentrationen nahe seiner Sättigung befindet. Die Sensorknoten reagieren gemäß der übergeordneten Strömung der Fährdeck-Belüftung. Der zentrale Sensor (SES) reagiert aufgrund der aktiven Ansaugung über das RAS etwas schneller als der letzte Sensorknoten (Node 4, violett).

In Abbildung 13 sind die Sensorantworten bei einer Wasserstofffreisetzung zwischen Wand und der mit LKW belegten Fahrspuren dargestellt. In dem Versuch wurde von den Wasserstoffsensoren im strömungsaufwärts gelegenen Node 1 kein Wasserstoff detektiert. Erfolgt die Freisetzung zwischen den Fahrspuren (Position A1 – A3, siehe Abbildung 12) kam es auch an diesem Sensor zu einer Anzeige. In Strömungsrichtung liegende Sensoren reagierten teilweise nicht in der zu erwartenden Reihenfolge. Ursache hierfür waren die in **Abbildung 2** dargestellten und vermutlich durch die Beladung bedingten Verwirbelungen. Dieser Umstand erschwerte die räumliche Zuordnung der Emissionsquelle anhand der Sensorreaktion.

Signalantworten auf H₂ und Butan/Propan Abhängig vom Ort

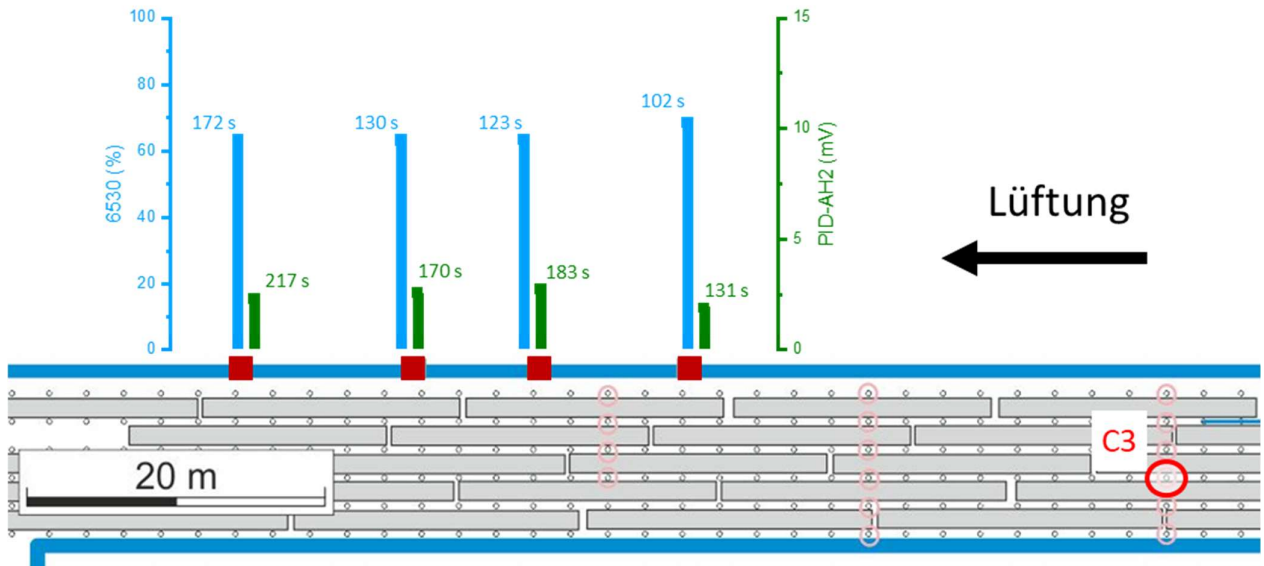


Abbildung 14: Ergebnisse von kurzen Gasfreisetzungsversuchen (Wasserstoff, LPG; circa 5 sec.) mit 30 m Abstand zum ersten Sensorknoten entgegen der Strömungsrichtung (rote Markierung C3). Angegeben sind die Reaktionen des Wasserstoffsensors GGS 6530 (R/R0 in %) und des Photoionisationsdetektors (mV). Die angegebene Zeit auf den Balken entspricht der Zeitdifferenz zwischen Freisetzung und Reaktion beim Sensor.

Erfolgte die Freisetzung in größerem Abstand (siehe Abbildung 14) reagierten die Sensoren jedoch zeitlich in Abhängigkeit zu ihrem Abstand zur Emissionsquelle. Die Konzentration der freigesetzten Gase nahm mit der Entfernung kaum noch ab und ließ sich insbesondere beim Wasserstoff sehr empfindlich detektieren.

Die Funktionsfähigkeit des Aufbaus und der verbauten Sensoren konnten im Langzeitversuch an Bord demonstriert werden. Die Sensitivität der gewählten Sensoren zeigte sich insbesondere für Wasserstoff, aber auch für die Detektion von LPG-Leckagen als ausreichend. Die im Sensorknoten verbauten Sensoren für Methan (Pellistor, IRM-AT) können große Freisetzungen auf dem Fährdeck detektieren, Leckagen im Bereich von einigen L/sec werden hingegen nicht sicher erfasst. Abhilfe könnten hier Durchfluss-Infrarotsensoren bieten, die jedoch deutlich aufwendiger und teurer sind. Von den im Sensorknoten verbauten Sensoren brachten sowohl der p-type MO_x-Sensor als auch der Pellistor keinen Zusatznutzen für die im Projekt bearbeiteten Fragestellungen. Die Nutzung beider PID-Sensoren (PID A12, PID AH) erscheint sinnvoll, um einen größeren Konzentrationsbereich abdecken zu können. Ähnliches gilt für die Wasserstoffsensoren VOC GGS 6530 and H₂-AH, welche sich zudem aufgrund unterschiedlicher

Querempfindlichkeiten zur wechselseitigen Verifizierung und damit zur Verringerung von Fehlalarmen nutzen lassen.

Verschiedene Betriebszustände an Bord (Lüftungsregime, Be- und Entladung) bewirkten Änderungen der chemischen Zusammensetzung der Gasatmosphäre und nahmen auch Einfluss auf die Gasphasendetektoren.

In der nachfolgenden **Abbildung 15** wird unter anderem der Einfluss der Be- und Entladeprozesse auf die Sensoren erkennbar. In dieser Zeit wurde die Ventilation zum Schutz der Mitarbeiter und Passagiere von 10 auf 20 Luftwechsel/h erhöht.

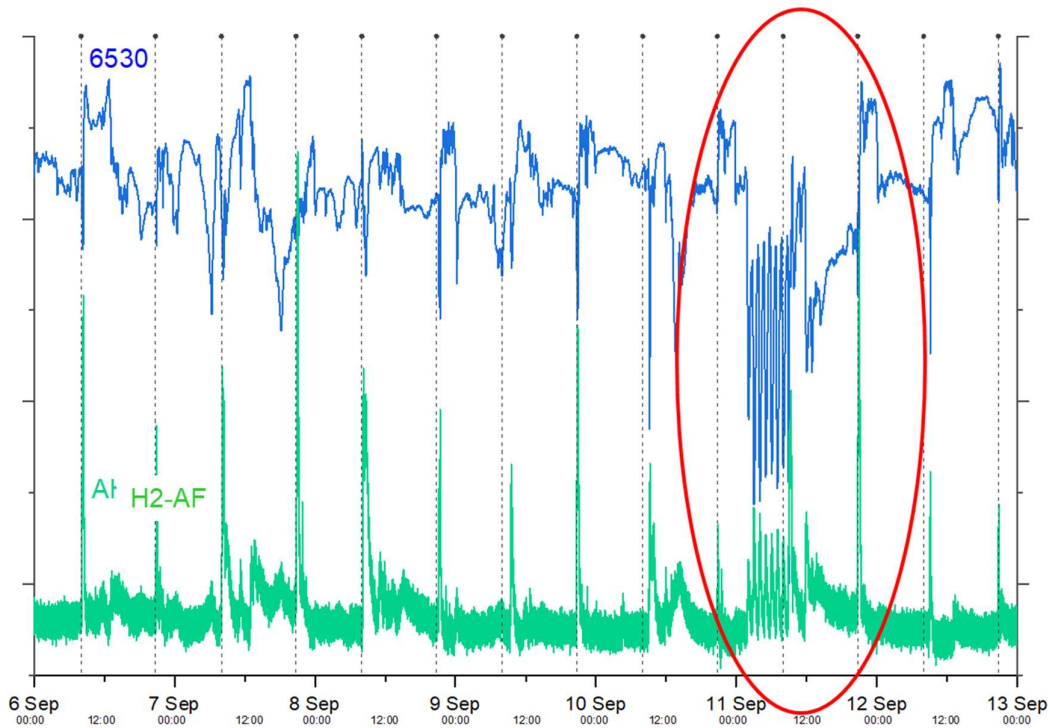


Abbildung 15: Ausschnitt einer Langzeitmessung mit den Wasserstoffsensoren GGS 6530 (MOx) und H2-AF (EC, Elektrochemische Zelle) Bord der Hollandica Die in regelmäßigen Abständen auftretenden Peaks korrespondieren mit der Be- und Entladung der Fähre. Die rot markierte Anomalie zeigt ebenfalls periodische Schwankungen und ist vermutlich auf den Motor eines Kühl-LKWs zurückzuführen, der ansprang, um das Kühlaggregat der Fracht bei Temperaturüberschreitung mit Strom zu versorgen.

Während des Be- und Entladeprozesse befanden sich Mitarbeiter auf dem Fährdeck, die schnell auf gefährliche Situationen reagieren können. Auf eine technische Überwachung des Fährdecks könnte in diesem Zeitraum gegebenenfalls verzichtet werden. Zumindest aber müssen in diesem Zeitraum die Alarmschwellen der Sensoren angepasst werden.

Eine Online-Verknüpfung der verschiedenen Betriebszustände des Ladedecks mit dem Gaswarnsystem wäre daher wünschenswert, ließ sich aber im Projekt aus Sicherheitsgründen nicht umsetzen.

In Regularien der IMO (International Maritime Organisation) ist die Steuerung der Ladedecklüftung auf der Basis von Daten chemischer Sensoren als Konzept beschrieben. Ziel ist es, zum Schutz der Mitarbeiter die Luftwechselrate bei erhöhten Schadstoffwerten zu erhöhen. Im Rahmen des im Projekt laufenden FSA (Formal Safety Assessment) wurde eine automatische, vom Gaswarnsystem ausgelöste Erhöhung der Luftwechselrate als sinnvolle Gegenmaßnahme zur Vermeidung explosionsgefährlicher Luft/Brennstoff-Gemische diskutiert. Demgegenüber wird im Falle von Bränden auf dem Fährdeck die Lüftung häufig ausgeschaltet, um die Feuerausbreitung zu verhindern. Bei einer reinen Gasfreisetzung ist die Erhöhung der Luftwechselrate eine der sinnvollsten Maßnahmen zum Schutz von Menschen und Material.

AP-Nr. 5		Das sichere Aufladen alternativ betriebener Fahrzeuge (17 PM)
Teil-AP-Nr. 5.2		Ermittlung geeigneter Ladeorte an Bord

Ziel dieses Arbeitspaketes war die Entwicklung einer sicheren Ladeinfrastruktur an Bord. Durch den frühzeitigen Ausfall eines Projektpartners sowie regulatorischen und technischen Problemen bei der Installation einer Ladesäule an Bord war eine Integration des im Projekt entwickelten Sensorkonzeptes mit dem Ladeprozess nicht möglich. Bereits während der Messkampagne 1 auf der „Peter Pan“ wurde über den Einsatz von E-Ladestationen mit dem assoziierten Partner TT-Lines diskutiert. Vor Ort wurde auf Grund der baulichen Gegebenheiten der vordere Bereich des Decks 5 als möglicher Bereich für die Platzierung von Ladesäulen identifiziert (Abbildung 16).

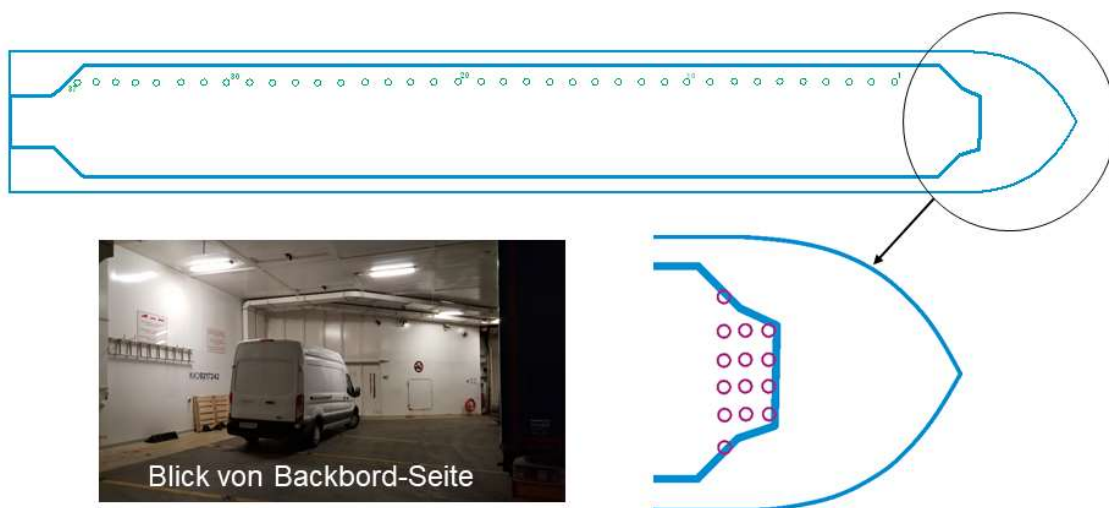


Abbildung 16: Deck 5 der „Peter Pan“: Bugseitig vergrößerter Bereich der möglichen Standorte für Ladestationen, lilau Kreise entsprechen den Messpunkten für Strömungsmessungen.

In Abbildung 17 sind die gemessenen Strömungsvektoren dargestellt. Bei dem untersuchten Bereich des Decks handelte es sich um einen strömungsarmen Bereich. Die z-Komponente (Höhe) der meisten Messpunkte zeigte eine durchgehend abfallende Strömung. Das horizontale Strömungsprofil (Breite über Länge) zeigte keine bevorzugte Richtung.

Für den Einsatz von Gassensoren bietet sich hier ebenfalls eine Platzierung wie in Kapitel 3.3, auf Decksbodenhöhe an. Der Einfluss einer möglichen Querlüftung während der Überfahrt auf die Ausprägung des Strömungsprofils wäre in diesem Bereich wahrscheinlich nicht wesentlich, da es sich hier um eine strömungstechnische „Sackgasse“ handelte.

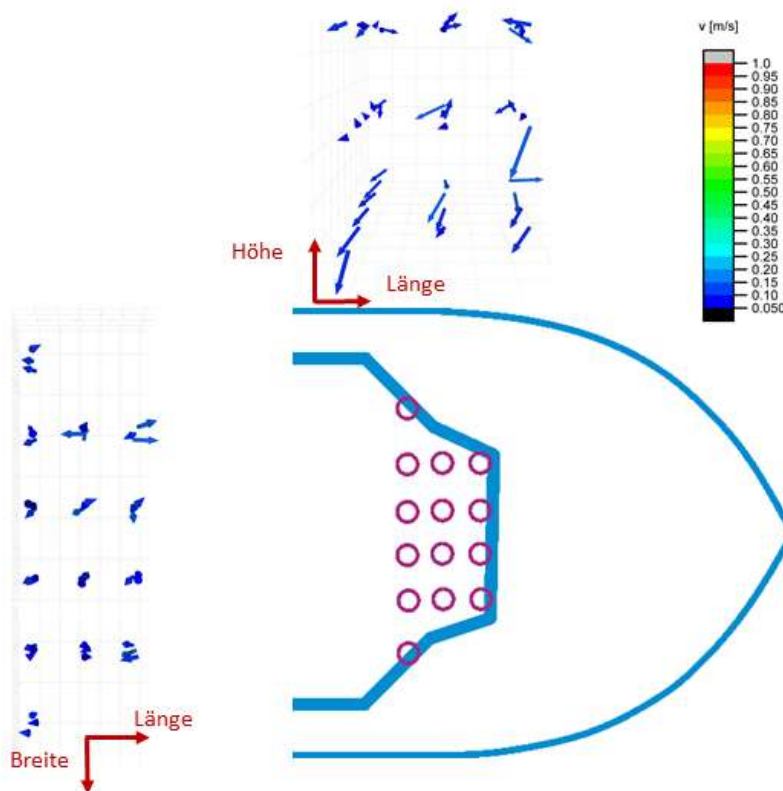


Abbildung 17: Kumulierte Strömungsvektoren im E-Ladebereich des Decks 5 „Peter Pan“. Messhöhen: 0 m, 2,3 m und 4,6 m. Horizontales Messraster 2,3 m x 2,3 m

Als alternative Standorte für Ladestationen wurden offene Fährdeckbereiche diskutiert. Das offene Fährdeck bietet aufgrund seiner besseren Zugänglichkeit und natürlichen Belüftung Sicherheitsvorteile. Eine Überwachung mittels Gasphasendetektoren ist dann nicht sinnvoll. Letztendlich konnte jedoch keine längere Installation einer Ladestation an Bord aus den zuvor genannten Gründen umgesetzt werden.

AP-Nr. 5		Das sichere Aufladen alternativ betriebener Fahrzeuge (17 PM)
Teil-AP-Nr. 5.3		Entwicklung / Anpassung von effizienten Detektionsverfahren zur Erkennung von Gefahren während des Ladevorganges

Dieses Arbeitspaket befasste sich mit der Untersuchung der Gase, welche beim Versagen eines modernen Li-Ionen-Akkus frei werden sowie mit dem Aufbau eines Sensorsystems für die Überwachung eines batteriebetriebenen KFZ beim Ladevorgang. Letzteres erfolgte überwiegend beim Projektpartner GTE. Seitens der Hochschule wurde hierfür einer der in AP 4 entwickelten Sensorknoten zur Verfügung gestellt, wobei hier auf eine Bestückung mit Pellistor und Methansensor verzichtet wurde.

Zur Untersuchung der Emissionen aus versagenden Li-Ionen-Akkus wurden im April 2019 (Trauen I) und März 2021 (Trauen II) Brandversuche mit Akkus auf dem Versuchsgelände der DLR in Trauen durchgeführt. Für eine detaillierte Beschreibung des Setups wird auf die Berichte von GTE und FKFS verwiesen.

Trauen I

Präparierte Fahrrad-Akkus wurden in eine Einhausung verbracht, an der auf der Rückseite über eine Leitung aus dem Innenraum Luft abgesaugt werden konnte (**Abbildung 18**). Der Gasstrom wurde in den außerhalb der Brandhalle stehenden Messwagen (**Abbildung 19**) gesaugt und dort analysiert.

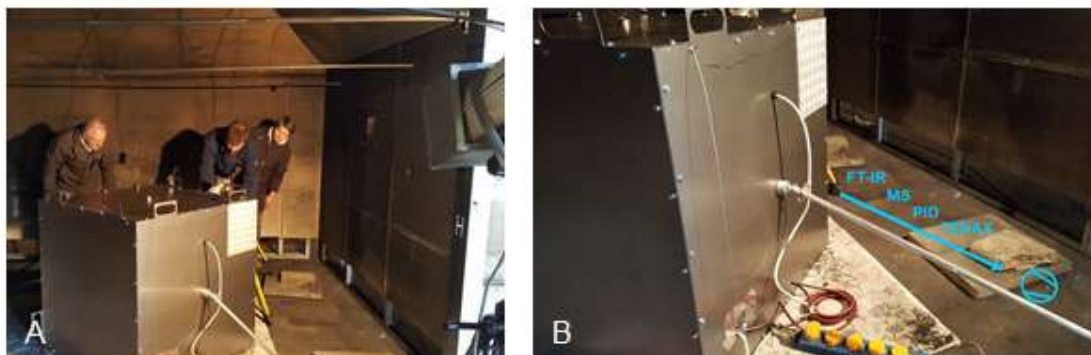


Abbildung 18: Versuchsaufbau zum induzierten Versagen von Li-Ionen Akkus, (A) Blick auf die Einhausung der Test Akkus, (B) Rückseite der Einhausung mit Absaugleitung für Gasanalytik (FT-IR = Fourier-Transformations-Infrarotspektrometer, MS = Massenspektrometer, PID = Photoionisationsdetektor, TENAX = Anreicherung von Volatilen auf Adsorbens)

Vor Ort wurde mit einem Fourier-Transformations-Infrarotspektrometer (FT-IR), einem mobilen Photoionisationsdetektor (PID) und einem mobilen Massenspektrometer (MS) Messungen vorgenommen. Für spätere Laboruntersuchungen mit einem Gaschromatographen mit einem massenselektiven Detektor (GC-MS) wurde auf TENAX®-Adsorbens die volatilen Inhaltsstoffe des Gasstroms angereichert.



Abbildung 19: Messwagen außerhalb der Brandhalle

Es wurden insgesamt vier Versuche messtechnisch begleitet. Die wesentlichen Ergebnisse sind in den **Abbildung 20** und **Abbildung 21** dargestellt.

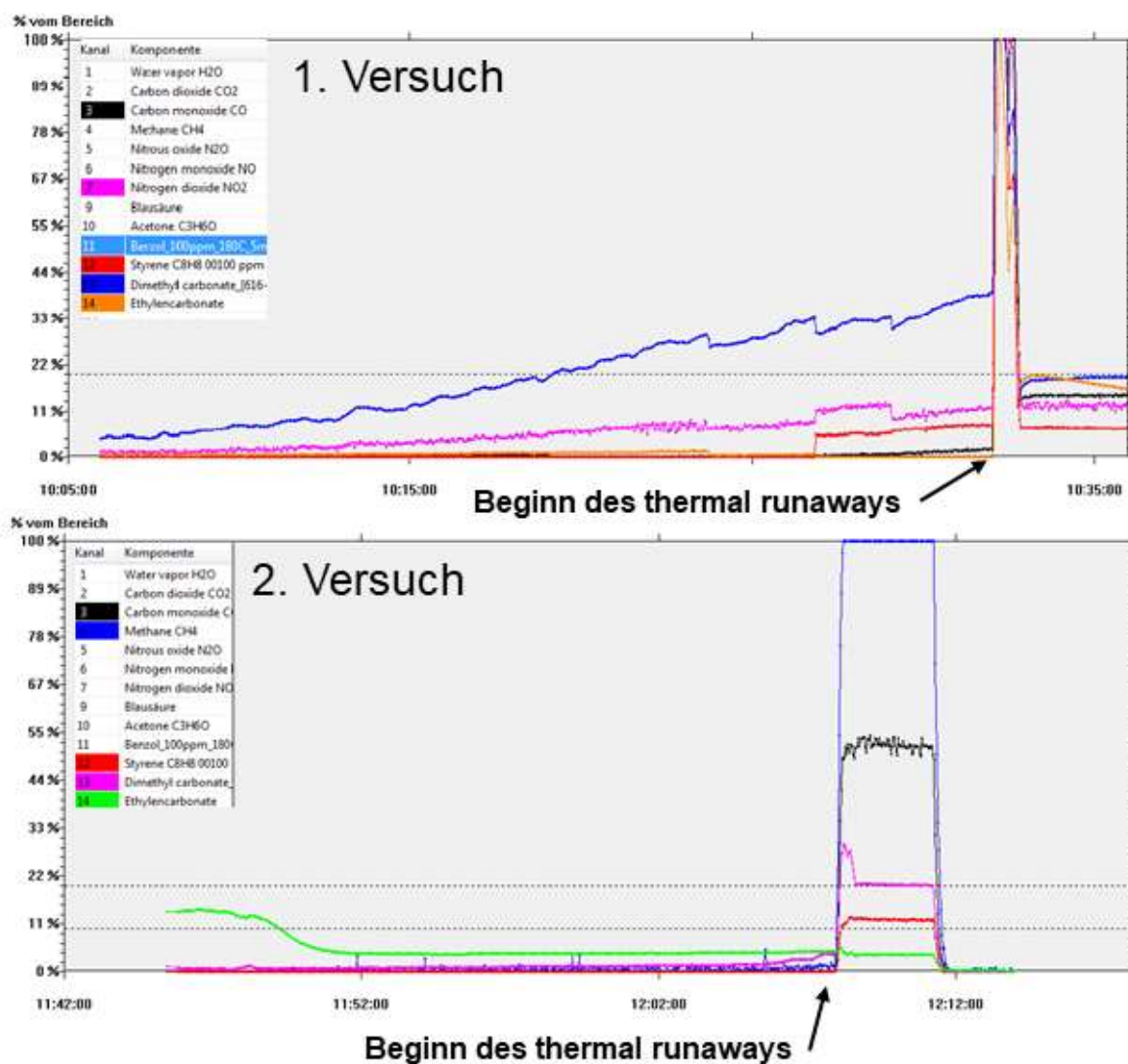


Abbildung 20: Zeitliche Verläufe der FT-IR Messungen für die Versuche 1 und 2

	CAS	Name	Background	V1	V2	V3	V4	
KW	67-64-1	Acetone	86		72		50	
	110-82-7	Cyclohexane				91		
	763-29-1	1-Pentene, 2-methyl	83				91	
	110-54-3	Hexane	80			90	91	
	616-38-6	Carbonic acid, dimethylester		53 [EI]	53 [EI]	64	64	
	872-56-0	Isopropylcyclobutan			90			
	142-82-5	Heptane			90		86	
	107-39-1	1-Pentene, 2,4,4-trimethyl-			91			
	80-62-6	2-Propenoic acid, 2-methyl-, methyl ester		90	91			
	38851-70-6	Trans-1-Butyl-2-methylcyclopropane		93	94			
	111-65-9	Octane		93	95		90	
	111-84-2	Nonane			91			
	100-52-7	Benzaldehyd	83		76		83	
	19549-87-2	2,4-Dimethyl-1-Heptene				94		
	Benzol	100-40-3	Cyclohexene, 4-ethenyl-		93			
100-41-4		Ethylbenzene		90				
95-47-6		O-Xylene		97	91	90		
71-43-2		Benzene		91	91	91		
100-42-5		Styrene				97		
106-42-3		P-Xylene		95	94			
108-88-3		Toluene		83		91		
98-86-2		Acetophenone	72				90	
109-99-9		Furan, tetrahydro-			86			
584-84-9		Benzene, 2,4-diisocyanato-1-methyl-					94	
1066-40-6		Silonal, trimethyl-	72					
Silane		18173-64-3	Tert-Butyldimethylsilanol			83		
		107-51-7	Trisiloxane, octamethyl-	83	83	83		72
Siloxane		556-67-2	Cyclotetrasiloxane, octamethyl-		87	91	90	91
		556-67-2	Cyclotetrasiloxane, octamethyl-	86		83		87
	556-67-2	Cyclotetrasiloxane, octamethyl-		91				
	141-62-8	Tetrasiloxane, decamethyl-		83				
	#NV	Cyclopentasiloxane, decamethyl-		91	91		90	
	#NV	Cyclopentasiloxane, decamethyl-		91	91	72		
	#NV	Cyclotrisiloxane, hexamethyl-		90				
	107-46-0	Disiloxane, hexamethyl-	83	78	83		83	
#NV	Cyclotrisiloxane, hexamethyl-		86	90	91	53		
Sontige	108-90-7	Benzene, chloro-		95				

Abbildung 21: Ergebnisse der Hintergrundmessung und der Versuche 1 – 4 nach Analyse mit GC-MS, Auswertung über NIST Datenbank. Die Tabellenwerte geben die Übereinstimmung der Fragmentmuster mit Referenzspektren wieder (max. 100)

Abbildung 20 zeigt die Ergebnisse der FT-IR online Messungen. Die farbigen Verläufe repräsentieren jeweils ausgewählte Gase, die der entsprechenden Legende entnommen werden können. Versuch 1,3 und 4 zeigen dabei den Anstieg Dimethyl-Carbonat zeitlich gesehen deutlich vor dem katastrophalen Versagen des Akkus. Die qualitative Analyse mittels GC-MS bestätigte das Vorhandensein der Substanz bei allen 4 Versuchen. Darüber hinaus zeigten die GC-MS Analysen diverse niedermolekulare benzoide Substanzen und Kohlenwasserstoffe. Bei den Experimenten zeigte sich ein zeitlicher Abstand von 5 – 10 Min zwischen messbarem VOC-Anstieg und katastrophalem Versagen (thermal runaway) der Akkus. Durch GTE konnte bei den Versuchen bereits vor der Freisetzung des Elektrolytes erhöhte Wasserstoffkonzentrationen festgestellt werden.

Trauen II

Bei den Versuchen wurden Gase des versagenden 100% geladenen PKW-Akkus Blocks durch das in AP 4 angepasste RAS mit einem Sensorknoten gesaugt. Ergänzend wurden weitere chemisch analytische Untersuchungen durchgeführt. Der thermal-runaway der Akkus wurde durch externes Erhitzen des Akkus mit einer elektrischen Heizplatte induziert.

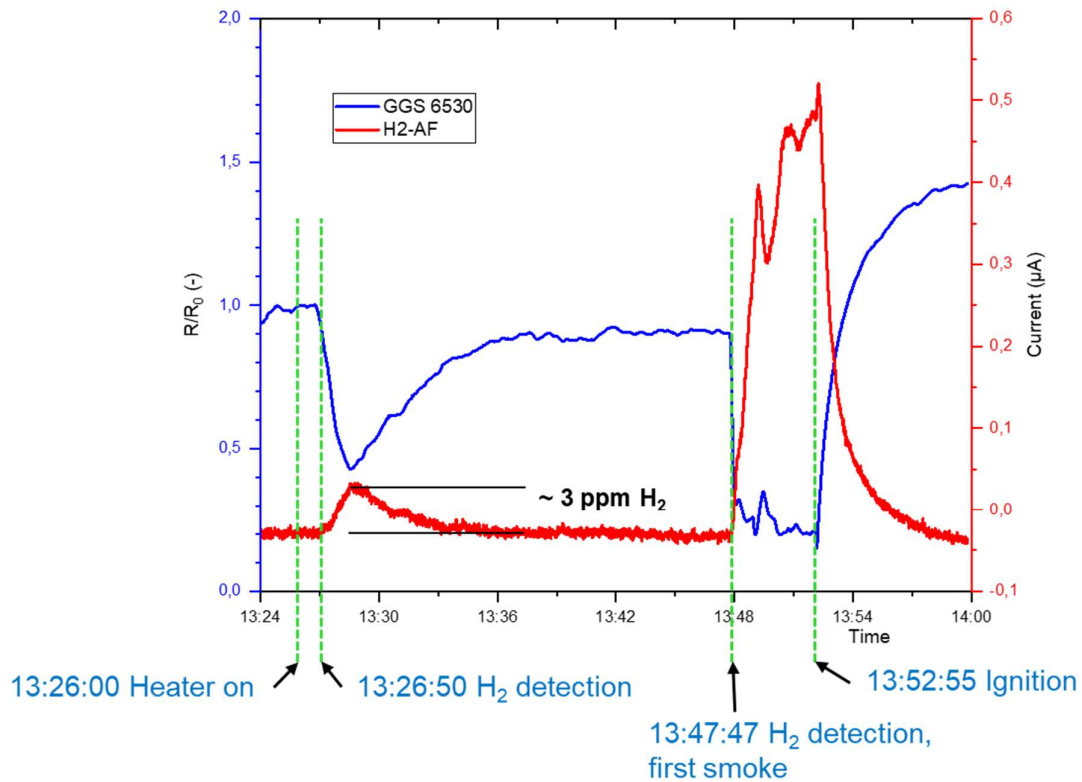


Abbildung 22: Reaktion der Wasserstoffsensoren im adaptierten RAS auf den versagenden Li-Ionen Akku (Versuch 3). Es ist ein deutlicher Anstieg der Wasserstoffkonzentration circa 5 min vor der Entzündung feststellbar bei gleichzeitig erster Rauchentwicklung. Der frühe kleinere Anstieg von circa 3 ppmV stammt vermutlich von der Heizplatte.

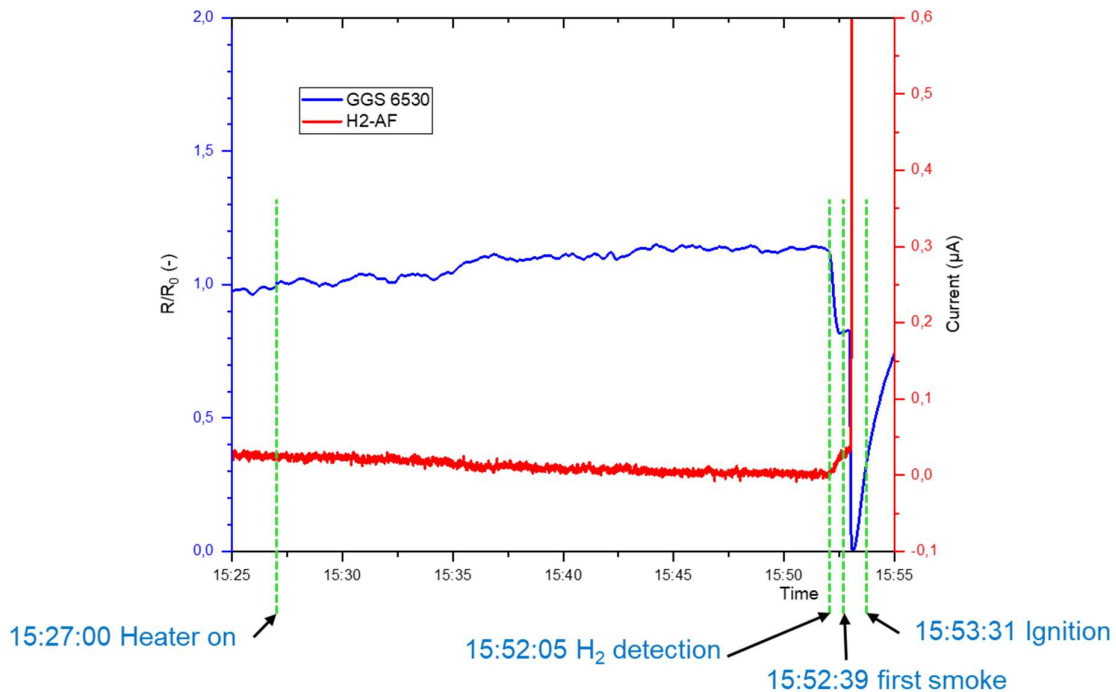


Abbildung 23: Reaktion der Wasserstoffsensoren im adaptierten RAS auf den versagenden Li-Ionen Akku (Versuch 4). Es ist ein deutlicher Anstieg der Wasserstoffkonzentration 30 Sekunden vor der ersten Rauchentwicklung feststellbar. Die Entzündung erfolgt rund 90 Sekunden nach der Detektion von Wasserstoff

Bei den Versuchen (Trauen II) wurden fabrikneue KFZ-Akkus des gleichen Typs und identischem Ladezustand (100%) benutzt. Dennoch zeigten sich im Verhalten der Akkus von Versuch zu Versuch Unterschiede (siehe **Abbildung 22**, **Abbildung 23**). Insgesamt war die freigesetzte Wasserstoffmengen niedriger und erfolgte mit kürzerem Abstand vor der Entzündung als bei den früheren Brandversuchen (Trauen I). Hier wurden jedoch ältere Fahrrad-Akkus benutzt. Es gibt Hinweise, dass sich Wasserstoff in Li-Ionenbatterien mit zunehmender Anzahl der Ladezyklen anreichert.

Die Brandversuche Trauen II zeigten zwar, dass selbst bei neuen Li-Ionen-Akkus eine detektierbare Wasserstofffreisetzung vor der Entzündung erfolgt, jedoch die dann noch verbleibende Reaktionszeit sehr kurz sein kann.

Ein weiterer Ansatzpunkt ist die Messung der Erwärmung der Batterie durch den einsetzenden thermal runaway. Diskussionen mit Herstellern von Ladesäulen ergaben, dass die Kommunikation zwischen dem Batteriemanagementsystem des Fahrzeugs und der Ladesäule in der Regel sehr eingeschränkt ist. Dennoch wäre eine Datenverbindung zwischen Ladesäule und Sensorsystem wünschenswert. Zum einen könnten dann eventuelle detektierte Änderungen in der lokalen Wasserstoffkonzentration mit dem Ladeprozess korreliert werden, zum anderen könnten Alarmzustände des

Sensorsystems für eine automatisierte Abschaltung des Ladevorgangs genutzt werden.

Der von der H-BRS bereitgestellte Sensorknoten wurde in das GTE-System zur Überwachung von Fahrzeugen während des Ladevorgangs integriert. Mit dem Gesamtsystem wurden eine Reihe von Versuchen unter der Federführung der Firma GTE durchgeführt. Die Ergebnisse sind im Abschlussbericht der Firma GTE beschrieben.

AP-Nr. 5		Das sichere Aufladen alternativ betriebener Fahrzeuge (17 PM)
Teil-AP-Nr. 5.5		Erarbeitung eines abgestimmten Sicherheitskonzeptes für den Lade-Standort – Wie sichert man den Ladeplatz ab?

Die in AP 5.2 und 5.3 erarbeiteten Ergebnisse flossen in eine FSA (Formal Safety Assessment) ein. Diese und weitere Ergebnisse des Projekts fließen aktuell in den Regelerstellungsprozess der IMO (International Maritime Organisation) ein.

AP-Nr. 5		Das sichere Aufladen alternativ betriebener Fahrzeuge (17 PM)
Teil-AP-Nr. 5.6		Testweise Umsetzung einer On-Board-Ladestation für Elektrofahrzeuge

Das Sensorkonzept wurde in Kooperation mit GTE entwickelt und von GTE getestet.

AP-Nr. 6		Qualifizierung des Personals (1 PM)
Teil-AP-Nr. 6.3		Titel des Teilarbeitspakets

Die Hochschule Bonn-Rhein-Sieg unterstützte den Projektpartner ISV bei der Erstellung von Schulungsmaterialien.

6 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

6.1 Stand der Technik

Die Sicherheitsmaßnahmen an Bord sind für den Transport Benzin- oder Dieselbetriebener Fahrzeuge konzipiert. Die Eigenschaften der Energiequellen von ABF unterscheiden sich jedoch in ihren physikalischen und chemischen Eigenschaften erheblich von denen konventioneller Fahrzeuge. Beispielhaft seien hier Wasserstoff (Permanentgas, leichter als Luft mit großem Zündbereich) und Lithium-Ionen-Traktionsbatterien (Gefahr eines thermal-runaway unter Freisetzung explosionsgefährlicher und giftiger Gase sowie mit der Neigung zur Wiederentzündung) genannt. Hierdurch entsteht der Bedarf einer Neubewertung und Weiterentwicklung der bislang bestehenden Sicherheitskonzepte.

Neue Antriebstechnologien

Aufgrund von steigendem Energieverbrauch, auch im Straßenverkehr, und schwindenden Reserven an Petroleum (S., 2011) (Wagner F.T., 2010) ist es nötig, nach neuen Energiequellen und Antriebstechnologien zu forschen. Begonnen hat dies schon früh, in erster Linie aufgrund der hohen CO₂-Emissionen herkömmlicher Antriebe/Kraftstoffe (Isenberg G., 2001). Dabei stellte sich die Verwendung alternativer Kraftstoffe aus regenerativen Quellen (Isenberg G., 2001) (S., 2011) (Lucia L.A., 2007) (B., 2009) (Senatore A., 2008) (Schaub G., 2008) als Option heraus sowie die Entwicklung neuer Antriebstechnologien wie dem Elektroantrieb (S., 2011) (Wagner F.T., 2010) (Isenberg G., 2001) (C., 1999) (Verhelst S., 2009) (Notter D.A., 2010) (K., 2010) und gasbetriebenen (Erdgas, Autogas) Fahrzeugen.

Gasbetriebene Fahrzeuge sind in Europa nicht so stark verbreitet wie in anderen Ländern. Dies liegt unter anderem daran, dass es in der Vergangenheit ein nur eher schwach ausgebautes Netz an Gas-Tankstellen gab. (Flynn, 2002) (Engerer H., 2010)

Als Technologie der Zukunft wird der Elektroantrieb gehandelt. Dabei werden vor allem zwei Varianten getestet: batteriebetrieben (hauptsächlich durch Li-Ionen Batterien) und Betrieb mittels Brennstoffzellen (in erster Linie mit Wasserstoff als Energieträger). Hybridsysteme dienen als Übergangsmodelle (Bitsche O., 2004) (Graver B.M., 2011) (Süslü O.S., 2009) von herkömmlichen Antrieben zum Elektroantrieb. Prototypen

beider Varianten sind bereits getestet, verschiedene Modelle werden in Serie produziert und sind zunehmend im alltäglichen Straßenverkehr zu finden.

Während es bei den konventionellen Antrieben, Gasantrieben und Elektroantrieben mittels Brennstoffzelle in erster Linie durch Lecks zu Gefahren kommt (Melchers R.E., 2001) (Utgikar V.P., 2005) (Watanabe S., 2007) (Horiguchi S., 2008) (Merilo E.G., 2011), treten bei den batteriebetriebenen Elektro-Fahrzeugen Gefahren auch beim Aufladen der Batterie auf.

Für batteriebetriebene Fahrzeuge werden derzeit in erster Linie Lithium-Batterien verwendet. Es ist bekannt, dass die Verwendung von Lithium-Anoden ein Sicherheitsrisiko birgt, da Lithium zur Ausbildung von Dendriten neigt, die zu einem Kurzschluss führen können. (Winter M., 2004) (Girishkumar G., 2010) (A., 2011) Kurzschlüsse – bedingt durch mechanische oder thermische Belastungen – wiederum können zu einem Aufheizen der Batterie führen, was in Feuern und in extremen Fällen sogar in Explosionen resultieren kann.

Ein weiteres Sicherheitsrisiko stellen die verwendeten Elektrolyte dar. Bei Beschädigungen der Batterie (auch durch zu hohe, aber auch zu niedrige Temperaturen) kann die Elektrolyt-Flüssigkeit auslaufen. (Goodenough J.B., 2010) Ist diese toxisch oder leicht entflammbar, besteht ein hohes Sicherheitsrisiko. (Jie Sun, 2016)

An Verbesserungen der Lithium-Batterien wird geforscht. Dabei werden Sicherheitsaspekte in hohem Maße berücksichtigt. So verhindert ein funktionsfähiges Batteriemanagementsystem (BMS) beispielsweise ein Überladen oder das Auftreten hoher Temperaturen beim Laden und beendet im Zweifel den Ladevorgang. Vorfälle mit batteriebetriebenen Fahrzeugen zeigen jedoch, dass nicht alle Fehler verhindert werden können. Eine zusätzliche Gefährdung geht von E-Bike Akkus aus, da diese nicht über die gleichen Schutzmaßnahmen verfügen wie Traktionsbatterien in KFZ- oder Nutzfahrzeugen und zudem beispielsweise unkontrolliert in den Schiffskabinen aufgeladen werden könnten. Von Experten wird für die Zukunft erwartet, dass Privatpersonen zunehmend auch außerhalb professioneller Werkstätten selber Modifikationen an den Batterien durchführen werden und damit die Wahrscheinlichkeit von Ausfällen zunehmen könnte.

Gassensorik

Die mit konventionellen und neuen Antriebstechnologien verbundenen Gefahren, machen es für die Fährschiffahrt nötig, Sensoriken zur Detektion der Gefahren einzusetzen. Fest installierte Sensoren zur Überwachung der CO und NO_x-Konzentrationen und deren Koppelung mit der Lüftungssteuerung der Fährdecks sind auf Basis der aktuellen IMO-Regularien zwar möglich, jedoch konnten im Rahmen des Projektes keine Fährschiffe mit entsprechenden Systemen identifiziert werden. Sensoren für die Detektion von brennbaren Gasen werden bereits in kritischen Bereichen gasbetriebe-ner Fährschiffe eingesetzt, jedoch nicht zur Überwachung des Fährdecks. Aufgrund der korrosiven Bedingungen auf See eignet sich aber nicht jeder Sensor.

Beim Arbeitsschutz und bei Einsatzkräften werden bereits eine Reihe stationärer und mobiler Detektionssysteme eingesetzt. Weit verbreitet sind Photoionisationsdetektoren, elektrochemische Zellen; Metalloxidsensoren (MO_x). Infrarotsensoren und Ionenmobilitätsspektrometer. Photoionisationsdetektoren und MO_x- Sensoren sind empfindlich, aber unspezifisch. Elektrochemische Zellen eignen sich vor allem für die Detektion einer Gassorte und sind nicht in der Lage andere Gase zu detektieren. Ionenmobilitätsspektrometer sind empfindlich, schnell-anzeigend, einigermaßen selektiv bei gleichzeitig großer Bandbreite bei den detektierbaren Stoffen. Für Wasserstoff existieren inzwischen MO_x Sensoren mit modifizierter Oberfläche, die eine vergleichsweise hohe Selektivität und Spezifität aufweisen. Die hohen Betriebstemperaturen der MO_x-Sensoren stellen jedoch eine Herausforderung für den Aufbau Ex-geschützter Detektionssystem dar.

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. Im Hafenumfeld kann von einer komplexen Zusammensetzung der Gasphase mit entsprechend hohen Anforderungen an das Messsystem ausgegangen werden.

6.2 Bekannte Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechte

Zu Beginn des Projektes sind uns keine diesbezüglichen Verfahren bzw. Schutzrechte bekannt gewesen. Die Hersteller der Batterien integrieren eine Reihe von Sicherheitsverfahren, dazu gehören:

- das BMS (Battery Management System)
- Druckentlastungsöffnungen (Venting Systems), die bei Ansprechen den elektrischen Kontakt unterbrechen
- Eine aktive Kühlung des Batteriesystems bzw. eine Konstruktion, die passiv eine optimale Wärmeverteilung bewirkt

Deshalb wird von den Herstellern der Batterien angegeben, dass ausreichende Schutzmechanismen vorgesehen sind.

Diese Aussage ist für den „üblichen“ Betrieb wahrscheinlich zutreffend. Auf Fährschiffen oder auch in Tiefgaragen liegt eine besondere Situation vor: Die Schadenswirkung wäre im Falle eines Brandes höher - sodass ein höheres Sicherheitsniveau anzuwenden wäre.

Eine externe Detektion eines thermal runaway ist bis jetzt (Ende 2021) in Bezug auf BEV nicht bekannt und auch nicht vorgesehen.

7 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Das Teilvorhaben „Entwicklung und Aufbau gassensorischer Systeme zur Überwachung von Fährdecks und Ladestationen für alternativ betriebene Fahrzeuge auf RoRo Fährschiffen“ war Bestandteil des Verbundprojekts „Transport alternativ betriebener Fahrzeuge auf RORO-Fährrschiffen (ALBERO)“.

In diesem Projekt kooperiert das Institut für Sicherheitsforschung (ISF) der Hochschule Bonn-Rhein Sieg mit den Projektpartnern:

- Institut für Sicherheitstechnik/Schiffssicherheit e.V. (ISV)
- Fraunhofer Institut für Kommunikation, Informationsverarbeitung und Ergonomie (FKIE)
- GTE
- Forschungsinstitut für Kraftfahrwesen und Fahrzeugmotoren Stuttgart (FKFS)
- Lloyd's Register (LR)

und den assoziierten Projektpartnern:

- TT-Line GmbH & Co. KG
- Scandlines Deutschland GmbH
- Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS), WS 23
- Verband Deutscher Reeder
- Stena Line GmbH & Co.KG

Die Zusammenarbeit mit allen Partnern war Grundlage für die erfolgreiche Durchführung des Projektes.

Insbesondere die Kooperation mit der GTE, dem ISV und der FKFS in den

Arbeitspaketen 4 und 5 ist zu erwähnen.

Eine zentrale Rolle spielte die Unterstützung durch die Reedereien als unabdingbare Voraussetzung für die Durchführung von Messungen und die Installation von Sensorsystemen. Besonders hervorzuheben ist hier die Reederei Stena und die Besatzung des Fährschiffs „Britannica“, welche mit Knowhow, Personal und Material die Installation der Sensorknoten an Bord unterstützten.

Koordiniert durch den Projektkoordinator ISV fand ein enger Austausch zwischen den Projektpartnern statt. Im Verlauf wurde das später gestartete EU-Projekt „Lashfire“ kontaktiert und ein wechselseitiger Austausch etabliert.

8 Die wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Der Kostenrahmen wurde – unter Berücksichtigung einer beantragten Umwidmung (Nov. 2020) – weitestgehend eingehalten. Geringfügige Mehrausgaben entstanden in den Positionen 822, 843 und 846, welche durch Einsparungen in den Positionen 812, 831 und 850 (Investitionen) überkompensiert wurden.

9 Verwertung

Die im Projekt entwickelten Sensorsysteme konnten im realen Umfeld ihre Leistungsfähigkeit demonstrieren. Weiterer Entwicklungsbedarf wird jedoch im Bereich der Methansensorik, Optimierung der Überwachung beim Ladevorgang, der Einbindung der Systeme und die bestehende Sicherheitsarchitektur und Lüftungssteuerung sowie der an Bord geltenden technischen Standards für solche Systeme gesehen. Aktuell finden Gespräche unter anderem mit GTE, Lloyds Register und der Reederei Stena statt, mit dem Ziel die noch zu erarbeitenden Entwicklungslösungen im Rahmen eines Nachfolgeprojektes zu adressieren. Eine wichtige Voraussetzung für den Einsatz entsprechender Systeme ist die Existenz entsprechender Richtlinien durch die IMO und der Klassifizierungsgesellschaft, an denen außerhalb des Projektes national und international gearbeitet wird.

Wir erwarten in Folge des Projektes Entwicklungsaufträge industrieller Partner für die Entwicklung künftiger Sicherheitssysteme. Hierfür werden gute Erfolgsaussichten gesehen, da vergleichbare Sicherheitssysteme, welche zudem ihre Leistungsfähigkeit im realen Umfeld demonstrieren konnten, nach derzeitigem Kenntnisstand weiterhin nicht verfügbar sind. Die Erkenntnisse aus dem Projekt und die daraus abgeleiteten

Entwicklungen und Sicherheitskonzepte sind für weitere Bereiche in denen ABF in geschlossenen oder halboffenen Räumen abgestellt werden wie z. B. Parkhäusern, Busdepots und Tiefgaragen. Überdies sind die entwickelten Technologien überall dort von Nutzen wo zukünftig vermehrt Li-Ionen Akkus oder alternative Energieträger (insbesondere Wasserstoff) zum Einsatz kommen oder gelagert werden. Hier erwarten wir in den nächsten Jahren weitere Entwicklungsaufträge.

Tatsächlich wird aktuell für den Bereich „Dezentrale zuverlässige Energiesysteme aus nachhaltigen Quellen zur Sicherung der Versorgung von Morgen“ ein Antrag in der Förderlinie Profilbildung 2022 des Landes NRW vorbereitet, bei dem die Erkenntnisse aus dem Projekt Albero einen wichtigen Beitrag leisten sollen.

10 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	zeitlicher Ablauf des Projektes	6
Abbildung 2:	Messkampagne „Britanica“, Strömungsvektoren Deck 3, Höhe 0 m, 1 m und 2 m bei 10fachem Luftwechsel/h	11
Abbildung 3:	Schematische Übersicht des verteilten Sensorsystems zur Messung der Umgebungsluft	14
Abbildung 4:	Anschlüsse des zentralen Hubs mit Anschlüssen für 24 V, Ethernet und USB (unten) sowie Anschlüssen für die Kommunikation mit bis zu acht Sensorknoten.....	14
Abbildung 5:	Hauptplatine der Sensorknoten mit 9 bestückten Anschlüssen für Sensorplatinen	15
Abbildung 6:	Sensorplatinen zum Ansteuern und Auslesen verschiedener Sensortypen	15
Abbildung 7:	Screenshot von Benutzersoftware zur Steuerung des Sensorsystems und Aufzeichnung der Messdaten	16
Abbildung 8:	Screenshot der softwareseitigen Darstellung von Messkurven verschiedener Sensoren eines Messknotens (Node 1) Über die Reiter können die Messkurven weiterer Sensorknoten angezeigt werden, sofern installiert.	17
Abbildung 9:	zentraler Hub sowie bestückter Sensorknoten für Labortestmessungen.....	18
Abbildung 10:	Optimierte On-board-Installation: A) Schema mit Luftströmungsführung, B) Visualisierung des Einbaus (rot markiert)	20
Abbildung 11:	Sensorknotengehäuse der verteilten Anordnung. A) Aludruckgussgehäuse in IP 67 Ausführung, der Anschluss zur Spannungsversorgung und Datenübertragung entspricht IP 55, B) geöffnetes Gehäuse mit Lüftungsleitblechen, die blauen Pfeile indizieren die Luftströmung	20
Abbildung 12:	Schematische Darstellung der Installierten Sensorsysteme (Node 1- 4: verteilte Sensorknoten, SES: Im Rauchansaugsystem integrierter zentraler Sensorknoten); in rot A0 – A3: Orte der Gasfreisetzung in Bodennähe. Die Entfernung zwischen Node 4 und SES beträgt circa 34 m). Das Fährdeck wird von links nach rechts belüftet.....	21
Abbildung 13:	Sensorantworten des Wasserstoffsensors GGS 6530 (bei der Freisetzung von 10 L H ₂ an Position A0 (rote Markierung) während einer Überfahrt), Die angegebenen Konzentrationen sind als Abschätzung zu verstehen, da sich der Sensor bei den genannten Konzentration nahe seiner Sättigung befindet. Die Sensorknoten reagieren gemäß der übergeordneten Strömung	

der Fährdeck-Belüftung. Der zentrale Sensor (SES) reagiert aufgrund der aktiven Ansaugung über das RAS etwas schneller als der letzte Sensorknoten (Node 4, violett)..... 22

- Abbildung 14: Ergebnisse von kurzen Gasfreisetzungsversuchen (Wasserstoff, LPG; circa 5 sec.) mit 30 m Abstand zum ersten Sensorknoten entgegen der Strömungsrichtung (rote Markierung C3). Angegeben sind die Reaktionen des Wasserstoffsensors GGS 6530 (R/R0 in %) und des Photoionisationsdetektors (mV). Die angegebene Zeit auf den Balken entspricht der Zeitdifferenz zwischen Freisetzung und Reaktion beim Sensor. 23
- Abbildung 15: Ausschnitt einer Langzeitmessung mit den Wasserstoffsensoren GGS 6530 (MOx) und H2-AF (EC, Elektrochemische Zelle) Bord der Hollandica Die in regelmäßigen Abständen auftretenden Peaks korrespondieren mit der Be- und Entladung der Fähre. Die rot markierte Anomalie zeigt ebenfalls periodische Schwankungen und ist vermutlich auf den Motor einer Kühl-LKWs zurückzuführen, der ansprang, um das Kühlaggregat der Fracht bei Temperaturüberschreitung mit Strom zu versorgen. 24
- Abbildung 16: Deck 5 der „Peter Pan“: Bugseitig vergrößerter Bereich der möglichen Standorte für Ladestationen, lila Kreise entsprechen den Messpunkten für Strömungsmessungen. 25
- Abbildung 17: Kumulierte Strömungsvektoren im E-Ladebereich des Decks 5 „Peter Pan“. Messhöhen: 0 m, 2,3 m und 4,6 m. Horizontales Messraster 2,3 m x 2,3 m..... 26
- Abbildung 18: Versuchsaufbau zum induzierten Versagen von Li-Ionen Akkus, (A) Blick auf die Einhausung der Test Akkus, (B) Rückseite der Einhausung mit Absaugleitung für Gasanalytik (FT-IR = Fourier-Transformations-Infrarotspektrometer, MS = Massenspektrometer, PID = Photoionisationsdetektor, TENAX = Anreicherung von Volatilen auf Adsorbens) 27
- Abbildung 19: Messwagen außerhalb der Brandhalle..... 28
- Abbildung 20: Zeitliche Verläufe der FT-IR Messungen für die Versuche 1 und 2 28
- Abbildung 21: Ergebnisse der Hintergrundmessung und der Versuche 1 – 4 nach Analyse mit GC-MS, Auswertung über NIST Datenbank. Die Tabellenwerte geben die Übereinstimmung der Fragmentmuster mit Referenzspektren wieder (max. 100) 29
- Abbildung 22: Reaktion der Wasserstoffsensoren im adaptierten RAS auf den versagenden Li-Ionen Akku (Versuch 3). Es ist ein deutlicher Anstieg der Wasserstoffkonzentration ist circa 5 min vor der Entzündung feststellbar bei gleichzeitig erster Rauchentwicklung. Der frühe kleinere Anstieg von circa 3 ppmV stammt vermutlich von der Heizplatte. 30

Abbildung 23: Reaktion der Wasserstoffsensoren im adaptieren RAS auf den versagenden Li-Ionen Akku (Versuch 4). Es ist ein deutlicher Anstieg der Wasserstoffkonzentration 30 Sekunden vor der ersten Rauchentwicklung feststellbar. Die Entzündung erfolgt rund 90 Sekunden nach der Detektion von Wasserstoff 31

11 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Liste der Zielstoffe aus ABF für eine frühzeitige Detektion von Fahrzeughavarien über Gasphasendetektoren und deren untere Explosionsgrenze in Luft (Quelle UEG-Werte: Gestis Stoffdatenbank).....	7
Tabelle 2:	Auflistung möglicher Detektoren für einen Einsatz an Bord zur Detektion von Emissionen aus havarierten ABF	8
Tabelle 3:	Tabelle der getesteten Sensoren, ihrer Zielgase, Sensitivität sowie geplanter Anwendungsbereich; aller Sensoren wurden von AlphaSense UK bezogen	18

12 Veröffentlichungen im Rahmen des Projektes

Vorstellung Ergebnisse aus Albero	Präsentation	Gesellschaft Deutscher Versicherer	Nov. 2019
Vorstellung Ergebnisse aus Albero	Präsentation	Analytical Task Force Köln (Feuerwehr)	Jun. 2021

13 Literaturverzeichnis

- A., M. (2011). Materials Challenges and Opportunities of Lithium Ion Batteries. *Journal of Physical Chemistry Letters*, S. 176-184.
- B., D. (2009). Biofuels: Thinking clearly about the issues. *J. Agric. Food Chem* , S. 3885-3891.
- Bitsche O., G. G. (2004). Systems for hybrid cars. *Journal of Power Sources*, S. 8-15.
- C., H. (1999). Powering tomorrows cars. *Environmental science&technology*, S. 458A.
- Engerer H., H. M. (2010). Natural gas vehicles: An Option for Europe. *Energy Policy*, S. 1017-1029.
- Flynn, P. (2002). Commercializing an alternate vehicle fuel: lessons learned from natural gas for vehicles. *Energy Policy*, S. 613-619.
- Girishkumar G., M. B. (2010). Lithium-Air Battery: Promise and Challenges. *Journal of*

- Physical Chemistry Letters*, S. 2193-2203.
- Goodenough J.B., K. Y. (2010). Challenges for Rechargeable Li batteries . *Chemistry of Materials*, S. 587-603.
- Graver B.M., F. H.-W. (2011). In-use measurement of activity, energy use and emissions of a plug-in hybrid electric vehicle. *Environmental Science&Technology*, S. 9044-9051.
- Horiguchi S. (2008). Mogi T., Kim D., Shiina H., Self-ignition and explosion during discharge of high-pressure hydrogen. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, S. 199-204.
- IMO - International Maritime Organisation. (8. June 2015). REVISED DESIGN GUIDELINES AND OPERATIONAL RECOMMENDATIONS FOR VENTILATION SYSTEMS IN RO-RO CARGO SPACES. *MSC.1/Circ.1515*.
- Isenberg G., E. R. (2001). Auf der Suche nach den Treibstoffen der Zukunft. *Z Umweltchem Ökotox* , S. 277-282.
- Jie Sun, J. L. (2016). Toxicity, a serious concern of thermal runaway from commercial Li-ion battery. *Nano Energy*, S. 313-319.
- K., S. (2010). Fuel cell engineering: Toward the design of efficient electrochemical power plants. *Ind. Eng. Chem. Res.*, S. 10159-10182.
- Lucia L.A., A. S. (2007). Chemicals, Materials and Energy from Biomass: A review. *In Materials, Chemicals and Energy from Forest Biomass*.
- Melchers R.E., F. W. (2001). Risk assessment of LPG automotive refueling facilities, . *Reliability Engineering and System Safety*, S. 283-290.
- Merilo E.G., G. M. (2011). Experimental study of hydrogen release accidents in a vehicle garage. *International Journal of Hydrogen Energy* , S. 2436-2444.
- Notter D.A., G. M.-J. (2010). Contribution of Li-ion Batteries to the environmental impact of electric vehicles. *Environmental Science&Technology*, S. 6550-6556.
- S., B. (Februar 2011). European Expert Group reports on future transport fuels, Fuel Cells Bulletin February (2011). *Fuel Cells Bulletin*.
- Schaub G., V. A. (2008). Biofuels for automobiles-An Overview. *Chem. Eng. Technol.* , S. 721-729.

- Senatore A., C. M. (2008). Combustion study of a common rail diesel engine optimized to be fueled with biodiesel. *Energy&Fuels*, S. 1405.
- Süslü O.S., B. I. (2009). On-board fuel processing for a fuel cell-heat engine hybrid system. *Energy&Fuels*, S. 1858-1873.
- Utgikar V.P., T. T. (2005). Safety of compressed hydrogen fuel tanks: Leakage from stationary vehicles. *Technology in Society*, S. 315-320.
- Verhelst S., W. T. (2009). Hydrogen-fueled internal combustion engines. *Progress in Energy and Combustion Science*, S. 490-527.
- Wagner F.T., L. B. (2010). Electrochemistry and the future of the automobile. *The Journal of Physical Chemistry Letters*, S. 2204-2219.
- Watanabe S., T. Y. (2007). The new facility for hydrogen and fuel cell vehicle safety evaluation. *International Journal of Hydrogen Energy* , S. 2154-2161.
- Winter M., B. R. (2004). What are batteries, fuel cells and supercapacitors? *Chemical Reviews*, S. 4245-4269.