

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Honeywell

Schlussbericht zum Fördervorhaben **LUFO VI-1 – PasKaL** (Passagierfreundliche Kabine und Luftqualität)

Förderkennzeichen: **20K1904B**



Honeywell

Honeywell Aerospace GmbH
Frankfurter Str. 41 – 65
65479 Raunheim

Ansprechpartner: Ralf von Frieling
Tel.: +49 172 6962254
Mail: Ralf.vonFrieling@Honeywell.com

Antragsteller: Volker Roth

Die Veröffentlichung und Weitergabe des Inhalts dieses Berichts an fachlich interessierte Stellen durch die Technische Informationsbibliothek Hannover (TIB) erfolgt nach Maßgaben der NKBF98 Abschnitt 11.6.

Datei: BMWK-Fkz-20K1904B_Schlussbericht_LuFoVI-1_PasKaL_Honeywell.docx

Honeywell Proprietary

Schlussbericht zu Nr. 8.2 - NKBF 98

ZE: Honeywell Aerospace GmbH	Förderkennzeichen: 20K1904B
Vorhabenbezeichnung: PasKaL (<u>P</u> assagierfreundliche <u>K</u> abine und <u>L</u> uftqualität)	
Laufzeit des Vorhabens: 01.11.2020 - 31.01.2023	

Das in diesem Schlussbericht ausgeführte Forschungsvorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) gefördert. Die Inhalte dieses Berichtes für das Förderkennzeichen 20K1904B liegen in der Verantwortung des Erstellers.

Für die vertrauensvolle Zusammenarbeit während der Projektlaufzeit möchten wir dem Projektträger und unserem Verbundpartner danken.

Inhaltsverzeichnis

1	Darstellung.....	1
1.1	Aufgabenstellung.....	1
1.2	Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde.....	1
1.3	Planung und Ablauf des Vorhabens.....	2
1.4	Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde.....	2
1.5	Zusammenarbeit mit anderen Stellen.....	3
2	Eingehende Darstellung.....	4
2.1	Technologien und technische Ergebnisse.....	4
2.1.1	AP2.1 Sensorik Kontaminationserkennung.....	4
2.1.1.1	AP2.1.1 Marktanalyse und Leistungsvergleich von Sensortechnologien.....	4
2.1.1.1.1	Sensortechnologien für CO ₂ , CO, O ₃	5
2.1.1.1.2	Sensortechnologie für ultrafeine Partikel.....	6
2.1.1.1.3	Sensortechnologie für VOC/ TVOC.....	7
2.1.1.1.4	Architektur Kontaminationserkennung.....	9
2.1.1.1.5	Sensor Technologieauswahl.....	10
2.1.1.2	AP2.1.2 – Validierung der Sensortechnologien.....	11
2.1.1.2.1	Metalloxid-Halbleitersensoren (MOS, MOX).....	11
2.1.1.2.1.1	Generelle Prüfung der MOS Sensoren.....	11
2.1.1.2.1.2	Test in relevanter Umgebung.....	15
2.1.1.2.1.3	MOS Zusammenfassung.....	22
2.1.1.2.2	Selektiver Sensor – FBAR.....	22
2.1.1.2.2.1	Generelle Prüfung der FBAR Sensortechnologie.....	22
2.1.1.2.2.2	FBAR Sensortechnologie in relevanter Umgebung.....	23
2.1.1.2.2.3	FBAR Zusammenfassung.....	24
2.1.1.3	AP2.1.3 Sensor Design und Realisierung.....	25
2.1.1.4	AP2.1.4 – Optimierung des Sensorkonzeptes.....	26
2.1.2	AP2.2 Komponenten zum Abbau von Kontaminanten.....	26
2.1.2.1	Auswahl der Filtertechnologie.....	29
2.1.2.2	AP2.2.1 – Katalysator.....	33
2.1.2.2.1	Aerosol Trap.....	33

2.1.2.2.1.1	Aerosol Trap – Auswahl Filtermaterial	33
2.1.2.2.1.2	Aerosol Trap + CHOC Performance.....	36
2.1.2.2.1.3	Zusammenfassung Aerosol Trap + CHOC.....	38
2.1.2.2.2	AP2.2.1 – Ölersetzungstests.....	39
2.1.2.2.2.1	Testdefinition Ölersetzungstests.....	40
2.1.2.2.2.2	Testergebnisse Ölersetzungstests.....	41
2.1.2.2.2.3	Zusammenfassung Ölersetzungstest	42
2.1.2.2.3	Wärmetauscher der Klimaanlage mit Katalysatorbeschichtung (CAT PACK HX) 42	
2.1.2.2.3.1	Zusammenfassung Wärmetauscher mit Katalysatorbeschichtung	46
2.1.2.3	AP2.2.2 – Filter	47
2.1.2.3.1	Photokatalytische Oxidation - PCO	47
2.1.2.3.1.1	Katalysator Evaluierung	48
2.1.2.3.1.2	Prototyp Test – Ethanol als Referenzkontamination.....	50
2.1.2.3.1.3	PCO – Pre-Filter Test (Valeriansäure, Siloxan)	52
2.1.2.3.1.4	PCO – Pre-Filter Test (PM2.5)	53
2.1.2.3.1.5	PCO – Design Study.....	54
2.1.2.3.1.6	PCO – UV LED mit optimierter Wellenlänge	57
2.1.2.3.1.7	PCO – Zusammenfassung.....	59
2.1.3	AP2.3 - Optimierung von Anwendungen für Flugzeugsysteme	59
2.1.3.1	AP2.3.1 – Konzepte für Anwendungsmöglichkeiten erstellt (Connected Aircraft) ..	59
2.1.3.2	AP2.3.2 – Bewertung ausgewählter Konzepte abgeschlossen / Integration.....	60
3	Veröffentlichungen	61
4	Abkürzungsverzeichnis.....	62

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Quellen für Kontaminationen der Kabinenluft.....	4
Abbildung 2: Marker-Komponenten für die Detektierung von Luftqualität - Airbus	5
Abbildung 3: CO ₂ , O ₃ , CO Sensor Analyse Matrix.....	6
Abbildung 4: UFP Sensor Analyse Matrix.....	6
Abbildung 5: VOC Sensor Analyse Matrix	8
Abbildung 6: Architektur zur Kontaminationserkennung in der Zapfluft	10
Abbildung 7: Testbox Sensoren und prinzipielles Diagramm	11
Abbildung 8: Datenfile für eine TVOC Messprobe.....	12
Abbildung 9: Sensorsignal bei verschiedenen TVOC Konzentrationen (von links nach rechts Sensor A, B, C)	12
Abbildung 10: Marker-Komponenten für typische Kontaminationsszenario.....	13
Abbildung 11: TVOC Sensor Testkammer	13
Abbildung 12: Sensor A - metal oxide, p-type	14
Abbildung 13: Sensor B - metal oxide, p-type with cleaning function.....	14
Abbildung 14: Sensor C - metal oxide n-type.....	14
Abbildung 15: Sensor Prototype für Validierung unter Betriebsbedingungen.....	15
Abbildung 16: MOS Test bei maximalen Zapflufttemperaturen.....	15
Abbildung 17: MOS Vibrationstests, Beispiel: Random Endurance.....	16
Abbildung 18: Teststand für MOS Sensitivitätsmessung (links Temperatur, Druck, rechts Feuchtigkeit)	17
Abbildung 19: Testmatrix für MOS Sensitivität - Temperatur, Druck, Feuchtigkeit	17
Abbildung 20: MOS Sensitivität auf Temperatur, Luftdruck, Feuchtigkeit	17
Abbildung 21: Zapfluftteststände (Honeywell, links; Airbus, Mitte; Fraunhofer, rechts)	18
Abbildung 22: Yeovil - Test Triebwerksöl - Sensitivität.....	19
Abbildung 23: Yeovil - Test Enteisungsflüssigkeit - Sensitivität	20
Abbildung 24: Fraunhofer - Test Triebwerksöl - Sensitivität	21
Abbildung 25: Airbus - Test Hydraulikflüssigkeit - Sensitivität	21
Abbildung 26: FBAR – Valeriansäure Erkennung unter Laborbedingungen	23
Abbildung 27: FBAR – Grundplatine mit Sensor für hohe Temperaturen	23
Abbildung 28: FBAR – Prototype (rechts) und Installation im Fraunhofer Teststand (links).....	24
Abbildung 29: FBAR – Messung von Valeriansäure in der Zapfluft aufgrund von Triebwerksöl.....	24
Abbildung 30: Maximaler Bauraum für den Sensor.....	25
Abbildung 31: Prinzipielles Diagramm vom Sensorsystem.....	26
Abbildung 32: Mögliche Integrationsorte zum Filtern.....	27
Abbildung 33: Kritische Kontaminationen im Zapfluftpfad für Filtertechnologie	29
Abbildung 34: Übersicht von bewerteten Filtertechnologien (Grün hervorgehobenen Optionen wurden näher untersucht).....	30
Abbildung 35: Verfügbarer Bauraum für einen Konverter mit Aerosol Trap im Einlass.....	33
Abbildung 36: Aerosol Trap - Testaufbau mit Testevaluatoren.....	34

Abbildung 37: Aerosol Trap Testergebnis – Druckverlust bei trockener Luft.....	34
Abbildung 38: Aerosol Trap - Partikelverteilung Öl	35
Abbildung 39: Aerosol Trap – Testergebnisse mit Öl.....	36
Abbildung 40: Testaufbau CHOC, CHOC & AT.....	37
Abbildung 41: Vergleich Performance CHOC, AT, CHOC & AT.....	38
Abbildung 42: Zapfluftsysteem im Fokus der Untersuchung (pink hervorgehoben)	39
Abbildung 43: Testmatrix – Zersetzungstests Triebwerksöle	40
Abbildung 44: Testsetup – Zersetzungstests Triebwerksöle	40
Abbildung 45: Testergebnisse – Zersetzungstests Triebwerksöle	42
Abbildung 46: Coated Pack HX – Schematische Darstellung	43
Abbildung 47: Catalytic Pack HX – untersuchte Betriebspunkte	43
Abbildung 48: Catalytic Pack HX – Prinzipielles Diagramm Luftverteilung Wärmetauscher	44
Abbildung 49: Catalytic Pack Primary HX – Primärer HX Temperaturprofil für Reiseflug warm	44
Abbildung 50: Catalytic Pack Primary HX – Vergleich Temperatur für vier Betriebspunkte	44
Abbildung 51: Catalytic Pack Primary HX – Performance HX vs. Konverter (VOC, Ozon).....	45
Abbildung 52: Catalytic Pack Main HX – Primärer HX Temperaturprofil Reiseflug warm	45
Abbildung 53: Catalytic Pack Main HX – Vergleich Temperatur für vier Betriebspunkte.....	46
Abbildung 54: Catalytic Pack Main HX – Performance HX vs. Konverter (VOC, Ozon).....	46
Abbildung 55: PCO Panel	47
Abbildung 56: PCO Installation nach dem Mixer	48
Abbildung 57: PCO – Testsetup Katalysator Vergleichstests	48
Abbildung 58: PCO – Ergebnis Katalysator mit 5 ppm Ethanol.....	49
Abbildung 59: PCO – Ergebnis Katalysator mit 1 ppm Ethanol.....	49
Abbildung 60: PCO –Vergleich Performance vom Katalysator mit 1 ppm und 5 ppm Ethanol	50
Abbildung 61: PCO Prototype Testsetup at HAATC	50
Abbildung 62: PCO Prototype Testkonditionen.....	50
Abbildung 63: PCO Prototype – Ergebnisse Dosierung mit Ethanol	51
Abbildung 64: PCO Prototype – Ergebnisse Dosierung mit Ethanol und Toluol.....	51
Abbildung 65: PCO – Pre-Filter – Testaufbau (Valeriansäure, Siloxane)	52
Abbildung 66: PCO – Pre-Filter – Ergebnisse - Valeriansäure, Siloxane.....	53
Abbildung 67: PCO – Pre-Filter – Testaufbau (PM2.5).....	53
Abbildung 68: PCO – Pre-Filter – Ergebnisse (PM2.5)	54
Abbildung 69: PCO – Design Study – Anforderungen	55
Abbildung 70: PCO – Design Study – Kinetik Prozess	55
Abbildung 71: PCO – Design Study – Simulation Lichtpanel.....	56
Abbildung 72: PCO – Design Study – CDF Simulation	56
Abbildung 73: PCO – Design Study – Catalyst/ LED Panel Performance Matrix	56
Abbildung 74: PCO – Design Study – Key Performance Design Data.....	57
Abbildung 75: PCO – UV LED – Effizienz zur Wellenlänge	58
Abbildung 76: PCO – UV LED – Testergebnisse.....	58

1 Darstellung

1.1 Aufgabenstellung

Die Zielstellung des Vorhabens „PasKaL“ (Passagierfreundliche Kabine und Luftqualität) mit dem Verbundpartner Airbus war, Flugzeugsysteme zu optimieren. Dabei soll die einwandfreie Qualität der Frischluft, die der Kabine zugeführt wird, unter allen Betriebsbedingungen des Flugzeuges sichergestellt werden.

Mit dem Verbundprojekt PasKaL wurde es ermöglicht, das Thema der Qualität der Luftversorgung für die Kabine sowie das Cockpit übergreifend auf Flugzeug- und Systemebene zu betrachten. PasKaL berücksichtigte die Erkennung und präventive Vermeidung von Störungen oder Umwelteinflüssen, die die Luftqualität sowohl in der Kabine als auch im Cockpit beeinflussen können. Dabei wird der gesamte Luftpfad im Flugzeug berücksichtigt. Das Projekt beinhaltete die Analyse und Charakterisierung von möglichen Luftkontaminanten in der Luftzufuhr und -aufbereitung von der Zapfluft des Triebwerks als Frischluftquelle, über die Klimaanlage (ECS – Environmental Cooling System) bis hin zur gemischten Luft, die Kabine sowie das Cockpit versorgt. Die Reduzierung von Emissionen im Luftpfad zur Kabine bringt Vorteile für die Flugzeugbetreiber sowie den Passagierkomfort und ist ganz im Sinne einer passagierfreundlichen und ökoeffizienten Kabine.

Das Vorhaben suchte technologische Lösungen, die die derzeit rein subjektive Interpretation von auftretenden Gerüchen mit objektivierenden Daten belegen und bei der Erkennung und damit Beseitigung von Ursachen unterstützend eingreifen. Die Charakterisierung zur Definition eines Musters der Luftkontaminanten, die im Fehlerfall durch unvorhergesehenes Eintreten von z. B. Triebwerksöl, Hydrauliköl, Enteisungsflüssigkeit oder durch Umwelteinflüsse über das Triebwerk und weiter über die Zapfluft in die Kabine gelangen, gab es noch nicht. Mit diesen Mustern und ermittelten Marker-Substanzen war eine gezielte Entwicklung von Komponenten für die Erkennung und Reinigung dieser Bestandteile, mit klaren Vorgaben für die Leistungsfähigkeit, möglich. Sowohl Detektoren/ Sensoren als auch Katalysatoren/ Filter sollten im Rahmen dieses Projekts auf ihre Eignung, Leistungsfähigkeit, Zuverlässigkeit und Effizienz für die definierten Muster untersucht werden.

1.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Für Honeywell als Komponenten- und Systemlieferanten für Zapfluftsysteme und die Klimaanlage des Flugzeuges hat die Qualität der Luftversorgung der Kabine sowie des Cockpits eine strategische Bedeutung. Die Ziele des Vorhabens stehen im Einklang mit den Honeywell Entwicklungsstrategien für eine konstant hohe Luftqualität von der Quelle (Triebwerk, Hilfsturbine) bis zur Kabine/ zum Cockpit.

Honeywell hat sich in Deutschland für das Projekt die Kompetenz zur Entwicklung von Systemen zur Verbesserung der Qualität der Zapfluft aufgebaut, um auf Flugzeugebene die Kabinenluftqualität zu optimieren. Für eine erfolgreiche Umsetzung des Vorhabens gab es innerhalb von Honeywell eine enge multinationale Zusammenarbeit mit den Fachbereichen sowie mit dem Verbundpartner Airbus.

Honeywell hat im Rahmen des Verbundprojektes PasKaL mit dem UK ATI (United Kingdom Aerospace Technology Institute) Projekt ECLAIR (Enabling CO₂ reductions b better bLeed AIR management), das von Honeywell geleitet wird, für die Entwicklung von Sensorik kooperiert.

1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Mit der im Jahr 2020 eingereichten Vorhabenbeschreibung für das Luftfahrtforschungsprogramm - LuFo VI-1 - sind für das Vorhaben „Passagierfreundliche Kabine und Luftqualität“ die Projektziele, Projektplanung, Hauptarbeitspakete, Zeitverlauf und eine Ressourcenplanung beschrieben. Der Projektstart vom Verbundvorhaben PasKaL war am 1. November 2020 und hatte eine Laufzeit von 27 Monaten.

Honeywell war im Verbundvorhaben für das Hauptarbeitspaket 2 (HAP2) – Komponenten und Validierung - verantwortlich. Das HAP2 wurde in die Arbeitspakete 2.1 (AP2.1) „Sensorik Validierung“ AP2.2 „Katalysator und Filter Validierung“ und AP2.3 „Optimierung von Anwendungen“ aufgeteilt. In diesem Arbeitspaket wurde die Entwicklung und Validierung von Komponenten für ausgewählte Technologien zur Erkennung und Reduzierung von möglichen Kontaminationen im Luftpfad zur Versorgung der Kabine sowie des Cockpits durchgeführt.

Die Verbundpartner Airbus und Honeywell hatten mit dem Beginn des Projektes regelmäßige und bedarfsorientierte Besprechungen etabliert, um Abstimmungen für das Arbeitspaket auf Arbeitsebene vorzunehmen, den Austausch von Informationen sicherzustellen sowie den Fortschritt des Vorhabens zu überwachen. Zusätzlich gab es jährliche Projektbesprechungen mit dem Zuwendungsgeber, um den Projektstatus vorzustellen. Ein detaillierter Projektfortschritt wurde mit den jährlichen Zwischenberichten an den Zuwendungsgeber gegeben.

1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Trotz zahlreicher Studien, die eine einwandfreie Luftqualität unter normalen Flugbedingungen belegen, führen auftretende Luftverunreinigungen und/oder Gerüche in Flugzeugkabinen und Cockpits zunehmend zu Besorgnis bei betroffenen Luftfahrtgesellschaften, deren Angestellten und Passagieren. Auch wenn sich Hinweise darauf verdichten, dass Geruchsvorfälle keine toxikologisch relevanten Beeinträchtigungen nach sich ziehen, stellen diese Vorfälle eine gravierende wirtschaftliche Belastung der Unternehmen dar. Sie haben im Rahmen der Beeinträchtigung der Flugabläufe auch eine Bedeutung für die Flugsicherheit. Um den Einfluss von möglichen Kontaminanten auf die Frischluftqualität im Flugzeugbetrieb bewerten zu können, ist eine ständige Kontrolle der Zapfluft auf mögliche Verunreinigungen erforderlich. Um entsprechende Detektoren zielgerichtet zu entwickeln, ist die Charakterisierung von Kontaminanten sowie ihren Quellen von Bedeutung. Mit der Erfassung von möglichen Kontaminationen können auch Komponenten zur Reduzierung der Verunreinigungen verbessert sowie validiert werden.

Das Projekt PasKaL baut auf Ergebnisse aus dem gemeinsamen Airbus und Honeywell Verbundvorhaben LuFo V-2 KlimaTIS (Klimaanlagen Technologien für Innovative Systeme) auf. KlimaTIS kooperierte mit dem Projekt FACTS (Fresh Aircraft) der EU, DG MOVE, um potenzielle Kontaminanten in der Zapfluft in Fehlerfällen zu charakterisieren. Diese Ergebnisse bilden eine

wichtige Basis für die gezielte Entwicklung von Komponenten zur Erkennung sowie zum Abbau von Kontaminanten im HPA2.

LUFO V-2 KlimaTIS unterstützte das UK ATI Projekt U-CAIR, dass von Honeywell geleitet wurde und Technologien für die Kabinenluftsensorik und der -filterung untersuchte. Die Entwicklung bilden wichtige Bausteine für die im Projekt untersuchten Konzepte für eine adaptive Flugzeugklimaanlagen (A-ECS). Die Entwicklungen aus diesem Programm hatten Einfluss auf HPA2.

Das ASHRAE Projekt CognitAir untersuchte in einer Studie mit Probanden den Einfluss von Kohlenstoffdioxid (CO₂) und flüchtigen organischen Verbindungen (VOC) auf die kognitive Leistung, Physiologie und den Komfort auf Fluglevel. Diese Untersuchungen hatten Einfluss auf die Entwicklung in HPA2.

Durch die Mitarbeit im CEN/TC 436 für Kabinenluftqualität von kommerziellen Flugzeugen werden Vorgaben bei der Entwicklung mit umgesetzt.

1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Im Vorhaben PasKaL hat Honeywell mit folgenden Partnern zusammengearbeitet:

- Airbus Operations GmbH, Kreetzlag 10, 21129 Hamburg (Verbundführer)

Der Verbundführer für das Vorhaben war der Partner Airbus, und Regelungen der Zusammenarbeit wurden in einer von den Partnern unterzeichneten Kooperationsvereinbarung aufgeführt.

2 Eingehende Darstellung

Die Verantwortlichkeit von Honeywell im Verbundprojekt war das Hauptarbeitspaket 2 „Komponenten und Validierung“. Im Rahmen des Projektes hat Honeywell in Abstimmung mit dem Verbundpartner Airbus Technologien und deren Integration evaluiert. Die in den folgenden Kapiteln beschriebenen Komponenten sind im Verbundprojekt PasKaL näher betrachtet worden.

2.1 Technologien und technische Ergebnisse

Die Abfolge der aufgeführten Technologien entspricht nicht dem zeitlichen Verlauf der Entwicklungsschritte im Verbundprojekt.

2.1.1 AP2.1 Sensorik Kontaminationserkennung

Das AP2.1 wurde in die folgenden Unterarbeitspakete aufgeschlüsselt:

- AP2.1.1 – Marktanalyse und Leistungsvergleich von Sensortechnologien
- AP2.1.2 – Validierung der Sensortechnologien
- AP2.1.3 – Sensor Design und Realisierung
- AP2.1.4 – Optimierung des Sensorkonzeptes

2.1.1.1 AP2.1.1 Marktanalyse und Leistungsvergleich von Sensortechnologien

Im Arbeitspaket AP2.1.1 wurden Sensortechnologien, die zum Detektieren der Luftqualität im Flugzeug eingesetzt werden können, ausgewählt. Die Kabinenluftqualität wird durch drei wesentliche Quellen beeinflusst, die in Abbildung 1 aufgeführt sind. Kontaminationen können beim Betrieb des Flugzeuges innerhalb des Luftsystems in der Kabine oder in dem Zapfluftpfad entstehen sowie über die Triebwerke/ APU von außen in das Luftsystem gelangen.

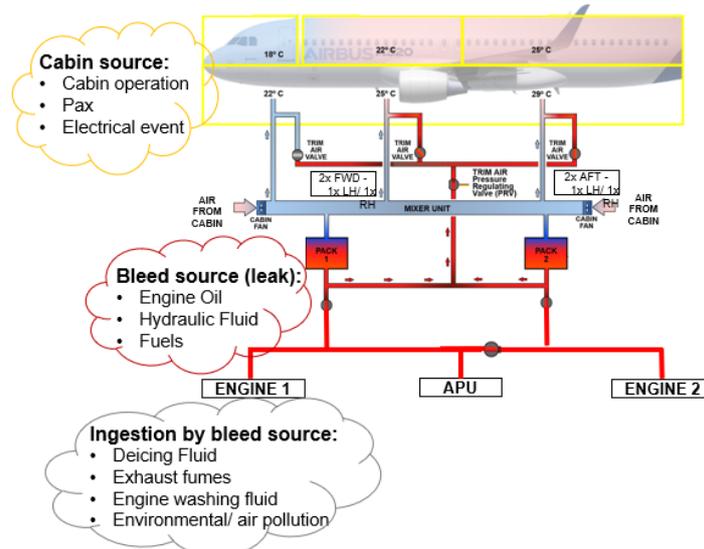


Abbildung 1: Quellen für Kontaminationen der Kabinenluft

Für die Auswahl von möglichen Sensortechnologien wurden Szenarien definiert, die eine Kontamination der Kabinenluft über den Zapfluftpfad verursachen könnten. Wesentliche Quellen für eine entsprechende Luftverunreinigung sind Rückstände von Triebwerksölen, Hydraulikflüssigkeit, Enteisungsmittel, Abgase sowie Treibstoffrückstände. Zum Erkennen dieser Kontaminationsquellen hat Airbus die in Abbildung 2 aufgeführten Markerkomponenten identifiziert.

Contaminants	Source	A/C Localisation
Pentanoic acid (Valeric acid)	Degraded oil	Bleed
UFP = PM0.1 (0.001 - 0.1 µm)	Exhaust, Airport air, Engine oil thermal decompos.	Bleed
1,2 Propylene Glycol (propane-1,2-diol)	De-Icing	Bleed
Ethylene Glycol (Ethane-1,2-diol)	De-Icing	Bleed
Benzene	Fuel/ Engine Oil, hydraulics, exhaust (primary)	Bleed
T-VOC	Oil/Fuel, Hydraulics , De-Icing , exhaust	Bleed
Carbon Dioxide - CO ₂	human source cabin, burning of fossil fuels	Cabin
Carbon monoxide - CO	incomplete combustion of carbon containing fuels	Cabin
Ozone - O ₃	high altitude flight	Cabin
Oxygen - O ₂		Cabin

Abbildung 2: Marker-Komponenten für die Detektierung von Luftqualität - Airbus

Für eine Marktanalyse von Sensortechnologien, die zum Detektieren der Marker-Komponenten geeignet sind, hat Honeywell eine Aufteilung in drei Gruppen vorgenommen:

- Sensortechnologien für CO₂, CO und O₃
- Erkennung von Ultrafeinen Partikeln (UFP)
- Detektieren von VOCs/ TVOCs

Weiter wurden Kriterien zum Bewerten der Sensoren definiert (KPIs), um die Eignung der Sensortechnologien zu bewerten. Die Analyse hat folgende Kriterien berücksichtigt:

- Betriebsumgebung/ Installation
- Lebenszeit/ Wartung, Antwortzeit, Leistungsaufnahme, Messgenauigkeit, -empfindlichkeit, Sensorkosten
- Erkennung der definierten Marker-Komponenten

Ein wesentlicher Aspekt für den Einsatz der Technologie ist eine Erkennung der Kontamination, der Hinweis auf die Quelle bei möglichen Wartungsarbeiten und die Bestätigung der Ursachenbehebung nach einer Reparatur.

2.1.1.1.1 Sensortechnologien für CO₂, CO, O₃

Sensortechnologien zum Detektieren von Kohlenstoffdioxid (CO₂), -monoxid (CO) und Ozon (O₃) mit einer Musterzulassung für kommerzielle Flugzeuge waren zum Zeitpunkt der Recherche nicht auf dem Markt verfügbar.

Es wurden für jede der drei zu detektierenden Komponenten Sensortechnologien bewertet und die drei vielversprechendsten Technologien mit den vorher definierten Kriterien bewertet und in der folgenden Abbildung 3 dargestellt.

Sensor technology		Environmental									Airbus Request for Detection & Quantification Capability		
		BLEED (PCE -> Pack Inlet)	Pack Outlet	CABIN	Maintenace / Lifetime	Response Time (T90)	Power	Sensitivity/ Accuracy	Selectivity/ False Alarm	Stability/ Calibration	Unit Cost (sensor element)	CO2	CO
UV Absorption	O3	Red	Green	Green	Green	Yellow	Yellow	Green	Green	Yellow	Green	Green	Green
Nondispersive Infrared Sensor (NDIR)	CO2	Red	Yellow	Green	Green	Yellow	Green	Green	Green	Yellow	Green	Green	Green
3-electrode electrochemical	CO	Red	Yellow	Green	Green	Yellow	Green	Green	Green	Yellow	Green	Green	Green

Abbildung 3: CO₂, O₃, CO Sensor Analyse Matrix

Zusammenfassung:

Die analysierten Sensortechnologien sind geeignet, um in der Kabinenumgebung Kohlenstoffdioxid, -monoxid und Ozon zu messen.

Im Rahmen des Projektes PasKaL wurde in Einvernehmen mit dem Verbundpartner Airbus entschieden, dass keine weitere Validierung von Sensoren zum Detektieren von Kontaminationen in der Kabine vorgenommen wird.

2.1.1.1.2 Sensortechnologie für ultrafeine Partikel

Sensortechnologien zum Detektieren von ultrafeinen Partikeln (PM_{0.1}) mit einer Musterzulassung für kommerzielle Flugzeuge waren zum Zeitpunkt der Recherche nicht auf dem Markt verfügbar.

Für die Detektierung von ultrafeinen Partikeln gibt es im Wesentlichen folgende vier Technologien, bei Nichtberücksichtigung von Technologien wie Scanning Mobility Particle Sizer (SMPS) und Aerodynamic Particle Size (APS), die in Laboren eingesetzt werden:

- Optische Partikelsensoren
- Kondensationspartikelzähler (CPC – Condensation Particle Counter)
- Photoelektrische Partikelsensoren
- Diffusion Charging

Abbildung 4 veranschaulicht die betrachteten Sensortechnologien mit den definierten Bewertungskriterien.

Sensor technology		Environmental									Detection & Quantification	
		BLEED (PCE -> Pack Inlet)	Pack Outlet	CABIN	Maintenace / Lifetime	Response Time (T90)	Power	Sensitivity/ Accuracy	Selectivity/ False Alarm	Stability/ Calibration	Unit Cost (sensor element)	UFP (PM0.1)
Optical Particle Sensor (OPS)	UFP	Red	Yellow	Green	Green	Yellow	Green	Green	Green	Green	Green	>300nm
Condensation Particle Counters (CPC)	UFP	Red	Red	Green	Red	Yellow	Yellow	Green	Red	Red	Red	>10nm
Diffusiton Charging	UFP	Yellow	Yellow	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	>10nm
Photoelectric	UFP	Red	Red	Green	Yellow	Green	Yellow	Green	Yellow	Red	Red	>20nm

Abbildung 4: UFP Sensor Analyse Matrix

Zusammenfassung:

Die Bewertung von optischen Sensoren und Kondensations-Partikelsensoren sowie photoelektrischen Sensoren zeigt, dass diese Technologien zum Detektieren von UFP im Flugzeug ungeeignet sind:

- Optische Partikelsensoren

Vorteile: Günstige Sensoren. Ermittlung der Partikelgröße und -anzahl.

Nachteile: Keine Erkennung von UFP. Wartungsintensität der Optik.

- Kondensationspartikelzähler (CPC – Condensation Particle Counter)

Vorteile: Hohe Genauigkeit. Ermittlung von Partikelanzahl für definierte Bereiche.

Nachteile: Hochpreisig. Einsatz in anspruchsvollen Umgebungen wie im Flugzeug mit Temperatur- und Druckunterschieden ungeeignet. Hohe Wartungsintensität. Messung der Partikelgröße nicht möglich.

- Photoelektrische Partikelsensoren

Vorteile: Messung von UFP. Detektierung der Oberfläche der gemessenen Partikel und durchschnittliche Partikelgröße

Nachteile: Hochpreisig. Photoelektrische Sensoren sind in einem frühen Entwicklungsstadium und wurden im Feld noch nicht getestet. Die Lebenszeit der Lampe ist limitiert, was zu kurzen kostenintensiven Serviceintervallen führen wird.

Partikelsensoren mit elektrischer Aufladung (Corona Wire Charging) sind eine robuste Technologie, die in verschiedensten Anwendungen im Feld getestet wurden. Einsetzbar wäre die Sensortechnologie in der Kabine oder in einem Umfeld, in dem die Temperatur und der Luftdruck der zu messenden Luft reguliert wird. Die Sensorelemente weisen ein hohes Preisniveau auf, das der Einführung eines Sensors für eine Anwendung im Flugzeug mit Musterzulassung zum aktuellen Zeitpunkt entgegensteht.

- Diffusion Charging

Vorteile: Robuste Technologie. Einsetzbar in einem erweiterten Temperaturbereich. Gute Sensitivität für UFP. Messen von totalen Oberflächen der gemessenen Partikel sowie durchschnittlicher Durchmesser und Anzahl.

Nachteile: Hochpreisig.

2.1.1.1.3 Sensortechnologie für VOC/ TVOC

Sensortechnologien zum Detektieren von VOCs mit einer Musterzulassung für kommerzielle Flugzeuge waren zum Zeitpunkt der Recherche nicht auf dem Markt verfügbar.

Honeywell hat verschiedenste Sensortechnologien zum Erkennen von TVOCs, Valeriansäure, Benzol, Glykol betrachtet:

- Metalloxid-Halbleiter (MOS, MOX) Sensoren

- Photoionisationsdetektor (PID)
- Gasspezifische elektrochemische Sensoren
- Infrared Sensor (IR)-Sensoren
- Ionenmobilitätsspektrometrie (IMS)

Die folgende Abbildung 5 gibt einen Überblick der betrachteten Sensortechnologien mit den definierten Bewertungskriterien.

Sensor technology		Environmental			Maintenance / Lifetime	Response Time (T90)	Power	Sensitivity/ Accuracy	Selectivity/ False Alarm	Stability/ Calibration	Unit Cost (sensor element)	Airbus Request for Detection & Quantification					
		BLEED (PCE -> Pack Inlet)	Pack Outlet	CABIN								T-VOC	Valerio Acid	Benzene	Ethylene Glycol	1,2 Propylene Glycol	
Metal Oxide Semiconductor (MOS)	VOC	Yellow	Green	Green	Yellow	Green	Green	Yellow	Yellow	Yellow	Green	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow
Photoionization Detector (PID)	VOC	Red	Green	Green	Red	Yellow	Green	Yellow	Yellow	Red	Green	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow
Electrochemical Sensors	VOC	Red	Yellow	Green	Yellow	Green	Green	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Red	Red	Red	Red	Red	Red
Infrared Sensors/ NDIR	VOC	Red	Green	Green	Yellow	Green	Green	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow
IMS - Ion-mobility spectrometry	VOC	Red	Green	Green	Yellow	Green	Green	Yellow	Yellow	Red	Red	Green	Green	Green	Green	Green	Green

Abbildung 5: VOC Sensor Analyse Matrix

Zusammenfassung:

Der MOS stellt für die Detektierung von Markerkomponenten und allgemeinen VOCs die beste Lösung dar.

MOS und PID Sensoren sind geeignet, um VOCs zu detektieren und um eine Kontamination zu erkennen, wobei die Einsetzbarkeit vom PID sowie die Lebenszeit begrenzt ist.

- Metalloxid-Halbleiter (MOS, MOX) Sensoren

Vorteile: Preisgünstig. Robuste Technologie, die unter extremen Temperaturen, Druck und Temperatur einsetzbar ist. Reagiert auf eine große Anzahl von VOCs. Schnelle Antwortzeit. Kleiner Sensor (einfache Integration). Lange Lebenszeit.

Nachteile: Eingeschränkte Selektivität. Empfindlichkeit reduziert bei hoher Betriebstemperatur. Instabile Leistung. Benötigen im Allgemeinen mehr Strom als alternative Sensoren.

- Photoionisationsdetektor (PID)

Vorteile: Kann Markerkomponenten für Kontaminationen in der Zapfluft mit Ausnahme von Ethylenglykol erkennen.

Nachteile: Hochpreisig. Empfindliche Lichtquelle und möglicherweise nicht robust genug, um unter extremen Bedingungen zu funktionieren. Das Instrument muss sauber gehalten werden, um eine Verstopfung durch Staub zu vermeiden. Die Konzentration kann nur bestimmt werden, wenn Verbindungen (Mischungsverhältnisse) bekannt sind.

IMS kann Kontaminationen qualitativ unterscheiden, jedoch ist die Einsetzbarkeit eingeschränkt und die hohen Kosten für den Sensor würden eine Flugzeuganwendung teuer gestalten.

- Ionenmobilitätsspektrometrie (IMS)

Vorteile: Kann eine Vielzahl von VOCs qualitativ erkennen

Nachteile: Teuer. Einsatz nur unter atmosphärischem Druck. Regelmäßige Kalibrierung notwendig, für gleichbleibende Genauigkeit.

Chemische Sensoren sowie Infrarotsensoren sind nicht geeignet, weil sie die kritischen Markerkomponenten zum Erkennen von Kontaminationsszenarien nicht detektieren.

- Gasspezifische elektrochemische Sensoren

Vorteile: Kostengünstig. Reagiert selektiv auf viele VOCs.

Nachteile: Reduzierte Leistung bei Temperatur- und Feuchtigkeitsextremen. Übersättigung der Sensoren bei hohen Konzentrationen.

- Infrared Sensor (IR)-Sensoren

Vorteile: Kann eine Vielzahl von VOCs erkennen, jedoch nicht die ausgewählten Markerkomponenten.

Nachteile: Hochpreisig. Optische Komponenten sind vibrationsempfindlich und müssen aufgrund von Wasser- oder VOC-Kondensation oder Verschmutzung durch Staub häufig gewartet werden, um die Sensorfenster für einen zuverlässigen Betrieb sauber zu halten.

Der MOS stellt für die Detektierung von Markerkomponenten und allgemeinen VOCs die beste Lösung dar.

2.1.1.1.4 Architektur Kontaminationserkennung

Für die Auswahl der richtigen Sensortechnologie ist die mögliche Anwendung und somit die Position im Frischluftpfad des Flugzeuges wichtig. Eine frühzeitige Erkennung von Kontaminationen, die über den Zapfluftpfad (siehe Abbildung 2) in die Kabine gelangen können, steht im Vordergrund.

Im Falle einer Kontamination ist die Konzentration der Verschmutzung in der unbehandelten Zapfluft vor der Klimaanlage des Flugzeuges sowie einem Zapfluftfilter (Konverter) für die Reduzierung von Ozon und Kontaminationen am größten. Eine Detektierung hinter den aufgeführten Systemen würde die Erkennung einer möglichen Kontamination und vorbeugende Maßnahmen verzögern. Weiter würde die Integration eines Netzwerkes von Sensoren im Zapfluftpfad vor der Klimaanlage und einem Zapfluftfilter, die Möglichkeit geben, den Eintragungsort der Kontaminationen zu lokalisieren (Triebwerk links, rechts oder APU). Die Zuordnung zum Eintragungsort reduziert den Zeitaufwand für die Wartungsarbeiten im Falle einer Verschmutzung, weil diese auf die angezeigte Quelle reduziert werden kann.

Eine Installation von Sensoren zum Messen von Kontaminationen in der Kabine würde eine Erkennung von VOCs aus dem Zapfluftpfad verringern, weil die Luft gemischt wird (Zapfluft und zurückgeführte Kabinenluft). Zum einen könnten Quellen aus der Kabine zusätzliche Kontaminationen in der Luft verursachen und zum anderen wird durch das Zusammenführen der Luft im Mixer (Zapfluftpfad links & rechts, Kabine) der Konzentrationslevel verringert. Mit einer Sensorinstallation in der Kabine geht die lokale Zuordnung der Fehlerquelle verloren und es wäre nur möglich, einen Kontaminationsereignis zu bestätigen, jedoch nicht zu vermeiden.

Airbus und Honeywell haben sich für die Entwicklung in PasKaL gemeinsam auf die in Abbildung 6 dargestellte Architektur zum Detektieren von Kontaminationen geeinigt. In jedem Zapfluftpfad (Triebwerk links, rechts und APU) ist vor der Flugzeugklimaanlage sowie einem möglichen Zapfluftfilter ein Sensor installiert. Im Falle einer Kontamination kann über den detektierenden Sensor lokalisiert werden, über welchen Pfad die Kontamination in die Zapfluft gelangt ist. Weiter ist mit einem permanenten Monitoring der Zapfluft eine frühzeitige Detektierung von möglichen Leckagen in den Zapfluftquellen (Triebwerke, APU) gegeben, die eine Beeinträchtigung in der Kabine verursachen könnten. Die Installation der Sensoren ist in der Belly Fairing und somit innerhalb des Flugzeugrumpfes vorgesehen, um die Installationskosten zu minimieren.

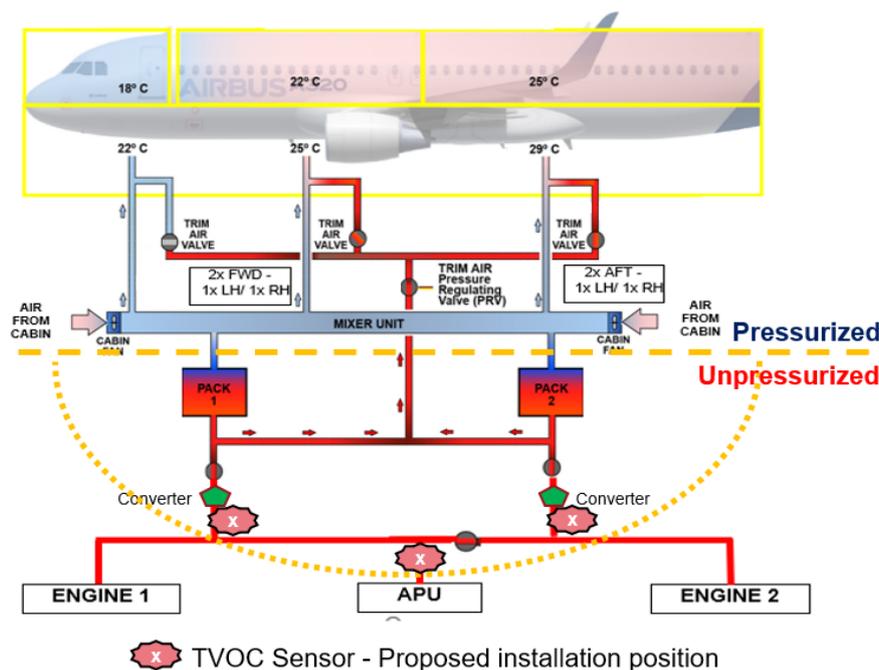


Abbildung 6: Architektur zur Kontaminationserkennung in der Zapfluft

Neben der Lokalisierung des Eintrittspunktes der Kontamination in den Zapfluftpfad soll auch zwischen den verschiedenen Kontaminationsursachen (Triebwerksöl, Treibstoff, Hydrauliköl, Entfrostmittel, ...) unterschieden werden. Für die Zuordnung zu den unterschiedlichen Szenarien ist eine Auswertung von Flugzeugdaten möglich, um diese logisch mit den Sensorsignalen zu verknüpfen. Mit der Kombination der Sensordaten mit Big Data ist die Zuordnung mit einer hohen Wahrscheinlichkeit gegeben.

2.1.1.1.5 Sensor Technologieauswahl

Für eine Umsetzung der in Kapitel 2.1.1.1.4 vorgestellten Architektur gibt es aufgrund der operativen Bedingungen im Zapfluftpfad erhöhte Anforderungen. Für eine Umsetzung ist der in Kapitel 2.1.1.1.3 betrachtete Metalloxid-Halbleitersensor (MOS, MOX) die geeignete Lösung. Der Sensor ist einsetzbar in Umgebungen mit hoher Temperatur (im Zapfluftpfad bis zu 260°C) und außerdem

unempfindlich gegenüber hohen Massenflüssen (bis zu 1.5 kg/s) sowie Luftdrücken (bis zu 60 psig), wie sie im Zapfluftpfad unter Betriebsbedingungen im Flugzeug auftreten können.

Die Einsatzmöglichkeit vom MOS wurde im Projekt PasKaL validiert.

2.1.1.2 AP2.1.2 – Validierung der Sensortechnologien

2.1.1.2.1 Metalloxid-Halbleitersensoren (MOS, MOX)

Wie im Kapitel 2.1.1.1.5 ausgeführt, wurden für die Umsetzung einer Anwendung zum Monitoren von Kontaminationen im Zapfluftpfad Metalloxid-Halbleitersensoren (MOS) als die geeignete Technologie ausgewählt. Honeywell hat in einem mehrstufigen Verfahren von drei ausgewählten MOS Technologien den besten Kandidaten ausgewählt und validiert:

- Sensor A - metal oxide, p-type
- Sensor B - metal oxide, p-type with cleaning function
- Sensor C - metal oxide n-type

Die Sensorentwicklung wurde im ATI UK ELCAIR Projekt durchgeführt, das von Honeywell geleitet wird. Das Projekt PasKaL kooperiert mit ECLAIR für die Entwicklung der Sensoren. In PasKaL wurden in enger Zusammenarbeit mit dem Projektpartner Airbus die Anforderungen an den Sensor definiert, der Entwicklungsfortschritt kommuniziert und der Sensor in den Airbus Bleed-Teststand (IBACS) integriert.

2.1.1.2.1.1 Generelle Prüfung der MOS Sensoren

Um die generelle Sensitivität der ausgewählten Sensoren auf ausgewählte Kontaminationen zu prüfen, wurden Tests mit den Sensoren unter Raumbedingungen durchgeführt.

Testkampagne 1 - Kontaminationscocktail

In einer ersten Testkampagne wurden die Sensoren einem Mix von Kontaminationen von niedrigen bis hohen Leveln ausgesetzt (20 – 1070 ppm). Der Mix wurde unter typischen Betriebsbedingungen dem Zapfluftpfad in der Test Bench zugeführt. Die Zapfluft wurde anschließend auf Raumtemperatur (24°C – 36°C) und Umgebungsdruck angepasst, bevor sie der Testbox, in der die Sensoren installiert waren (siehe Abbildung 7), zugeführt wurde.

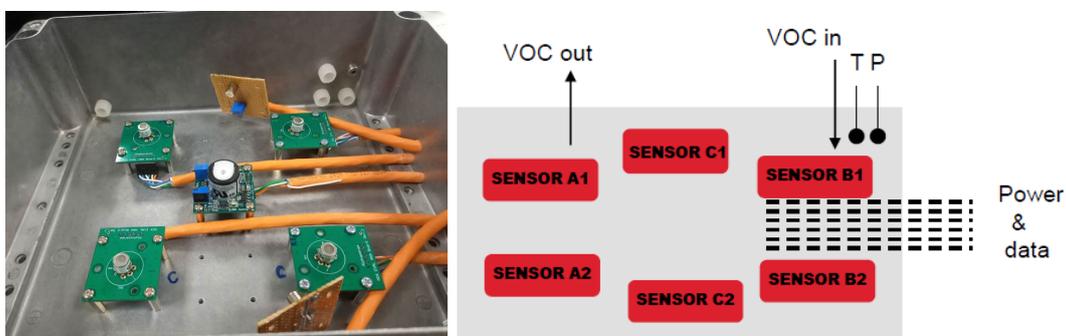


Abbildung 7: Testbox Sensoren und prinzipielles Diagramm

Die dargestellten Ergebnisse in Abbildung 8 und Abbildung 9 zeigen, dass die drei getesteten MOS auf Kontaminationsänderungen reagiert und diese gemessen haben.

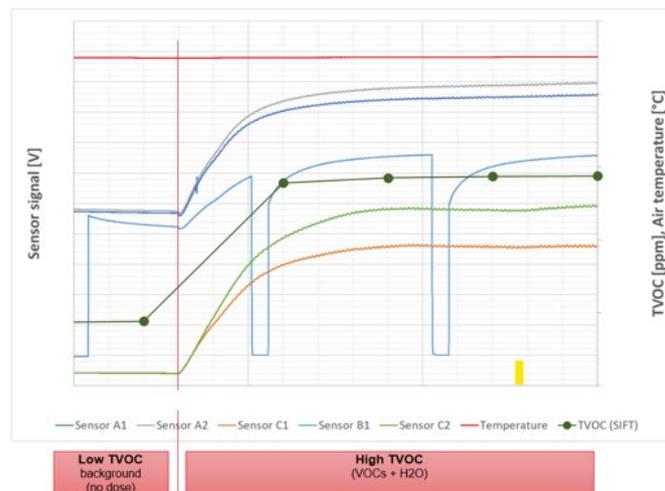


Abbildung 8: Datenfile für eine TVOC Messprobe

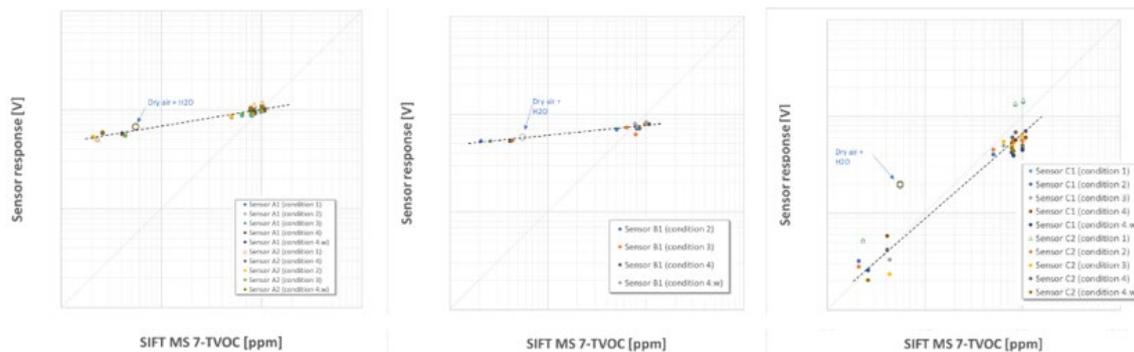


Abbildung 9: Sensorsignal bei verschiedenen TVOC Konzentrationen (von links nach rechts Sensor A, B, C)

Alle drei Sensortypen haben eine hervorragende Reproduzierbarkeit für die zugeführten TVOC-Konzentrationen (20 – 1070 ppb).

Testkampagne 2 – Ausgewählte Markerkomponenten

In einer zweiten Testkampagne sollte die generelle Performance der ausgewählten Sensoren für kritische Markerkomponenten validiert werden. Um zu bestätigen, dass mit den Sensoren die kritischen Kontaminationsszenarien detektiert werden können, wurden diese auf ihre Messempfindlichkeit für die in Abbildung 10 aufgeführten acht Markerkomponenten getestet. Neben den vier von Airbus in Abbildung 2 definierten Markerkomponenten, wobei Benzol mit Toluol ersetzt wurde, hat Honeywell vier weitere Markerkomponenten ausgewählt, die Honeywell als wesentliche Indikatoren für die unterschiedlichen Kontaminationsszenarien ermittelt hat.

Acetaldehyde
Ethylene glycol
N-hexane
Acetonitrile
Valeric acid
2-propanol
Toluene
Ethyl acetate

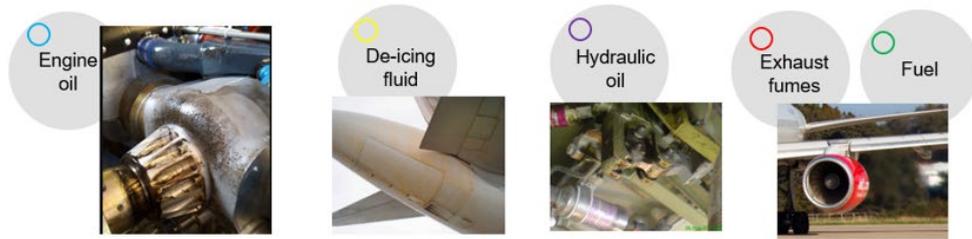


Abbildung 10: Marker-Komponenten für typische Kontaminationsszenario

Pro Testzyklus wurde eine Markerkomponente von einem niedrigen bis zu einer hohen Konzentration der Testumgebung zugeführt, was mit Referenzmesstechnik kontrolliert wurde. Die Tests wurden in einer Laborumgebung bei Raumtemperatur durchgeführt.



Abbildung 11: TVOC Sensor Testkammer

Die Messungen für die einzelnen Sensoren belegen, dass die ausgewählten Sensoren die acht ausgewählten Kontaminanten mit einer hohen Wiederholbarkeit detektieren. Die Tests haben auch gezeigt, dass die Messempfindlichkeit (Limit of Detection - LOD) der ausgewählten Sensoren unterhalb der zu erwartenden Konzentrationen bei einem Event lag.

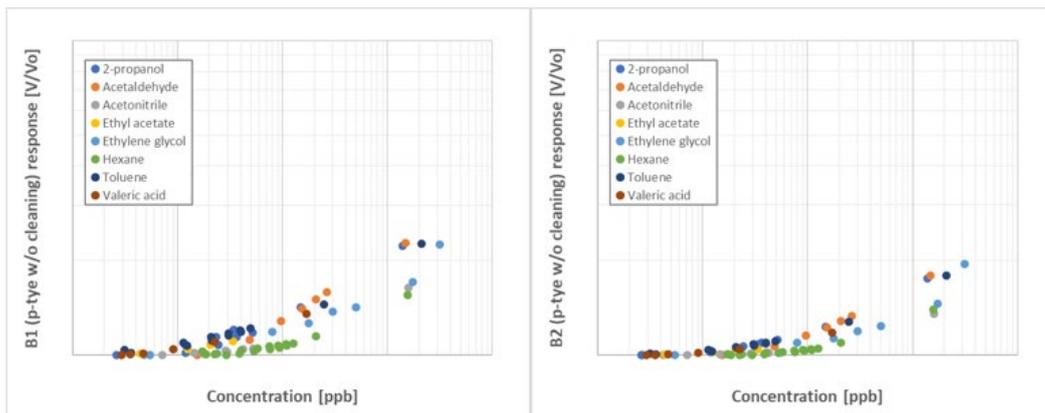


Abbildung 12: Sensor A - metal oxide, p-type

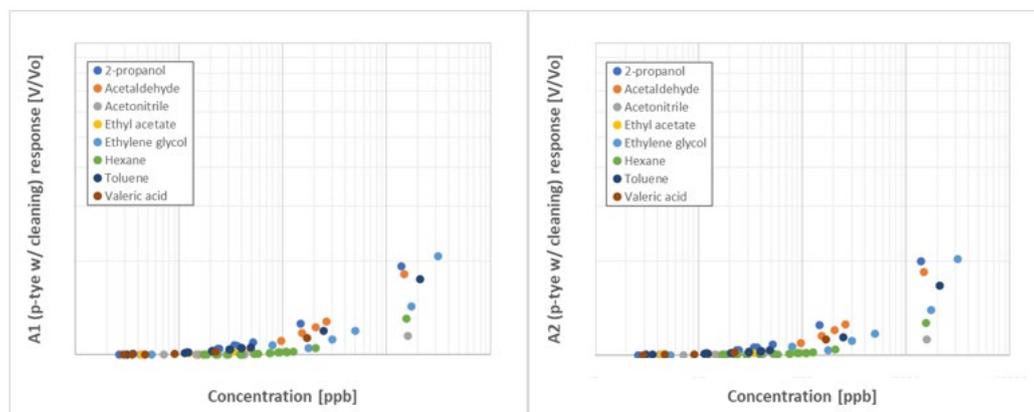


Abbildung 13: Sensor B - metal oxide, p-type with cleaning function

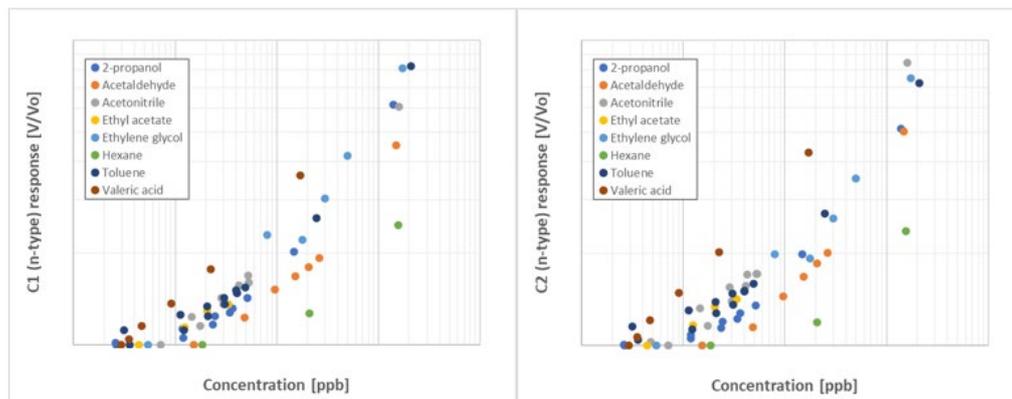


Abbildung 14: Sensor C - metal oxide n-type

Für die weiterführenden Tests hat Honeywell den Sensor B mit der Reinigungsfunktion ausgewählt. Es wurde erwartet, dass der Sensor mit der Selbstreinigungsfunktion im operationalen Betrieb eine Genauigkeit hat, weil mögliche Verschmutzungen auf der Oberfläche, die die Messwerte negativ beeinflussen können, durch die Funktion abgebaut werden.

2.1.1.2.1.2 Test in relevanter Umgebung

Die Validierung des Metalloxid-Sensors in relevanter Umgebung wurde in mehreren Schritten vorgenommen und wird in den folgenden Kapiteln beschrieben.

Für die Test hat Honeywell einen Prototyp hergestellt, der flexibel in der Testumgebung eingesetzt werden kann. Er ist auf der Zapfluftverrohrung auf dem Prüfstand montierbar, und die Zapfluft kann über Messports in der Verrohrung an den Sensor geleitet werden. Mit der Installation auf der Zapfluftverrohrung und der Zuführung von Zapfluft zum Prototyp ist sichergestellt, dass die Sensoren eine vergleichbare Betriebsbedingung wie im Zapfluftpfad haben.

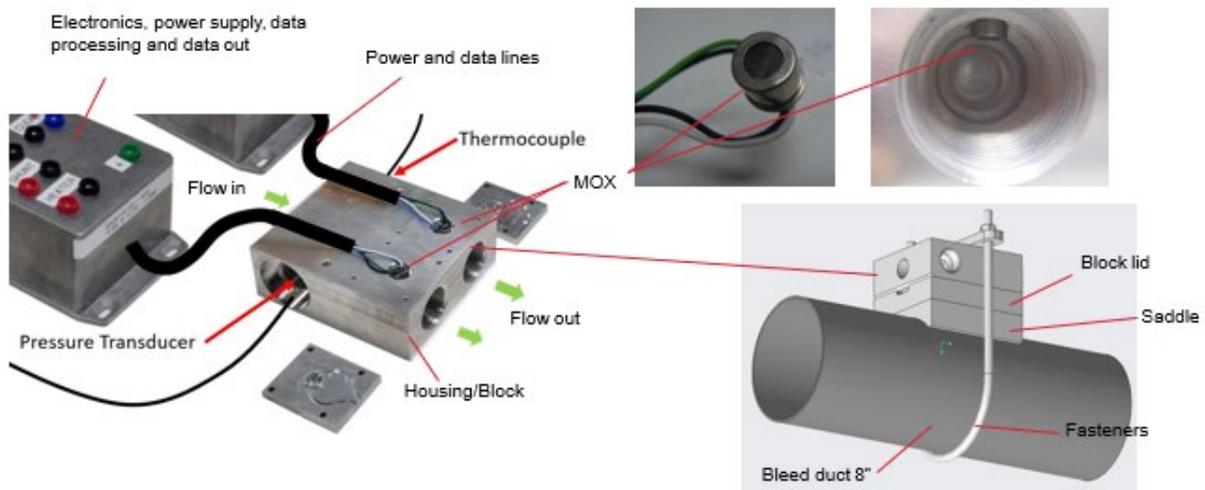


Abbildung 15: Sensor Prototyp für Validierung unter Betriebsbedingungen

2.1.1.2.1.2.1 Temperaturtest

Um die Eignung des MOS für den Einsatz bei den hohen Temperaturen im Zapfluftpfad zu ermitteln, wurde der Sensor in einer kontrollierten Umgebung Temperaturen bis zu 265°C über einen Zeitraum von 30 Minuten ausgesetzt. Die 265°C ist die maximal Temperatur die der Sensor im Zapfluftpfad ausgesetzt ist.

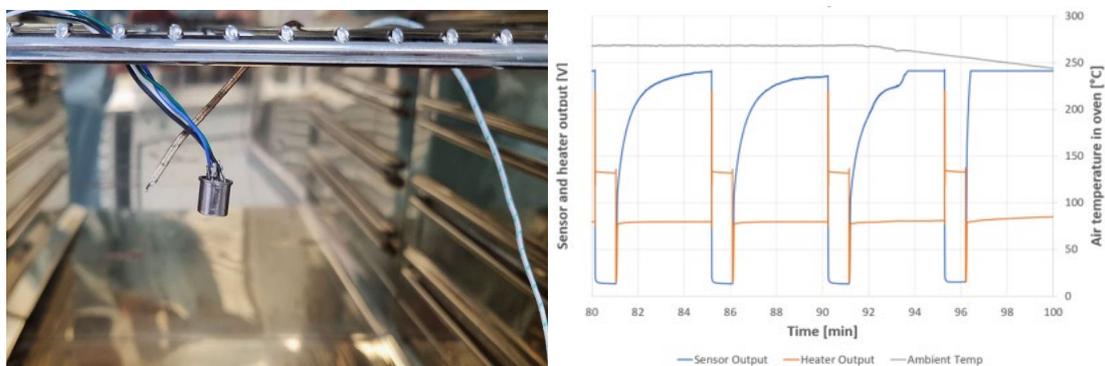


Abbildung 16: MOS Test bei maximalen Zapflufttemperaturen

Während des Tests war der Sensor operativ und hat stabile Signale über den gemessenen Temperaturbereich ausgegeben. Nach den durchgeführten Tests hatte der Sensor keine sichtbaren Spuren von Beschädigung gezeigt und war voll funktionsfähig. Mit dem Test wurde nachgewiesen, dass eine Installation in Bereichen mit den maximalen Zapflufttemperaturen möglich ist.

2.1.1.2.1.2.2 *Vibrationstests*

Ein kritischer Punkt für die Eignung von Sensoren in die Verrohrung im Zapfluftpfad ist die Widerstandsfähigkeit gegen Vibrationen, denen der Sensor über die Lebenszeit im Flugzeug ausgesetzt ist. Honeywell hat den MOS verschiedenen funktionalen und Lebensdauer-Vibrationstests ausgesetzt (Operational shock, random functional shocks, sine sweep, random endurance). Die tests wurden entsprechend RTCA/ DO160 Issue G durchgeführt.

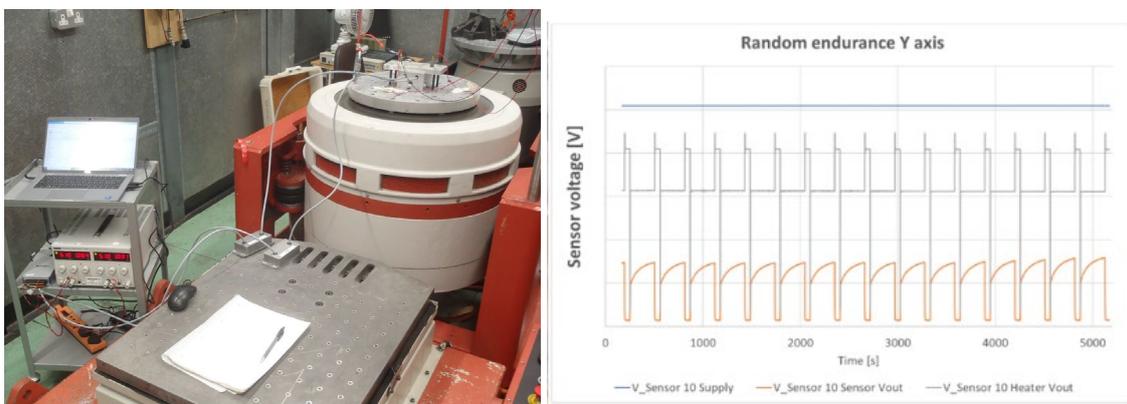


Abbildung 17: MOS Vibrationstests, Beispiel: Random Endurance

Der Sensor war bei den Tests operativ und es wurden stabile Signale während der verschiedenen Prozeduren ausgegeben. Bei der abschließenden Prüfung hatte der Sensor keine sichtbaren Beschädigungsspuren und war voll funktionsfähig. Die Ergebnisse haben aufgezeigt, dass der MOS widerstandsfähig gegen Vibrationen ist und für eine Installation in der Verrohrung der Zapfluft geeignet ist.

2.1.1.2.1.2.3 *MOS Sensitivität gegenüber Temperatur, Druck, Feuchtigkeit*

Bei der Messung von möglichen Kontaminationen im Zapfluftpfad ist der Sensor dem Einfluss von variierenden Temperaturen, Drücken und Luftfeuchtigkeiten ausgesetzt. Eine Validierung des MOS gegen diese Parameter wurde vorgenommen, um die Sensitivität des Sensors gegen diese Parameter zu bestimmen.

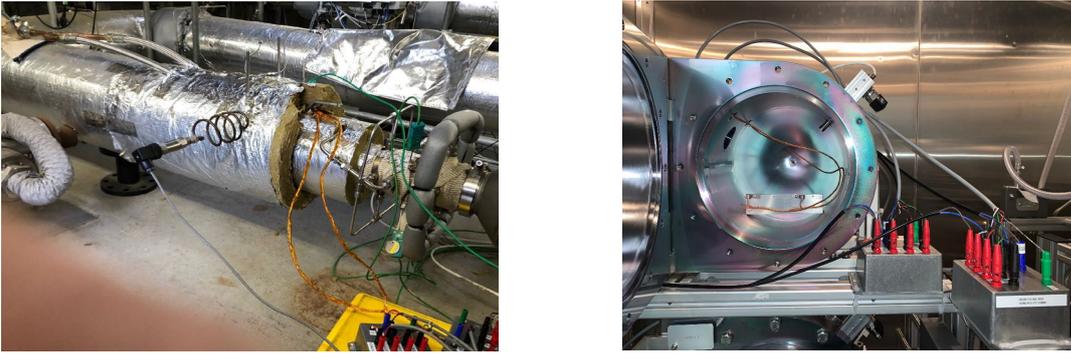


Abbildung 18: Teststand für MOS Sensitivitätsmessung (links Temperatur, Druck, rechts Feuchtigkeit)

Folgende Testmatrix stellt die definierten Testbedingungen für Temperatur (rot), Druck (Gelb), Feuchtigkeit (schwarz) für typische Betriebsbedingungen graphisch dar.

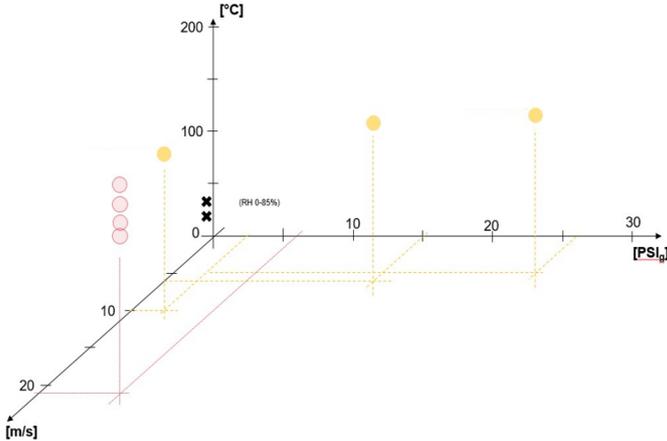


Abbildung 19: Testmatrix für MOS Sensitivität - Temperatur, Druck, Feuchtigkeit

Während des Tests wurden Messdaten mit dem Sensor für nicht kontaminierte Luft sowie mit 500ppb Acetaldehyd kontaminierter Luft aufgenommen.

Die ermittelten Daten zeigten, dass der MOS eine niedrige (Temperatur, Luftfeuchtigkeit) bis moderate (Druck) Sensitivität für die typischen Bedingungen in der Zapfluft hat.

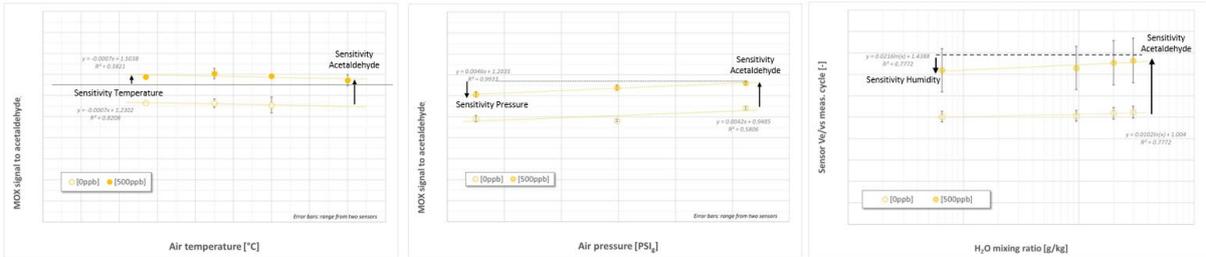


Abbildung 20: MOS Sensitivität auf Temperatur, Luftdruck, Feuchtigkeit

2.1.1.2.1.2.4 MOS Kontaminationstests

Eine mögliche Verschmutzung der Zapfluft durch den operativen Betrieb des Flugzeuges wird im Wesentlichen durch folgende Komponenten verursacht:

- Triebwerksöl
- Enteisungsflüssigkeit
- Hydraulikflüssigkeit

Mit dem Prototype des Metalloxid-Sensors wurden Tests in verschiedenen Testständen durchgeführt, um die Sensitivität vom MOS auf diese Komponenten unter relevanten Betriebsbedingungen zu validieren. Folgend eine Übersicht der durchgeführten Tests auf den unterschiedlichen Testständen:

- Honeywell Zapfluftteststand in Yeovil
 - Triebwerksöl (Eastman 2380)
 - Enteisungsflüssigkeit (1.2 Propanediol)
- Airbus Zapfluftteststand in Hamburg (Unterstützung durch Honeywell)
 - Triebwerksöl (Eastman 2389, Mobil Jet II)
 - Enteisungsflüssigkeit (Propylene-Glycol)
 - Hydraulikflüssigkeit (HyJet V)
- Fraunhofer IBP Zapfluftteststand (BACS - Bleed Air Contamination Simulator) in Holzkirchen
 - Triebwerksöl (Mobil Jet II)



Abbildung 21: Zapfluftteststände (Honeywell, links; Airbus, Mitte; Fraunhofer, rechts)

Honeywell Zapfluftteststand Yeovil

Auf dem Zapfluftteststand in Yeovil wurden Tests mit dem Triebwerksöl Eastman 2380 unter relevanten Betriebsbedingungen durchgeführt sowie mit Enteisungsflüssigkeit 1.2 Propanediol.

Die Tests wurden bei typischen Zapflufttemperaturen, -drücken und -strömen für den Betrieb des Flugzeuges am Boden sowie bei Reiseflughöhe durchgeführt. Während des Testvorgangs wurde die Zapfluft mit verschiedenen Konzentrationen vom Triebwerksöl bzw. der Enteisungsflüssigkeit kontaminiert.

Eastman 2380

Folgend ist eine Zusammenfassung der Testbedingungen für die Messung von Triebwerksöl:

- 200°C @ 30 PSig, ~0.04 g/kg, ~5m/s
- 150°C @ 30 PSig, ~0.04 g/kg, ~5m/s
- 150°C @ 6 PSig, ~0.04 g/kg, ~20 m/s
- Oil (Eastman 2380) feed: 0 - 0.1 – 0.5 – 1.0 – 3.0 - 5.0 ppm
- Sensor mit zwei unterschiedlichen Einstellungen

Getestet wurden unterschiedliche Konfigurationen des Sensors, die die Sensitivität des Sensors beeinflussen.

Die Testergebnisse zeigen, dass der MOS eine sehr gute Empfindlichkeit zum Detektieren von Öl bei 150°C und 200°C hat und der Sensor vergleichbare Daten bei beiden Temperaturen ausgibt. Die Ergebnisse mit dem optimierten Sensor zeigen eine höhere Sensitivität für beide Temperaturbereiche auf. Die gemessenen Daten wurden bei mehreren Testdurchläufen bestätigt.

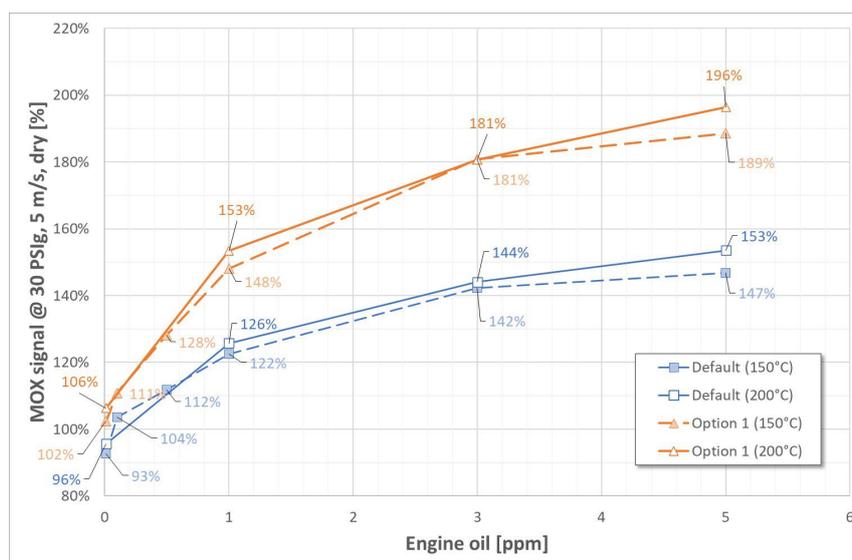


Abbildung 22: Yeovil - Test Triebwerksöl - Sensitivität

Enteisungsflüssigkeit

Folgend ist eine Zusammenfassung der Testbedingungen für die Messung von Triebwerksöl:

- 200°C @ 30 PSig, ~0.04 g/kg, ~5m/s
- 150°C @ 30 PSig, ~0.04 g/kg, ~5m/s
- De-Icing feed (1.2 Propanediol): 0 - 1.0 – 3.0 - 5.0 ppm
- Sensor mit zwei unterschiedlichen Einstellungen

Die aufgenommenen Daten zeigen, dass der MOS Enteisungsflüssigkeit eindeutig für die verschiedenen in den Teststand eingebrachten Konzentrationen für die ausgewählten Temperaturbereiche misst.

Für die Standardkonfiguration des Sensors wurden vergleichbare Signale für unterschiedliche Temperaturen ausgegeben. Für die auf Sensitivität optimierte Konfiguration hat der Sensor für niedrige Konzentrationen vergleichbare Signale ausgegeben, war jedoch für höhere Konzentrationen (> 1ppm) zu sensitiv und hat die Sättigung erreicht. In der weiteren Entwicklung des Sensors ist die Konfiguration entsprechend zu modifizieren.

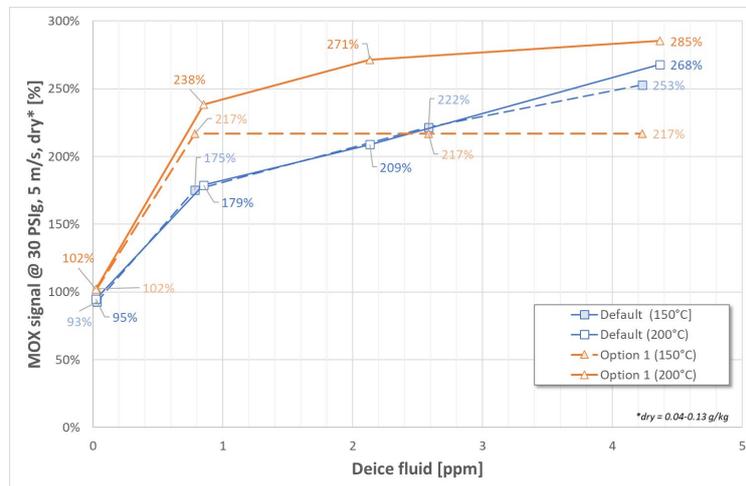


Abbildung 23: Yeovil - Test Enteisungsflüssigkeit - Sensitivität

Fraunhofer IBP Zapflutteststand Holzkirchen

Beim Fraunhofer IBP in Holzkirchen wurden Tests mit Mobil Jet II auf dem BACS durchgeführt. Honeywell hat bei diesen Tests den MOS-Prototyp in den BACS integriert. Der Teststand von Fraunhofer bietet die Möglichkeit, Öl bei höheren Temperaturen im Vergleich zum Teststand in Yeovil ins System zu dosieren. Höhere Temperaturen haben einen potenziellen Einfluss auf die Zersetzung des Öls und die Detektierung mit dem MOS. Der obere Bereich der Dosierung war in einem Bereich, der außerhalb von erwarteten Konzentrationen von Triebwerksöl in einem Fehlerfall im Flugzeug liegt.

Folgend ist eine Zusammenfassung der Testbedingungen für die Messung im BACS:

- Sensor condition: 200°C @ ~1.2bar, speed ~10m/s
- Oil Injection: 350°C, 6 bar
- Oil feed (Mobile Jet II): 1 ppm – 100ppm

Die Messergebnisse bei Fraunhofer bestätigen die ermittelten Daten bezüglich der Sensitivität des MOS auf Triebwerksöl. Die Zersetzung des Triebwerköls bei höheren Temperaturen hat keinen negativen Einfluss auf die Erkennung durch den MOS

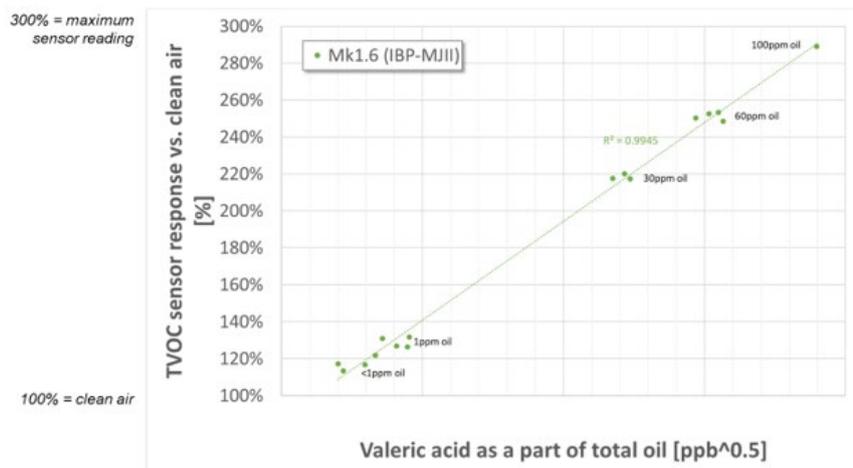


Abbildung 24: Fraunhofer - Test Triebwerksöl - Sensitivität

Airbus Operation Zapfluftteststand Hamburg

Airbus in Hamburg hat Tests mit dem MOS Prototyp auf dem Zapfluft-Integrationstest-Teststand durchgeführt. Die Tests wurden unter Verantwortung von Airbus durch Honeywell begleitet.

Honeywell hatte besonderes Interesse an dem Test mit Hydraulikflüssigkeit (HyJet V), weil entsprechende Tests mit Hydraulikflüssigkeit im Rahmen der Testkampagne in Yeovil aus Sicherheitsgründen nicht durchführbar waren.

Folgend ist eine Übersicht der Testbedingungen mit Hydraulikflüssigkeit auf dem Airbus Teststand:

- Sensor condition: 200°C @ 2,8 bar, 0,55 kg/s
- Hydraulic feed (HyJet V): ~ 100 – 225 – 360 ppb

Die bei Airbus ermittelten Testdaten zeigen eine über dem Durchschnitt liegende Sensitivität des MOS für Hydraulikflüssigkeiten. Der Sensor detektiert reproduzierbar unterschiedliche Konzentrationen in ausgewählten Temperaturbereichen.

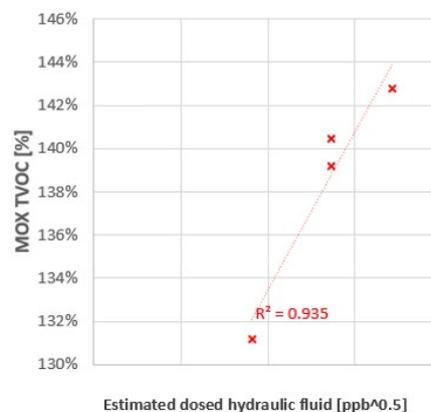


Abbildung 25: Airbus - Test Hydraulikflüssigkeit - Sensitivität

2.1.1.2.1.3 MOS Zusammenfassung

Die durchgeführten Testkampagnen haben bei unterschiedlichen typischen Betriebsbedingungen in der Zapfluft bestätigt, dass der von Honeywell ausgewählte und getestete MOS (TVOC-Sensor) eine hervorragende Sensitivität für die kritischen Komponenten hat, die beim Betrieb des Flugzeuges eine Kontamination der Zapfluft verursachen können. Die kritischen Komponenten – Triebwerksöl, Hydraulikflüssigkeit und Enteisungsflüssigkeit – wurden auch bei sehr niedrigen Konzentrationen gemessen, wobei die Variation von Temperatur, Feuchtigkeit und Druck einen niedrigen bis moderaten Einfluss auf die Messgenauigkeit haben.

Der Einsatzfähigkeit des MOS für die anspruchsvollen Betriebsbedingungen in der Zapfluft wurden bestätigt.

Die Entwicklung des Sensors wird unter dem Projekt UK ATI ECLAIR sowie dem europäischen Projekt CAJU Clean Aviation TheMa4HERA weitergeführt.

2.1.1.2.2 Selektiver Sensor – FBAR

Nach dem Abschluss der Marktanalyse wurde im engen Austausch mit dem Verbundpartner Airbus eine Sensortechnologie mit ins Projekt aufgenommen, die einzelne Markerkomponenten detektieren kann und somit die Art der Kontaminierung aufzeigt. Geeignete Sensoren für die Erkennung von Markerkomponenten von Kontaminationen, die im Flugzeug eine Relevanz haben, sind weder mit einer Musterzulassung noch am Markt verfügbar. Honeywell hat die FBAR (Film Bulk Acoustic Resonator) Sensortechnologie ausgewählt, um die Erkennung von einzelnen Markerkomponenten zu ermöglichen.

Das Ziel von PasKaL war die Evaluierung des Konzeptes mit den definierten Anforderungen. Die übergeordneten Anforderungen waren die Messung von Markerkomponenten im Zapfluftpfad, um mögliche Eintragungen von Triebwerksöl, Enteisungsflüssigkeit oder Hydraulikflüssigkeit zu unterscheiden. Die Tests wurden in enger Zusammenarbeit mit dem von Honeywell geleiteten Projekt UK ATI ECLAIR durchgeführt.

Der Fokus der Konzeptvalidierung lag in der Erkennung von Valeriansäure, die eine Markerkomponente für Triebwerksöl ist. Die Grundtechnologie zur Erkennung von chemischen Komponenten ist gleich und wird durch Frequenzverschiebungen ermittelt. Die Entwicklung einer Beschichtung zum Erkennen von Valeriansäure sowie die Validierung der Funktionalität mit dem Sensor wurde im Projektzeitraum umgesetzt.

2.1.1.2.2.1 Generelle Prüfung der FBAR Sensortechnologie

Der Anbieter für den FBAR Sensor hat im Entwicklungsprozess verschiedene Beschichtungen untersucht und final eine von drei ausgewählten funktionalen Beschichtungen zum Detektieren von Valeriansäure ausgewählt und den Core-Sensor damit beschichtet.

Unter Laborbedingungen konnte nachgewiesen werden, dass der FBAR Sensor mit der ausgewählten Beschichtung Valeriansäure detektieren kann. Die Änderung der Neigung (steigende oder fallende Flanke) zeigt eine Änderung der Konzentration der Valeriansäure an.

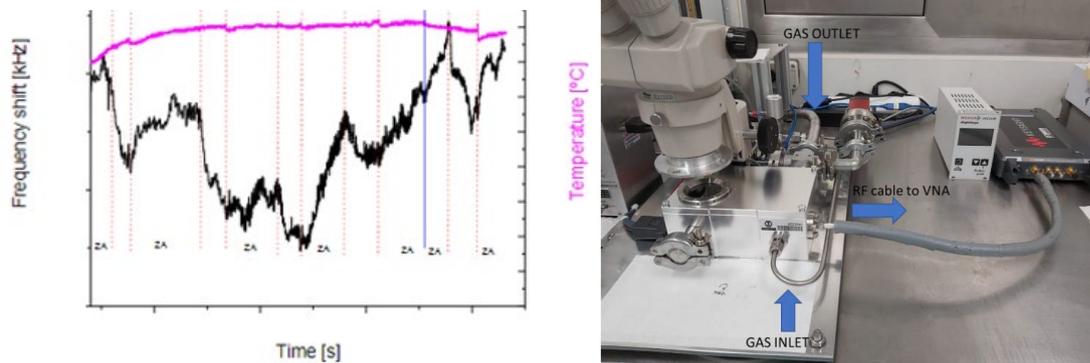


Abbildung 26: FBAR – Valeriansäure Erkennung unter Laborbedingungen

2.1.1.2.2.2 FBAR Sensortechnologie in relevanter Umgebung

Für eine frühe Reduzierung des Risikos wurde nach dem erfolgreichen Test im Labor ein Test unter Zapfluftbedingungen bei Fraunhofer IBP in Holzkirchen vorgenommen. Für diesen Test wurde der Sensor in den von Honeywell entwickelten Testprototypen integriert.

Analysen und Tests haben gezeigt, dass das Sensorelement für Temperaturen, wie sie in der Zapfluft vorkommen, einsetzbar ist.

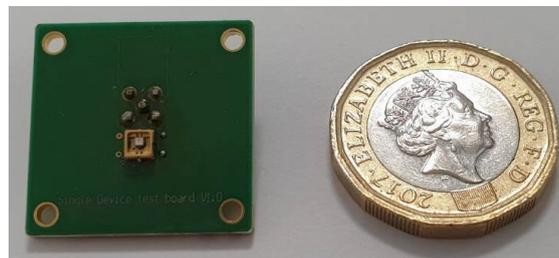


Abbildung 27: FBAR – Grundplatte mit Sensor für hohe Temperaturen

Testprototyp mit dem FBAR Sensor wurde bei diesen Tests in den BACS integriert, um zu validieren, dass der Sensor mit der Valeriansäure-Beschichtung Triebwerksöl als Kontamination in der Zapfluft unter relevanten Betriebsbedingungen detektiert.

Folgend ist eine Zusammenfassung der Testbedingungen für die Messung im BACS:

- Sensor condition: 200°C @ ~1.2bar, speed ~10m/s
- Oil Injection: 350°C, 6 bar
- Oil feed (Mobile Jet II): 1 ppm – 100ppm

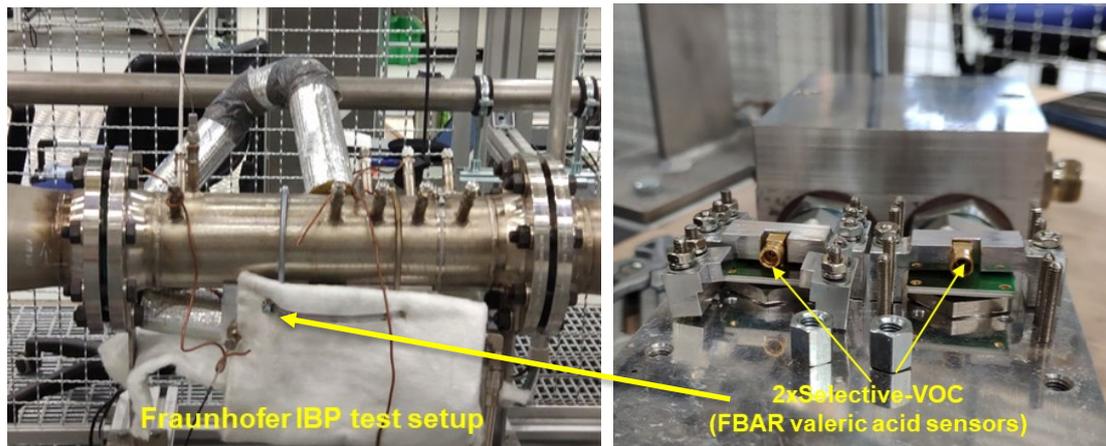


Abbildung 28: FBAR – Prototype (rechts) und Installation im Fraunhofer Teststand (links)

Die aufgenommenen Testdaten zeigen, dass der eingesetzte FBAR Sensor unterschiedliche Konzentrationen von Triebwerksöl in der Zapfluft erkennt. Eine Frequenzänderung mit einer negativen Neigung zeigt die Präsenz von Triebwerksöl. Das Fehlen von Öl oder eine niedrige Konzentration von Triebwerksöl führt zu einer positiven Steigung. Die Anwesenheit von Öl reduziert die Frequenz aufgrund von Absorption und die Abwesenheit von Öl erhöht die Frequenz aufgrund von Desorption auf der Oberfläche der Sensorbeschichtung. Die Neigungswinkel für die Frequenzverschiebung zeigen die Höhe der Konzentration an.

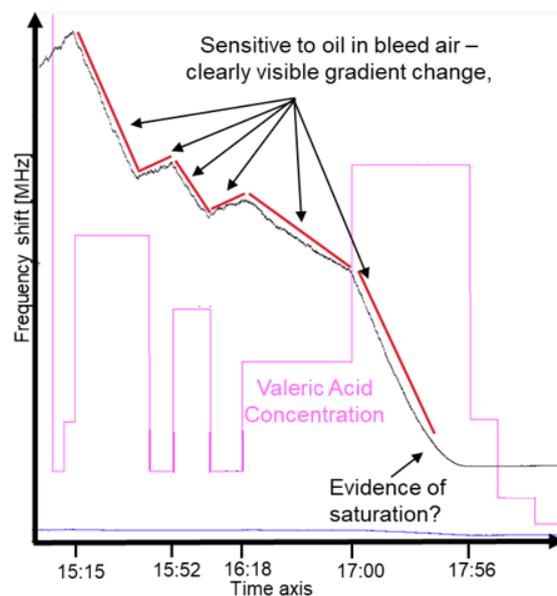


Abbildung 29: FBAR – Messung von Valeriansäure in der Zapfluft aufgrund von Triebwerksöl

2.1.1.2.2.3 FBAR Zusammenfassung

Mit den vorgenommenen Testkampagnen wurde validiert, dass die FBAR Sensor Technologie mit einer Beschichtung zum Erkennen von Valeriansäure als Markerkomponente für Triebwerksöl diese detektiert.

Es wurde der Nachweis erbracht, dass der FBAR Sensor in den anspruchsvollen Betriebsbedingungen der Zapfluft mit hohen Temperaturen und Drücken einsetzbar ist und unter diesen Bedingungen mit der entsprechenden Beschichtung Triebwerksöl erkennt.

Die Entwicklung des Sensors wird unter dem Projekt UK ATI ECLAIR sowie dem europäischen Projekt CAJU Clean Aviation TheMa4HERA weitergeführt.

2.1.1.3 AP2.1.3 Sensor Design und Realisierung

Im Projekt PasKaL hat Honeywell mit dem Verbundpartner Airbus die Anforderungen für das Design des Sensors sowie die Möglichkeit einer Integration in das Zapfluftsystem abgestimmt.

Zuerst wurden potentielle Positionen eines Sensor zum Detektieren von Kontaminationen im Zapfluftsystem mit Airbus vereinbart. Für eine gute Erreichbarkeit des Sensors wurden Positionen im nicht bedruckten Bereich in der Mitte des Flugzeuges (Belly Faring) ausgewählt. Für die Umsetzung des vereinbarten Konzeptes wird in jedem Zapfluftpfad (Engine links, Engine Rechts, APU) ein Sensor installiert.

Die Position beeinflusst das Design des Sensors. Zum einen begrenzt der verfügbare Bauraum die Größe des Sensors und die Installationsposition hat auch einen Einfluss auf das Design, um die Vorgaben im nichtbedruckten Bereich zu erfüllen.

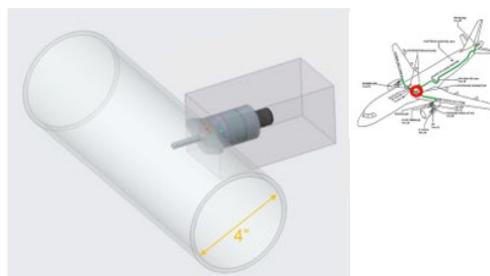


Abbildung 30: Maximaler Bauraum für den Sensor

Eine Voruntersuchung der erforderlichen Technologieelemente für ein Sensordesign wurden vorgenommen. Die Installation im Zapfluftpfad ist für einen Sensor aufgrund der unterschiedlichen Betriebsbedingungen innerhalb und außerhalb der Verrohrung herausfordernd. Die Sensorelemente müssen hohen Temperaturen sowie Drücken standhalten und die Sensorelektronik hohe Temperatur- sowie Druckunterschiede.

Neben dem Sensordesign wurde auch das Sensorsystem mit dem Kooperationspartner Airbus abgestimmt. Die Sensoren werden in jedem Zapfluftpfad installiert, um den Eintragungsort für eine Kontamination zu ermitteln. Die Sensoren werden mit einer zentralen Steuereinheit verbunden, um die permanent während des Betriebes des Flugzeuges aufgenommen Daten aufzubereiten. Die Steuereinheit ist das Interface zu den Flugzeugsystemen.

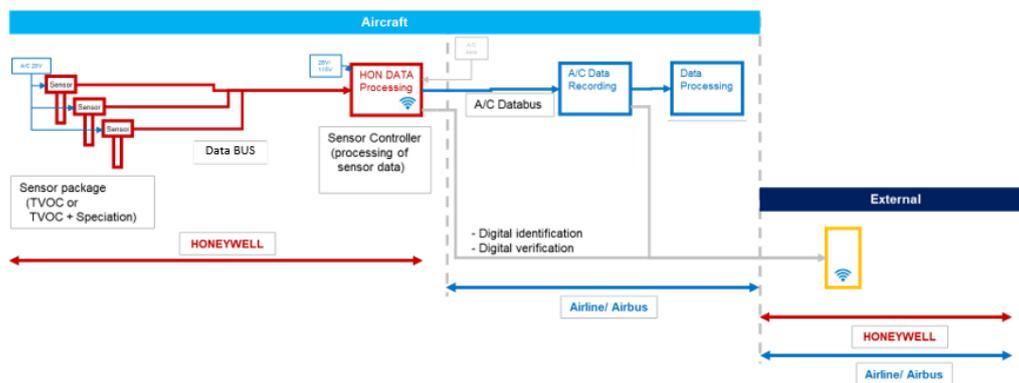


Abbildung 31: Prinzipielles Diagramm vom Sensorsystem

Die Entwicklung des Sensor-Designs und -Systems werden unter dem Projekt UK ATI ECLAIR sowie dem europäischen Projekt CAJU Clean Aviation TheMa4HERA weitergeführt.

2.1.1.4 AP2.1.4 – Optimierung des Sensorkonzeptes

Die Optimierung des Sensorkonzeptes zur permanenten Überwachung Luftqualität im Zapfluftpfad während aller Flugphasen des Flugzeuges war ein wesentlicher Bestandteil der in PasKaL durchgeführten Entwicklung. Alle Entwicklungsschritte sind in enger Zusammenarbeit mit dem Verbundpartner Airbus koordiniert worden. Aufgrund der engen Kooperation sind Anforderungen von Airbus als Systemintegrator auf Flugzeugebene definiert/ angepasst und in die Entwicklung mit aufgenommen worden.

Beispiele für die Optimierung sind die vereinbarte Architektur mit einem Sensor in jedem Zapfluftpfad, die Installationsposition im Flugzeug sowie die Aufnahme des FBAR Sensors, um die von Airbus geforderte Speziierung von einzelnen Komponenten zu berücksichtigen.

2.1.2 AP2.2 Komponenten zum Abbau von Kontaminanten

Das AP2.2 wurde in die folgenden Unterarbeitspakete aufgeschlüsselt:

- AP2.2.1 – Katalysator
- AP2.2.2 – Filter

Im Arbeitspaket wurden Technologien zum Filtern der Luft von dem Eintragungsort in den Zapfluftpfad bis zur Kabine untersucht.

In Zusammenarbeit mit dem Verbundpartner Airbus wurden wie in Abbildung 32 dargestellt fünf mögliche Optionen für die Integration von Komponenten zur Reduzierung von Kontaminationen im Zapfluftpfad bis zur Kabine ermittelt. Kontaminationen, die über die Triebwerke bzw. die APU mit der Luft in den Zapfluft gelangen sowie durch interne Fehler, sollten mit diesen Optionen soweit reduziert werden, dass Kontaminationen kein Unwohlbefinden in der Kabine auslösen.

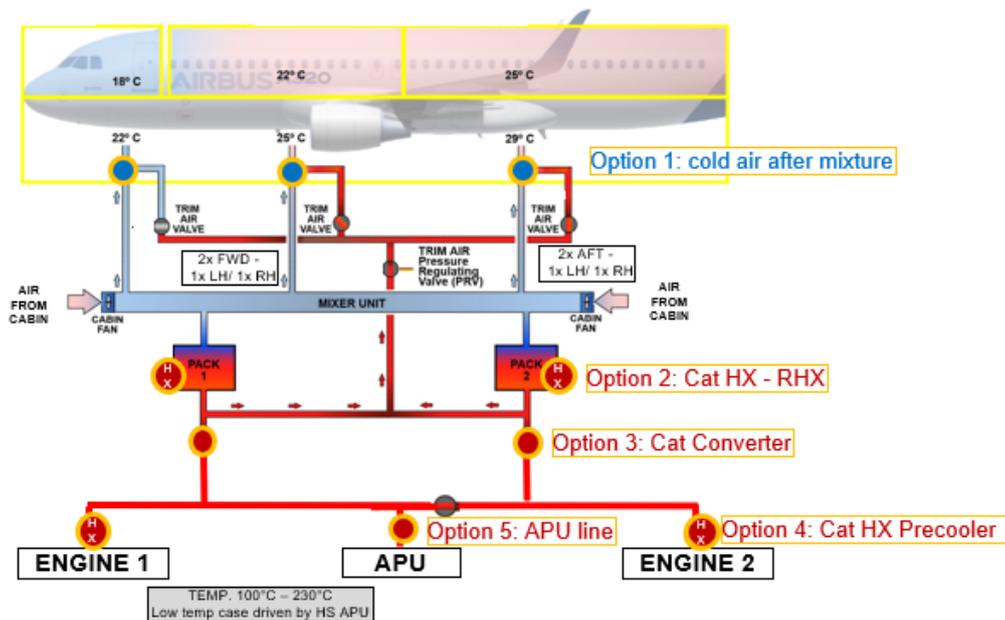


Abbildung 32: Mögliche Integrationsorte zum Filtern

Die in Abbildung 32 aufgeführten Optionen lassen sich wie folgt unterscheiden:

- Option 1 – Installation zwischen Mixer - Kabine
 - Installation einer Filtertechnologie nach dem Mixer im Flugzeug, der die teilweise zurückgeführte Kabinenluft und die in der Klimaanlage aufbereitete Zapfluft vermengt.
 - Vorteile
 - Mögliche Reduzierung von Kontaminationen von der Kabine und der von der Klimaanlage aufbereiteten Zapfluft sowie der unbehandelten Zapfluft für die Temperatursteuerung (Trim Air)
 - Nachteile:
 - Hohe Luftströme und sehr niedriger Druckverlust über die Komponente gefordert
 - Einschränkungen im Bauraum
- Option 2 - Beschichtungen des Wärmetauschers der Klimaanlage (Pack HX) mit einer Katalysatorbeschichtung
 - Vorteil
 - Integration zweier vorhandener Technologien mit einer potenziellen Gewichtseinsparung, wenn ein unabhängiger Konverter entfällt
 - Mögliche Verringerung des Druckluftverlustes im Zapfluftpfad, wenn ein unabhängiger Konverter entfällt
 - Nachteil:
 - Trim Air für die Temperatursteuerung wird vor dem Wärmetauscher entnommen und wäre ungefiltert

- Option 3 – Unabhängiger Konverter mit Katalysatorbeschichtung
 - Vorteil:
 - Ersatz für einen bereits vorhandenen Ozonkonverter
 - Reduzierung von möglichen Kontaminationen von allen Eintragungsorten (Triebwerke/ APU) im Zapfluftpfad

- Option 4 - Wärmetauscher vom Vorkühler im Triebwerk (Pre-Cooler) mit einer Katalysatorbeschichtung
 - Vorteil:
 - Integration zweier vorhandener Technologien mit einer potenziellen Gewichtseinsparung, wenn ein unabhängiger Konverter entfällt
 - Mögliche Verringerung des Druckluftverlustes im Zapfluftpfad, wenn ein unabhängiger Konverter entfällt
 - Hohe Temperaturen am Eingang vom Wärmetauscher optimieren die Effizienz zur Reduzierung von Kontaminationen
 - Nachteil:
 - Nur die Luft von den Triebwerken wird gefiltert. Während des Betriebes am Boden mit der APU ist die Luft in diesem Pfad ungefiltert.

- Option 5 – Konverter im Zapfluftpfad der APU
 - Vorteil:
 - Reduzierung von Kontaminationen, die über die APU (intern/ extern) in den Zapfluftpfad gelangen
 - Die Eintragung über die APU könnte mit einer neuen Komponente reduziert werden
 - Nachteil:
 - Die Luft von den Triebwerken ist ungefiltert
 - Sehr niedriger Druckverlust über die Komponente gefordert

Für eine Auswahl der geeigneten Filtertechnologie sind neben der möglichen Integrationsposition im System auch chemische Komponenten von Bedeutung, die reduziert werden sollen. Airbus hat die in Abbildung 33 aufgeführten Komponenten bestimmt (AP1.2), die kritisch für die Filterung im Frischluftpfad sind.

Contaminants	Source
Toluene	Engine Exhaust, Engine oil, fuel, airport air
Propene (propylene or methyl ethylene)	Engine exhaust
Acetaldehyde	Engine Exhaust, Engine oil, hydraulic fluid
Pentanoic acid (Valeric acid)	Degraded oil
Heptane	Kerosene (n-heptane may used only; 2-methyl hexane)
UFP = PM0.1 (0.001 - 0.1 µm)	Exhaust, Airport air, Engine oil thermal decomposition
PM 2.5, PM10 starting with 0.3 µm	Engine oil mechanical shearing
1,2 Propylene Glycol (propane-1,2-diol)	De-Icing
Ozone - O3	high altitude flight
Tributyl Phosphate (TBP)	Hydraulic Fluid
Siloxanes	Cabin/Recirc

Abbildung 33: Kritische Kontaminationen im Zapfluftpfad für Filtertechnologie

2.1.2.1 Auswahl der Filtertechnologie

Für die Auswahl von geeigneten Filtertechnologien hat Honeywell die vorgeschlagenen Integrationspositionen auf Systemebene bewertet und verschiedene Technologien für die Einsatzmöglichkeit betrachtet. Wie in Abbildung 34 dargestellt, wurde bewertet, wie gut die Filter die von Airbus bestimmten Komponenten (Abbildung 33) reduzieren und welche technischen Vor- und Nachteile die Technologien haben.

		D = to be demonstrated					Technical		
	Fresh Air Path	Option	UFP	Particles	VOC	Acetaldehyde	O3	Pro	Con
Cold Air Path	Mix -> Cabin	HEPA	Y	Y	N	N	N	- Proven technology - Good performance for particles and UFP	- Pressure Drop - no VOC removal
	Mix -> Cabin	HEPA Carbon	Y	Y	Y	N	N	- Proven technology - Good performance for UFP and VOC removal	- Pressure Drop - Weight - Operation hours/ Maintenance Intervall
	Mix -> Cabin	PCO	D	D	Y	Y	Y	- VOC removal - Scalable efficiency	- Restricted particle removal - Power consumption - weight
	Mix -> Cabin	Electrostatic Particle Separator (ESPS)	D	Y	N	N	N	- Particle removal	- New technology development for aerospace - schedule - Power consumption - no VOC removal - ozone as major by product
BLEED Air Path	Bleed	Aerosol Trap	D	Y	N	N	N	- High removal performance for aerosol	- Weight - Operation hours/ Maintenance intervall
	Bleed	Electrostatic Particle Separator (ESPS)	D	Y	N	N	N	- Particle removal - low pressure drop	- New technology development for aerospace - schedule - maintenance intervall - Power consumption - no VOC removal - ozone as major by product
	Bleed	CHOC	D	Y	Y	Y	Y	- Proven technology - High removal efficiency for VOCs and liquid particles/ UFP - Contaminants prevention for all bleed air sources/ lines	- removal efficiency of solid particles to be demonstrated
	Bleed	CHOC APU bleed line	D	Y	Y	Y	Y	- Proven technology - High removal efficiency for VOCs and liquid particles/ UFP	- No option with existing CHOC installation position - Potential option in combination with CAT Precooler
	Bleed	CAT-HX Precooler	D	Y	Y	Y	Y	- Weight - Stable operational conditions for high performance - proven technology	- Regular maintenance intervall required not in line with PHX maintenance requirement - installation and re-installation - removal efficiency of solid particles to be demonstrated - APU bleed line not covered
	Bleed	CAT-HX Pack HX	D	Y	Y	Y	Y	- Weight - Maintenance intervall in line with HX requirements - proven technology	- Performance for A320 HX to be reviewed - removal efficiency of solid particles to be demonstrated - Impact for Fuel Tank Inerting System (FTIS) to be reviewed if any - Trim Air unprotected

Abbildung 34: Übersicht von bewerteten Filtertechnologien (Grün hervorgehobenen Optionen wurden näher untersucht)

Zusammenfassung der Auswahl:

Von den in Abbildung 34 bewerteten Technologien wurden vier für eine weitere technische Untersuchung ausgewählt:

- PCO – Photokatalytische Oxidation
 - PCO ist eine aktive Filtertechnologie, bei der über eine UV-Licht getriebene katalytische Oxidation VOCs in Kohlendioxid und Wasser umgewandelt werden.
 - PCO kann kritische VOCs, Ozon sowie Bakterien and Viren reduzieren. Die Reduzierung von Partikeln ist nicht nachgewiesen.
 - Die Effektivität zum Reduzieren von Kontaminationen kann entsprechend den Anforderungen angepasst werden.
 - Ein niedriger Druckverlust über die Komponente.
 - PCO kann nicht mit Schadstoffen überladen und zu einer sekundären Quelle werden.
 - Eine elektrische Schnittstelle zum Flugzeug ist gefordert und erhöht den Integrationsaufwand.
 - Das Gewicht der Filter für die geforderte Anwendung ist zu prüfen.

- Aerosol Trap (in Kombination mit CHOC)
 - Reduzierung von Aerosol (z. B. Enteisierung, Hydraulikflüssigkeit, Öl, Kerosin) im Fehlerfall oder durch Eintragung von außen durch einen Filtermedium, das den hohen Zapflufttemperaturen widerstehen kann.
Der Aerosol Trap wurde ausgewählt, um diesen mit einem Konverter zum kombinierten Abbau von VOCs und Ozon (CHOC) zu kombinieren, um im Fehlerfall die Menge an Aerosol am CHOC zu reduzieren und somit die Performance zu verbessern.
 - Der Aerosol Trap hat eine gute Effektivität, um Aerosole im Zapfluftpfad zu reduzieren.
 - Für ultrafeine Partikel (PM0.1) ist der Nachweis zu erbringen.
 - Wartbarkeit und ein mögliches zusätzliches Gewicht sind im Rahmen der Entwicklung zu bestimmen.

- CHOC (in Kombination mit Aerosol Trap)
 - CHOC (Combined Hydrocarbon and Ozone Converter) ist eine Technologie, bei der durch Wärme über eine katalytische Oxidation VOCs in Kohlendioxid und Wasser umgewandelt werden und Ozon abgebaut wird. Es ist eine in verschiedenen Flugzeugprogrammen etablierte Technologie, um die Zapfluft zu verbessern. Bei dem Oxidationsprozess zum Abbau von Öl entstehen Nebenprodukte. In Kombination mit einem Aerosol Trap wird angenommen, dass eine Verringerung dieser Nebenprodukte möglich ist.
 - Hohe Abbaurate von Ozon und VOCs im Zapfluftpfad.
 - Sehr gute Effektivität zum Abbau von ultrafeinen flüssigen Partikeln, aber für feste Partikel muss die Effektivität noch bestätigt werden.

- Wärmetauscher der Klimaanlage mit katalytischer Beschichtung (CAT PACK-HX)
 - Ein beschichteter Wärmetauscher hat ähnliche Eigenschaften wie ein unabhängiger Konverter zum kombinierten Abbau von VOCs und Ozon. Die Kühlrippen für den heißen Luftpfad werden mit einem Katalysator zum Abbau von VOCs und Ozon beschichtet.
 - Mit einem beschichteten Wärmetauscher könnte ein unabhängiger Konverter entfallen und somit Gewicht sowie Druckverlust einsparen.
 - Der Pack-HX hat ein regelmäßiges Wartungsintervall, dass dem Wartungsintervall für einen Konverter entspricht, um die katalytische Beschichtung zu reinigen.
 - Die Zapfluft zum Regeln der Lufttemperatur wird vor dem Wärmetauscher abgeführt und wäre ungefiltert. Bei einer hohen Effizienz eines beschichteten Pack HX wäre die ungefilterte Luft für Temperaturregelung vernachlässigbar, weil weniger als 5 % der Zapfluft für die Regelung abgeführt werden.
 - Die Verfügbare zu beschichtende Fläche sowie die mittlere Temperatur über den Wärmetauscher sind entscheidend für die Effizienz zum Abbau von VOCs.

Es wurden fünf weitere Technologien als Option für das Filtern von Kontaminationen im Pfad zwischen dem Mixer und der Kabine sowie dem Zapfluftpfad betrachtet, aber aus folgenden Gründen nicht weiter berücksichtigt:

- Schwebstofffilter - HEPA/ HEPA + Aktivkohle
 - HEPA Filter haben eine sehr hohe Effektivität zum Abbau von Partikeln und ultrafeinen Partikeln und mit einem integrierten Kohlefaserfilter auch gute Eigenschaften zum Abbau von VOCs.
 - HEPA/ HEPA Carbon Filter haben einen hohen Druckverlust, der über die Lebenszeit der Filter zunimmt. Für eine Anwendung zwischen dem Mixer und der Kabine sind diese Filter aufgrund des hohen Druckverlustes nicht geeignet.

- Elektrostatische Partikel-Separator - Electrostatic Particle Separator (ESPS)
 - Beim ESPS werden Partikel mit Hochspannung aufgeladen und werden dann in einer entgegengesetzt geladenen Kammer von der Luft absorbiert.
 - Mit dem ESPS ist die Reduzierung von Partikeln möglich, jedoch ist eine Filterung von ultrafeinen Partikeln nicht nachgewiesen.
 - Ein Abbau von VOCs und Ozon ist nicht gegeben.
 - ESPS erzeugen als Nebenprodukt Ozon, dessen Abbau wieder gewährleistet werden muss.

- APU CHOC
 - Ein Konverter in der Zapfluftpfad der APU hätte vergleichbare Eigenschaften wie der oben beschriebene CHOC zum Abbau von Kontaminationen.
 - Auf der Systemebene für die Zapfluft ist eine Integration eines CHOC im APU Pfad nicht sinnvoll, weil mit Konzept die Zapfluftpfade der Triebwerke ungeschützt bleiben und mögliche Kontaminationen auf diesen Pfaden ungefiltert bleiben.
 - Die Anforderungen für einen maximal erlaubten Druckverlust über die Komponente im APU Zapfluftpfad können nicht erfüllt werden.
 - Eine Integration einer Filterkomponente im APU Zapfluftpfad in Kombination mit dem Ozonkonverter vor der Klimaanlage des Flugzeuges zum Abbau von Ozon im Flug ist aufgrund der maximal erlaubten Druckverluste über die Komponenten im Zapfluftsystem nicht erfüllbar.

- Beschichteter Wärmetauscher vom Vorkühler im Triebwerk (Pre-Cooler)
 - Ein beschichteter Wärmetauscher hat ähnliche Eigenschaften wie ein unabhängiger Konverter zum kombinierten Abbau von VOCs und Ozon. Die Kühlrippen für den heißen Luftpfad werden mit einem Katalysator zum Abbau von VOCs und Ozon beschichtet. Aufgrund der höheren Eingangstemperatur am Wärmetauscher wäre eine höhere Effizienz zum Abbau von Kontaminationen und Ozon gegeben.
 - Pre-Cooler haben über die Lebenszeit kein geplantes Wartungsintervall. Die Katalysatorbeschichtung muss regelmäßig gewartet werden.
 - Der APU Zapfluftpfad wäre bei dieser Applikation ungeschützt und beim kritischen Betrieb des Flugzeuges am Boden mit der APU könnten Kontaminationen über diesen Weg in die Kabine gelangen.

2.1.2.2 AP2.2.1 – Katalysator

2.1.2.2.1 Aerosol Trap

Der Aerosol Trap wurde ausgewählt, um die Verbesserung der Effizienz von einem Konverter (CHOC) zum Kombinierten Abbau von Kohlenwasserstoffen (VOCs) und Ozon (CHOC) im Falle einer Kontamination mit Öl zu evaluieren. Hierfür soll der Aerosol Trap im Falle eines Fehlerfalles die Belastung von Schwebstoffen verringern.

Ein unabhängiger Aerosol Trap im Zapflutpfad wurde in den System- und Installationsstudien mit Airbus als nicht umsetzbar bewertet. Als Anwendung wurde eine Integration des Aerosol Trap in den Einlass von einem Konverter untersucht, der vor dem Pack installiert ist (Abbildung 35).

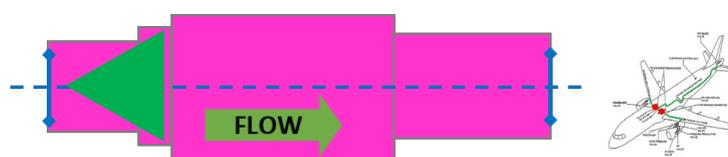


Abbildung 35: Verfügbarer Bauraum für einen Konverter mit Aerosol Trap im Einlass

Kritisch für die Umsetzung ist der maximal erlaubte Druckverlust über den kombinierten Konverter + Aerosol Trap. Die Vorgabe von Airbus war ein maximaler Druckverlust von 1 psig (68,9 mbar) über die Komponente. In Kombination mit dem Konverter war für den Aerosol Trap ein maximaler Druckverlust von 0,2 psig die Grenze.

2.1.2.2.1.1 Aerosol Trap – Auswahl Filtermaterial

Honeywell hat eine Analyse von vorhandenen Materialien durchgeführt und sechs verschiedene hitzebeständige Filtermaterialien (Para-Aramid, PTFE, Meta-Aramid) mit unterschiedlicher Permeabilität ausgewählt, um diese auf ihre Eignung zu testen. Zur Auswahl eines geeigneten Filtermaterials wurden zwei Testkampagnen mit Komponentenevaluatoren durchgeführt.

Im ersten Schritt sind die Materialien mit trockener Luft durchströmt worden, um den Druckabfall über das Material zu prüfen. Material mit einem niedrigen Druckabfall wurde ausgewählt, um in einem weiteren Test mit Öl das Material mit der besten Eigenschaft zum Abbau von Aerosol bei einem niedrigen Druckabfall über das Filtermaterial auszuwählen.

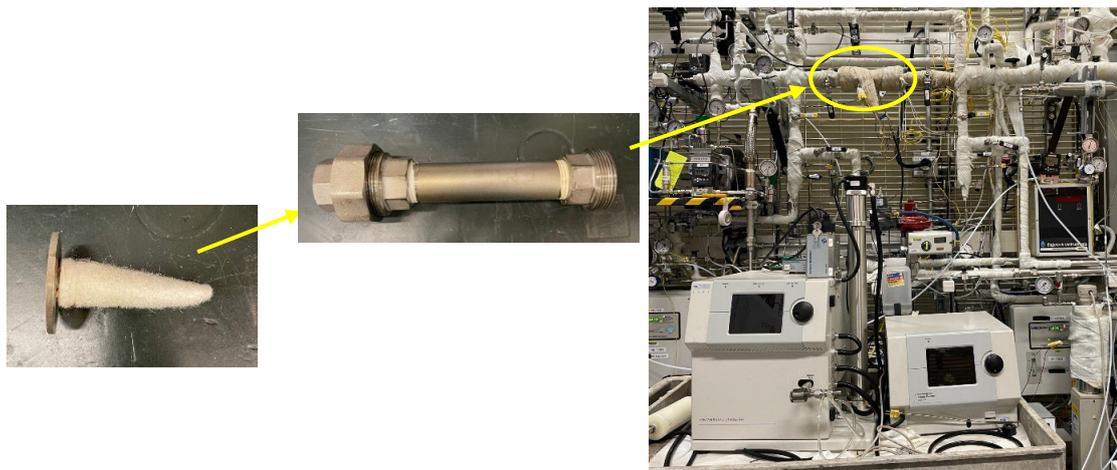


Abbildung 36: Aerosol Trap - Testaufbau mit Testevaluatoren

Aerosol Test – Trockene Luft

Getestet wurden sechs Filtermaterialien. Vier auf Basis von PTFE mit unterschiedlicher Diffusionsfähigkeit sowie jeweils ein Filtermaterial aus Para-aramid und Meta-aramid. Die Tests wurden unter simulierten Zapflufbetriebsbedingungen, die Airbus vorgab, durchgeführt. Zum Testen wurde ein typischer Betriebspunkt der Zapfluft für den Airbus A320 gewählt.

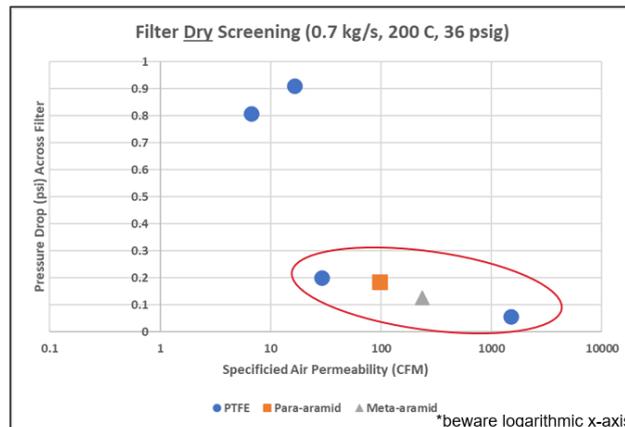


Abbildung 37: Aerosol Trap Testergebnis – Druckverlust bei trockener Luft

Von den sechs getesteten Filtermaterialien wurden vier Filtermaterialien mit einem Druckverlust unter 0,2 psig getestet. Diese erfüllen bei trockener Luft die minimalen Anforderungen für den maximalen Druckverlust und sind im nächsten Schritt getestet worden.

Aerosol Test – Öl

Der Test mit Öl ist mit vier Filtermaterialien durchgeführt worden, die bei trockener Luft einen Druckverlust kleiner 0,2 psig aufwiesen. Wie bei dem Test mit trockener Luft wurde für den Test ein typischer Airbus A320 Zapfluftbetriebspunkt gewählt.

Für den Öl-Test wurde eine Partikelverteilung gewählt, die einer typischen Verteilung bei einer Kontamination im Flugzeug entspricht, mit einer Gaußschen Normalverteilung für UFP bei ~50nm (Abbildung 38).

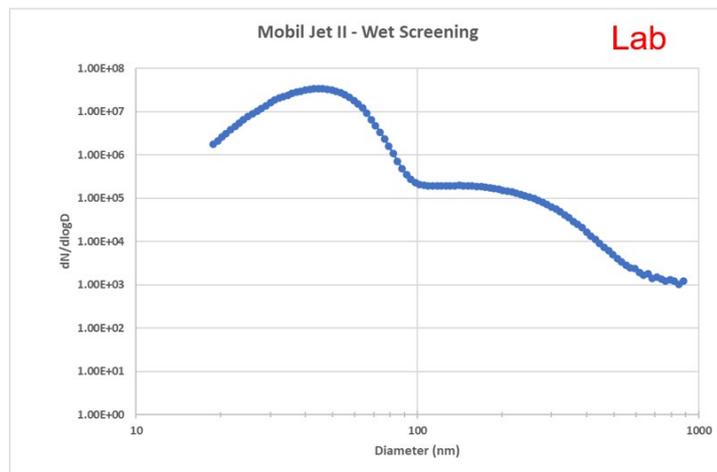


Abbildung 38: Aerosol Trap - Partikelverteilung Öl

Für eine Beurteilung der Eignung des Filtermaterials wurden der Druckverlust sowie die Effizienz zum Abbau von Partikeln ausgewertet.

Die in Abbildung 39 aufgeführten Ergebnisse zeigen, dass Para-Aramid und der PTFE mit der hohen Durchlässigkeit (niedriger Permeabilitätswert) einen niedrigen Druckverlust aufweisen, jedoch eine ungenügende Effizienz zur Verringerung von Partikeln. Der PTFE mit der niedrigen Durchlässigkeit (hoher Permeabilitätswert) weist eine bessere Abbaurrate auf, jedoch ist der Druckverlust für eine Applikation mit einem kombinierten Konverter & Aerosol Trap zu hoch.

Die Ergebnisse von Meta-Aramid als Filtermaterial zeigen einen guten Kompromiss zwischen Druckverlust und Effektivität zum Abbau von Partikeln. Größere Partikel (> 100nm) werden besser reduziert als Ultrafeine-Partikel (PM_{0.1}) mit einer Größe < 100nm.

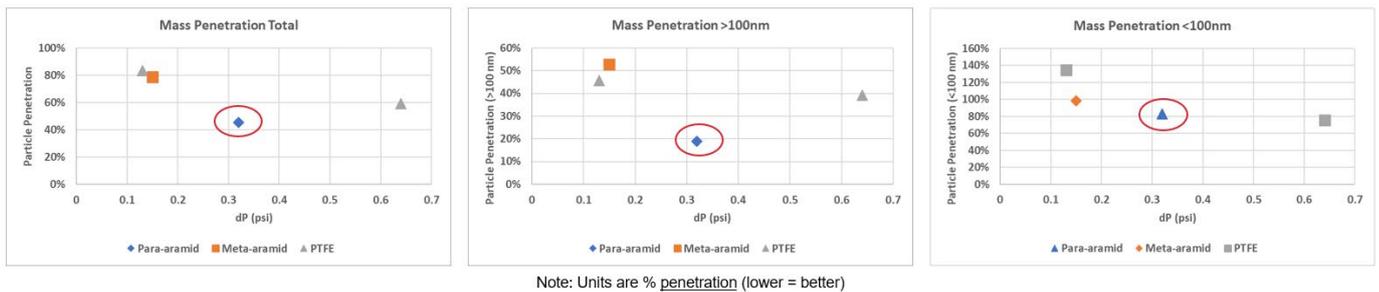


Abbildung 39: Aerosol Trap – Testergebnisse mit Öl

2.1.2.2.1.2 Aerosol Trap + CHOC Performance

Die Zielsetzung der Kombination des Aerosol mit einem CHOC war, die Menge der Nebenprodukte, die während des Abbaus von Öl auftritt, zu minimieren. Um diese Reduzierung zu erreichen, sollte der AT vor dem CHOC installiert werden, um die Menge an Öl, die auf den CHOC trifft, zu verringern.

Für eine Vergleichbarkeit der Effizienz eines reinen CHOC sowie der Kombination von Aerosol Trap und CHOC wurden Tests mit skalierten Komponenten für die beiden Konfigurationen gewählt. Während der Testdurchführung wurden die Nebenprodukte mit einem Spektrumanalysator gemessen, die nach dem Abbau des Öls am Ausgang des Konverters auftreten.

Der Test wurde mit folgenden Konfigurationen durchgeführt:

- a) CHOC
 - Vergleichbare Konfiguration eines Single Aisle CHOC
- b) CHOC + Aerosol Trap
 - CHOC + einfacher Schicht Filtermaterial
- c) CHOC + Aerosol Tap 2
 - CHOC + zweifache Schicht Filtermaterial
 - Diese Konfiguration wurde gewählt, um zu ermitteln, welchen Einfluss eine Zunahme des Filtermaterials auf die Performance hat
- d) CHOC + Simulierter 80 % Filter
 - Die Testergebnisse des ausgewählten Filtermaterial haben gezeigt, dass ca. 80 % weniger Öl auf den Konverter treffen.
 - Bei diesem Test wurde die Ölmenge, die der CHOC erreicht um 80 % reduziert, um die ermittelte Performance vom AT zu simulieren und die Ergebnisse zu bestätigen.

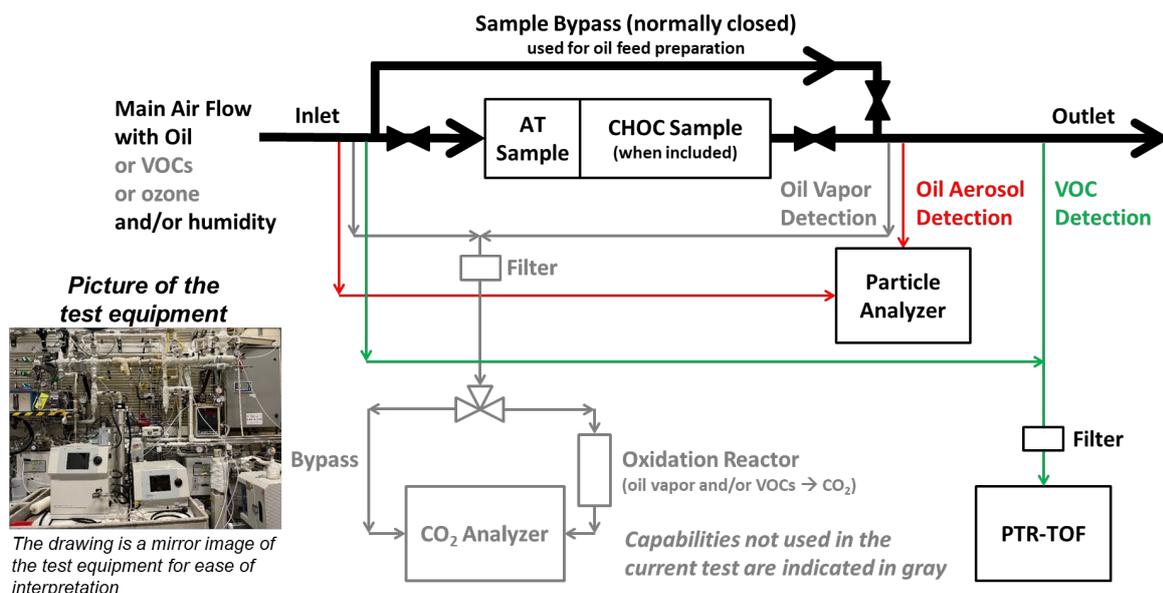


Abbildung 40: Testaufbau CHOC, CHOC & AT

Als Testkondition wurde eine typische Bedingung während des Betriebes des Flugzeuges am Boden ausgewählt, weil beim Betrieb am Boden die höchste Wahrscheinlichkeit für eine Kontamination besteht.

Folgend ein Vergleich der vier Testkonfigurationen:

- Die Ergebnisse zeigen, dass der Aerosol Trap keine Nebenprodukte während der Filterung von Öl erzeugt.
- Ein Aerosol Trap + CHOC weist eine leichte Reduzierung der Nebenprodukte, die während des Abbaus des Triebwerköls über den reinen CHOC entstehen, auf.
- Aerosol Trap + CHOC hat vergleichbare Ergebnisse mit dem simulieren Aerosol Trap + CHOC und bestätigt die Reduzierung der Ölmenge durch den Aerosol Tap.
- Eine doppelte Lage Filtermaterial beim Aerosol Tap + CHOC zeigt keine wesentlichen Verbesserung im Vergleich zum AT mit einlagigem Filtermaterial + CHOC.

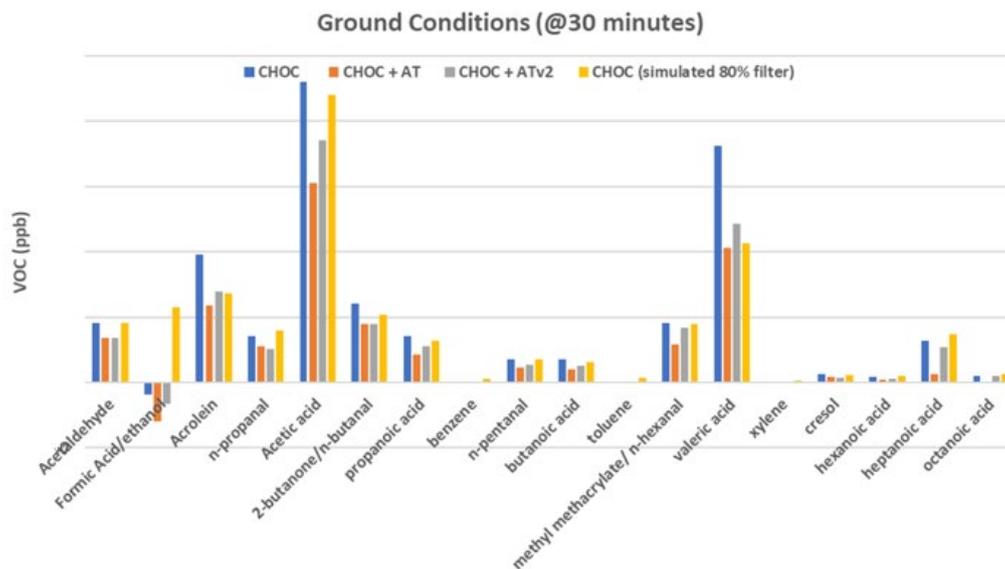


Abbildung 41: Vergleich Performance CHOC, AT, CHOC & AT

Die Analyse der Ergebnisse zeigt, dass CHOC + AT bei einer Kontamination mit Öl dieses abbauen, ohne weitere Nebenprodukte zu erzeugen. Die Bildung von Nebenprodukten vom CHOC reduziert sich mit der Abnahme der Ölkonzentration/ -menge, die den CHOC erreicht, jedoch nicht im gleichen Verhältnis, wie die Ölmenge abnimmt. Die Summe der Nebenprodukte verringert sich beim CHOC + AT um ~38 % (Valeriansäure ~43 %), im Vergleich zum CHOC ohne AT, obwohl der AT die Ölmenge um ~80 % reduziert. Der Aerosol Trap reduziert die Ölmenge zum CHOC, aber verändert die Partikelgröße, die einen Einfluss auf die Summe der erzeugten Nebenprodukte bei der Ölumwandlung beim CHOC haben kann. Größere Ölpartikel werden in kleinere Partikel zersetzt und vom Aerosol Trap aufgenommene kleine Partikel werden in größere Partikel zusammengeführt.

2.1.2.2.1.3 Zusammenfassung Aerosol Trap + CHOC

Die Einbaustudien, die mit dem Verbundpartner Airbus durchgeführt wurden, haben nur einen sehr beschränkten Bauraum für den Aerosol Trap im Einlass vom CHOC zugelassen.

Der erlaubte Druckverlust über den Aerosol Trap war mit <0,2 psid eingeschränkt und hat die Auswahl des Filtermaterials wesentlich beeinflusst.

Der Aerosol Trap ist eine valide Technologie zum Reduzieren von Triebwerksöl im Zapfluftsystem im Fall eines Kontaminationsevents, und ein AT am Eingang vom CHOC kann die Nebenprodukte am Ausgang vom CHOC reduzieren.

Der ausgewiesene Bauraum für den Aerosol Trap limitiert die Performance und kann die strikten maximalen Druckverluste nicht einhalten. Insbesondere bei den Betriebsbedingungen in Reishöhe wird der zulässige Druckverlust über den Aerosol Trap wesentlich überschritten (> 0,3 psi).

Ein Konverter mit CHOC Technologie reduziert die wesentliche Menge an VOC Kontaminationen, aber geringe Konzentrationen von Nebenprodukten durch die Oxidation sind weiterhin nicht auszuschließen. Die Reduzierung der Nebenprodukte (~38 %) vom AT+CHOC ist nicht proportional zur Reduzierung von Öl (~80 %) durch den Aerosol Trap. Der Oxidationsprozess im CHOC ist wesentlich für die Summe der Nebenprodukte verantwortlich.

Aufgrund der Erkenntnis, dass der Oxidationsprozess entscheidend für die Summe der Nebenprodukte ist und die Limitierungen für den Aerosol Trap, sieht Honeywell eine höhere Wahrscheinlichkeit, mit der Verbesserung der Rezeptur der Beschichtung vom CHOC die Bildung von Nebenprodukten zu reduzieren.

Aufgrund der Ergebnisse der Aerosol Trap Testkampagne sieht Honeywell den Aerosol Trap nicht als die geeignete Lösung an, um die gewünschte Reduzierung von Nebenprodukten bei der erforderlichen Performance zu erreichen. Die Untersuchungen zum Aerosol Trap werden nicht weitergeführt.

2.1.2.2.2 AP2.2.1 – Ölersetzungstests

Honeywell hat im Zuge von PasKaL Zersetzungstests für Öl durchgeführt. Die Studie wurde vorgenommen, um Flüchtige organische Verbindungen (VOCs) zu identifizieren, die durch Triebwerksöl auf dem Weg von der Zapfluftquelle (Triebwerk, APU) bis zur Klimaanlage (Pack) entstehen. Aerosole von Triebwerksölen, die über die Triebwerke/ APU in das Zapfluftsystem gelangen, sind Temperaturen von bis zu 260°C ausgesetzt und können an metallischen Oberflächen, wie Verrohrung und Wärmetauscher (HX), oxidieren.

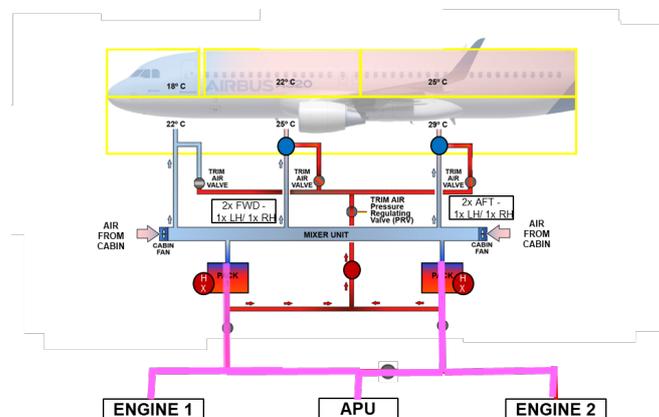


Abbildung 42: Zapfluftsystem im Fokus der Untersuchung (pink hervorgehoben)

Die Tests wurden aufgesetzt, um den Einfluss von Triebwerksölen, der Temperatur und metallischen Oberflächen auf die Zersetzung zu ermitteln.

2.1.2.2.2.1 Testdefinition Ölzerstestests

Es wurden zwei Triebwerksöle, die in der kommerziellen Luftfahrt Standard sind, zwei typische Temperaturen in der Zapfluft und zwei typische metallische Oberflächen im Zapfluftsystem ausgewählt. Folgend eine Aufstellung der zuvor aufgeführten Faktoren und der Testmatrix:

- Oil types
 - Mobil Jet II
 - Eastman 2389
- Surfaces
 - Aluminum mesh (HX)
 - Titanium wire (ducting)
 - Quartz wool (as control)
- Air conditions
 - flight: dry, 220 C
 - ground: humid, 165 C

Run	Wool Type	Oil	Temp	Humidity	Purpose
1	None	None	165 C	Yes	Background
2	None	None	165 C	Yes	Background
3	Quartz	Mobil II	165 C	Yes	System check w/ oil
4	Quartz	Mobil II	165C	Yes	Flow-rate impact
5	Aluminum	Mobil II	165C	Yes	First catalyzation check
6	Quartz	Mobil II	165 C	Yes	Determine experiment drift
7	Aluminum	Mobil II	165 C	Yes	Replicate
8	Aluminum	Eastman	165 C	Yes	Different Oil
9	Quartz	Eastman	165 C	Yes	DOE
10	Titanium	Eastman	220 C	No	DOE
11	Aluminum	Eastman	220 C	No	DOE
12	Quartz	Mobil II	220 C	No	DOE
13	Quartz	Eastman	220 C	No	DOE
14	Aluminum	Mobil II	220 C	No	DOE
15	Titanium	Mobil II	220 C	No	DOE
16	Titanium	Mobil II	165 C	Yes	DOE
17	Titanium	Eastman	165 C	Yes	DOE
18	Aluminum	Mobil II	220 C	No	Base treated Al
19	Aluminum	Mobil II	220 C	No	Acid treated Al

Abbildung 43: Testmatrix – Zerstestests Triebwerksöle

Für jeden Test wurden die zu testende Oberflächen mit dem ausgewählten Triebwerksöl benetzt und mit sauberer Luft durchströmt, die auf die ausgewählte Temperatur erhitzt war. Die Zerstestung des Öls wurde mit einem Massenspektrometer (SIFT-MS) aufgezeichnet.

Weiter wurden zwei Tests mit aufgenommen, in denen die Aluminium-Oberfläche vorbehandelt wurde. Bei einem Testzenario wurde das Aluminium mit einer Säure vorbehandelt und in einem weiteren Testzenario eine basische Vorbehandlung vorgenommen. Es sollte ermittelt werden, ob eine Vorbehandlung von Aluminium eine mögliche Bildung von VOCs vorbeugen kann.

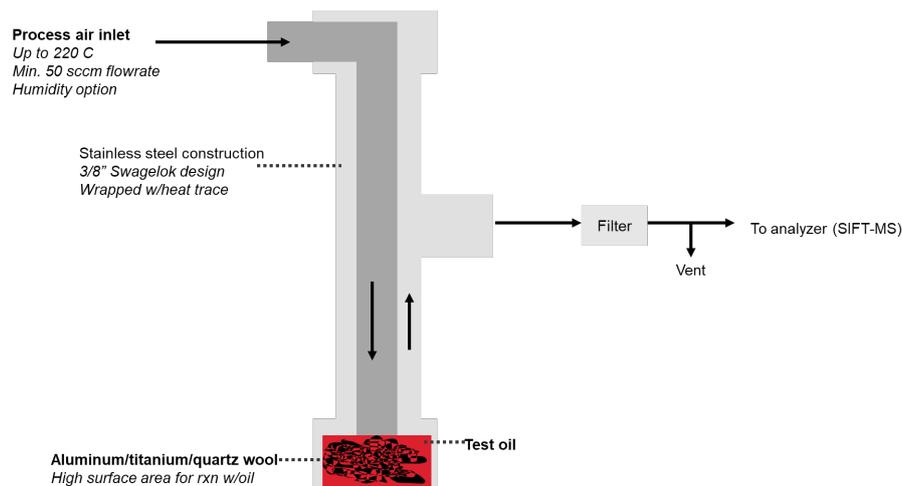


Abbildung 44: Testsetup – Zerstestests Triebwerksöle

Eine Regressionsanalyse wurde angewendet, um Effekte zwischen dem Faktor und den spezifischen VOCs zu identifizieren. Die Effekte wurden wie folgt charakterisiert:

- Signifikante Effekte mit dem p-Wert < 0,05
 - **Roter** Rahmen um die Testergebnisse
- Potentiell signifikante Effekte mit dem p-Wert = 0,05 – 0,20
 - **Gelber** Rahmen um die Testergebnisse
- Nicht signifikante Effekte mit dem p-Wert > 0,20
 - Sind nicht in den folgenden Testergebnissen aufgeführt

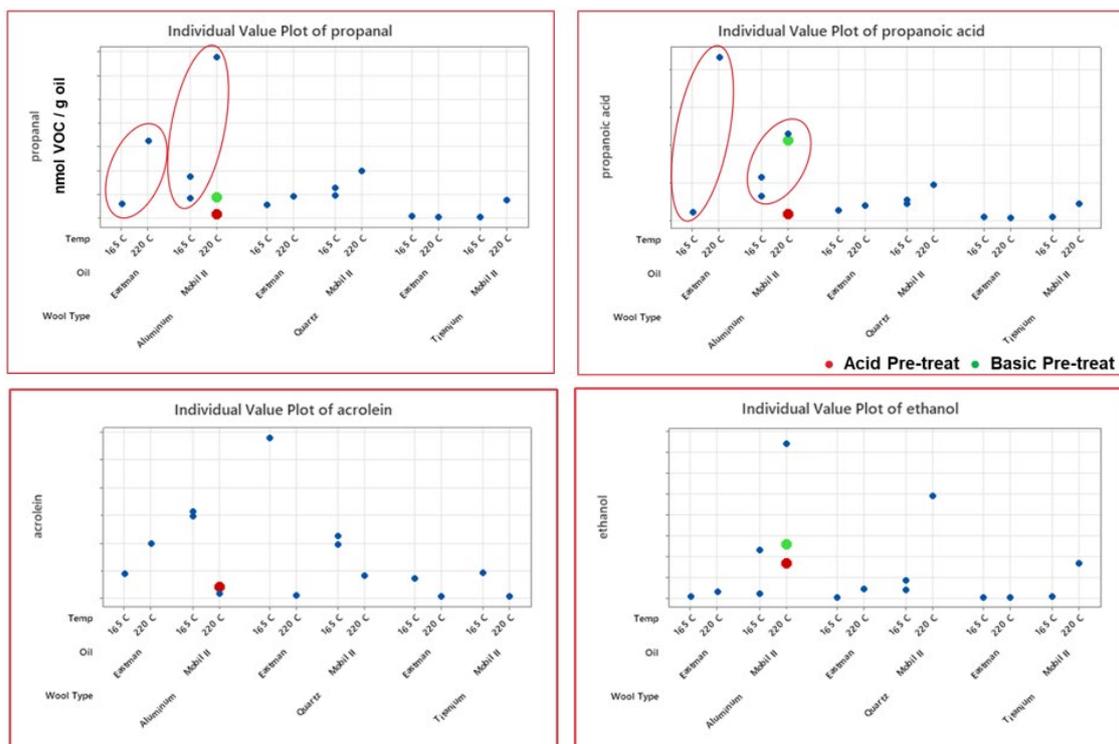
2.1.2.2.2.2 Testergebnisse Ölzersetzungstests

Die folgenden Ergebnisse zeigen, dass Aluminium eine hohe Reaktionsfähigkeit zur Bildung von VOCs mit den getesteten Triebwerksölen hat, die mit steigender Temperatur (Faktor 2 – 10 je nach Komponente) zunimmt. Im Gegensatz zu Aluminium hat Titanium eine sehr niedrige Interaktion mit den getesteten Triebwerksölen zur Bildung von VOCs und hat vergleichbare Werte zum Referenzmedium Quarzwolle.

Die getesteten Öle Mobil Jet II und Eastman 2389 haben ein vergleichbares Verhalten zur Bildung von VOCs, wenn sie mit den ausgewählten Oberflächen reagieren.

Die Vorbehandlung von Aluminium (Acid or Basic Pre-Treatment) reduziert die Reaktionsfähigkeit mit dem Triebwerksöl und bildet somit weniger VOCs. Die Vorbehandlung mit Säure ist durchschnittlich effektiver als eine basische Behandlung.

- **Acid Pre-treat**
- **Basic Pre-treat**



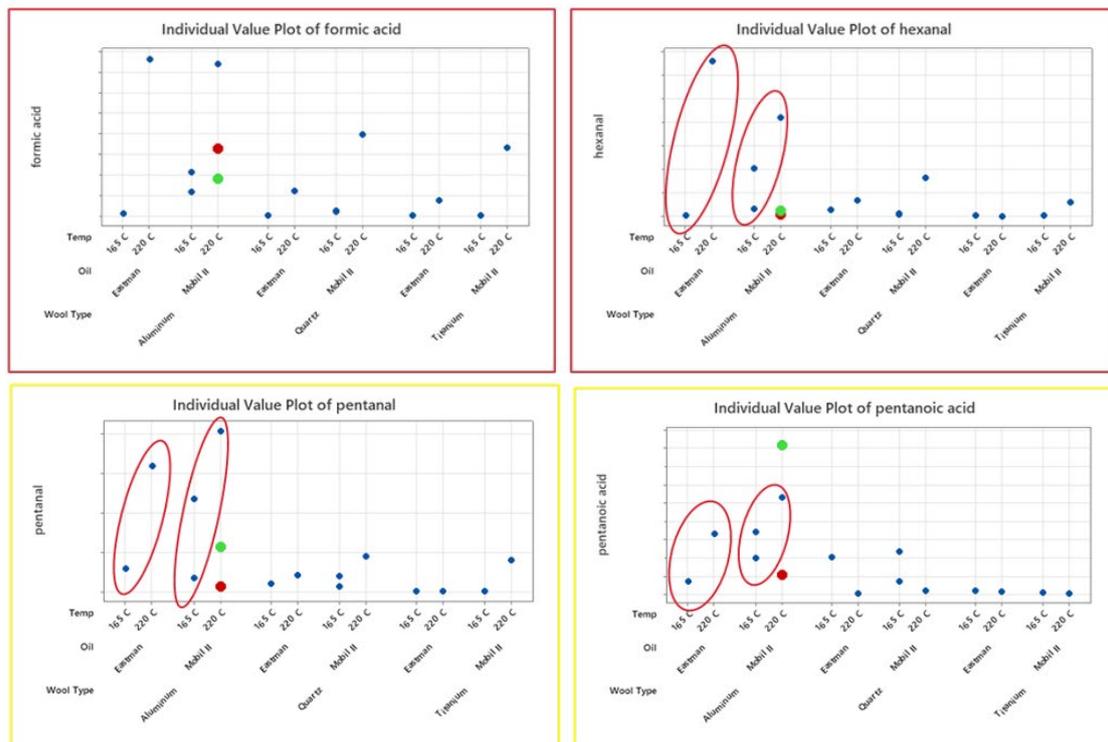


Abbildung 45: Testergebnisse – Zersetzungstests Triebwerksöle

2.1.2.2.3 Zusammenfassung Ölzerersetzungstest

Die ermittelten Daten sind neue Forschungsergebnisse, die in dieser Form noch nicht verfügbar waren. Die Daten zeigen auf, dass die Auswahl von Materialien im Zapflupfpfad einen Einfluss auf die Bildung von VOCs im Falle einer Kontamination haben kann.

Die Zapflupfverrohrung aus Titanium ist für die Bildung von VOCs vernachlässigbar, da es nur eine geringe Reaktionsfähigkeit mit Triebwerksölen aufweist.

Aluminiumoberflächen, die in Wärmetauschern der Klimaanlage sowie in Konvertern zu finden sind, haben eine sehr hohe Reaktionsfähigkeit mit Triebwerksölen und einen signifikanten Effekt zur Bildung von VOCs. Für künftige Anwendungen sollte auf entsprechendes Material verzichtet werden bzw. sind die Oberflächen bei einem Einsatz entsprechend zu beschichten.

2.1.2.2.3 Wärmetauscher der Klimaanlage mit Katalysatorbeschichtung (CAT PACK HX)

Bei einem beschichteten Wärmetauscher werden die Kühlrippen der warmen Seite, die von der Zapflupf durchströmt wird, mit einem Katalysator zum Abbau von Kohlenwasserstoffen (VOCs) und Ozon beschichtet. Ein katalytischer Oxidationsprozess baut Ozon ab und wandelt geruchsauslösende Kontaminationen in Wasser und Kohlenstoffdioxid um.

Ein beschichteter Wärmetauscher der Klimaanlage könnte einen unabhängigen Konverter ersetzen und somit Gewicht einsparen und Druckverlust im Zapfluftpfad minimieren. Zudem würde eine Option entstehen, für Flugzeuge im Service eine Nachrüstungsoption anzubieten.

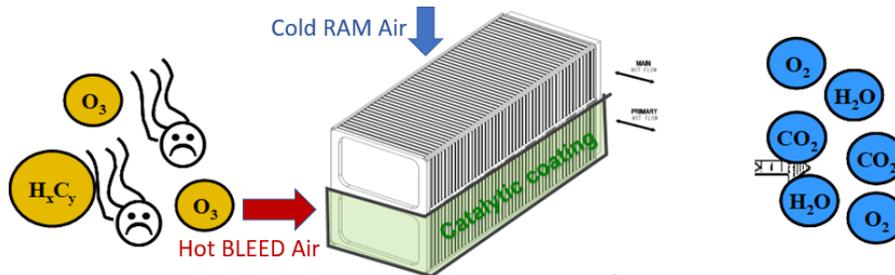


Abbildung 46: Coated Pack HX – Schematische Darstellung

Honeywell hat für vier verschiedene Betriebspunkte des Flugzeuges analysiert (Abbildung 47), welche Effektivität ein beschichteter Wärmetauscher für die Airbus A320 Klimaanlage zum Abbau von Kontaminationen und Ozon hat. Es wurden jeweils zwei Betriebspunkte für den Einsatz am Boden und auf Reiseflughöhe untersucht, wobei die Betriebspunkte bei kalten Temperaturen kritisch für die Anwendung sind.

Case		Condition			
		Altitude [ft]	Mach	Ambient Temp [°C]	Humidity [g/kg]
Ground	APU cold -23	0	0	-23	0,5
Ground	APU ISA	0	0	15	10,6
Cruise	Flight Hot	39000	0,76	-33,5	0,9
Cruise	Flight Cold	25000	0,7	-58	0

Abbildung 47: Catalytic Pack HX – untersuchte Betriebspunkte

Untersucht wurde die Effektivität des Primären- (Primary) sowie des Hauptwärmetauschers (Main) der Klimaanlage des Airbus A320 mit einer Katalysatorrezeptur CHOC-Beschichtung. Die Daten wurden mit der Performance eines unabhängigen A320 Konverters mit einer CHOC-Beschichtung verglichen.

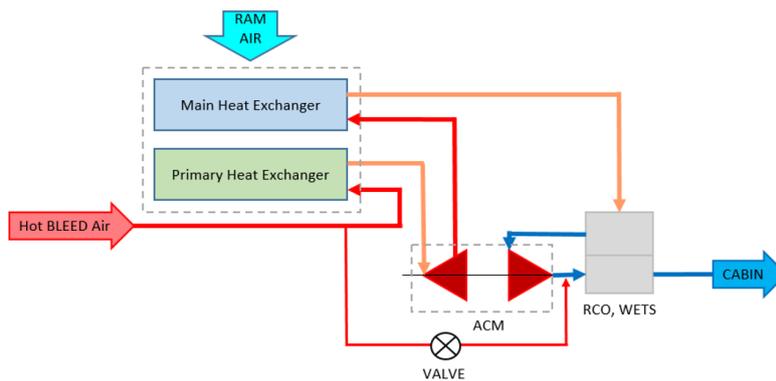


Abbildung 48: Catalytic Pack HX – Prinzipielles Diagramm Luftverteilung Wärmetauscher

Pack Primärer Wärmetauscher:

In Abbildung 49 ist exemplarisch der prinzipielle Temperaturverlauf über den primären Wärmetauscher auf Reise Flughöhe (Flight hot) dargestellt. Die Eingangstemperatur vom Wärmetauscher ist hoch und nimmt aufgrund der Kühlluft (RAM Air) zum Ausgang ab. Der katalytische Oxidationsprozess wird mit abnehmender Temperatur ineffektiver. Eine hohe Eingangstemperatur sowie die verfügbare Fläche mit hohen Temperaturen sind wesentliche Faktoren für eine gute Performance zum Abbau von Kontaminationen und Ozon.

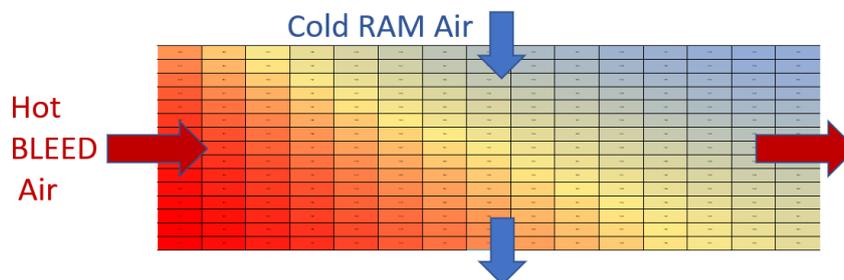


Abbildung 49: Catalytic Pack Primary HX – Primärer HX Temperaturprofil für Reiseflug warm

Die Daten in Abbildung 50 stellen dar, dass die Eingangstemperatur sowie die Durchschnittstemperatur über den Wärmetauscher auf Reise Flughöhe – Flight Hot – am höchsten ist und für den Betrieb am Boden am niedrigsten.

PACK HX	CASE:	Temperature			
		APU COLD -23	APU ISA	FLIGHT HOT	FLIGHT COLD
PHX	min	137 °C	112 °C	114 °C	121 °C
	max	145 °C	170 °C	195 °C	168 °C
	average	142 °C	140 °C	153 °C	148 °C

Abbildung 50: Catalytic Pack Primary HX – Vergleich Temperatur für vier Betriebspunkte

Die Analyse (Abbildung 51) zeigt, dass ein beschichteter primärer Wärmetauscher mit einer katalytischen Beschichtung (CHOC) eine sehr gute Effizienz zum Abbau von Ozon aufweist, die vergleichbar mit der Performance von einem unabhängigen Konverter mit CHOC ist. Die Effizienz für den Abbau von VOCs ist mit dem beschichteten Wärmetauscher gegenüber einem unabhängigen Konverter um 14,5 % – 48,5 % reduziert.

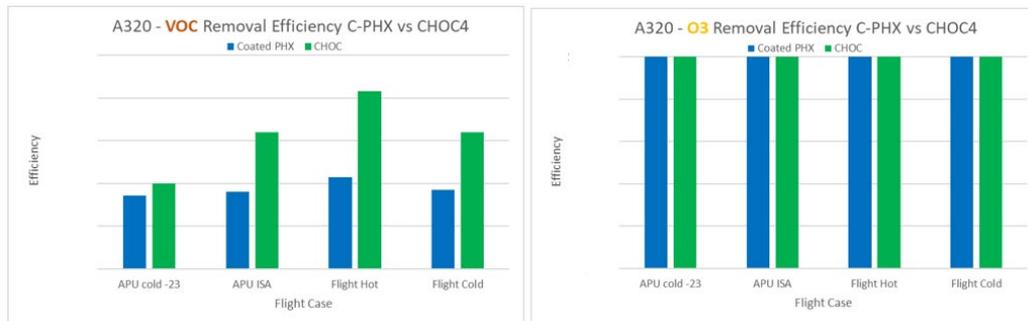


Abbildung 51: Catalytic Pack Primary HX – Performance HX vs. Konverter (VOC, Ozon)

Pack Haupt-Wärmetauscher:

In Abbildung 52 ist exemplarisch der prinzipielle Temperaturverlauf über den Haupt-Wärmetauscher auf Reiseflughöhe (Flight hot) dargestellt. Wie beim primären Wärmetauscher ist die Eingangstemperatur der Kühlrippen hoch und nimmt aufgrund der Kühlluft (RAM Air) zum Ausgang ab.

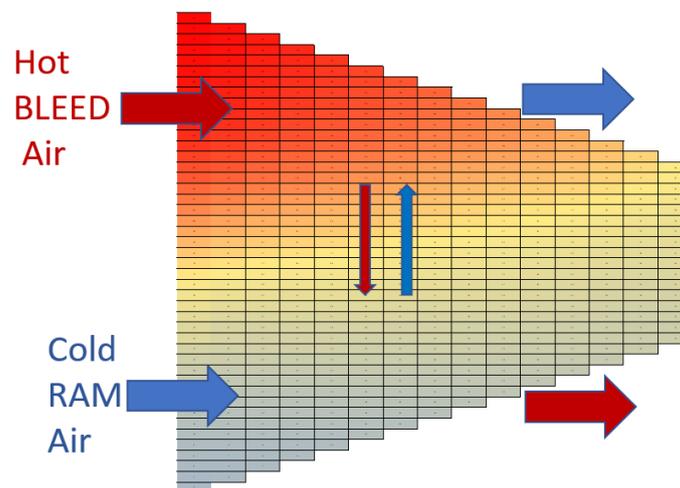


Abbildung 52: Catalytic Pack Main HX – Primärer HX Temperaturprofil Reiseflug warm

Wie den Daten in Abbildung 53 zu entnehmen sind, ist die Eingangstemperatur vom Wärmetauscher im Durchschnitt höher ist als beim primären Wärmetauscher, aber die minimalen Temperaturen sowie die Durchschnittstemperatur über den Wärmetauscher sind wesentlich niedriger. Daraus lässt

sich schließen, dass die verfügbare beschichtete Fläche mit ausreichenden Temperaturen zum Aktivieren des Oxidationsprozesses kleiner ist als beim primären Wärmetauscher.

PACK HX	CASE:	Temperature			
		APU COLD -23	APU ISA	FLIGHT HOT	FLIGHT COLD
MHX	min	4 °C	22 °C	5 °C	-17 °C
	max	175 °C	156 °C	171 °C	173 °C
	average	92 °C	74 °C	72 °C	70 °C

Abbildung 53: Catalytic Pack Main HX – Vergleich Temperatur für vier Betriebspunkte

Die Diagramme in

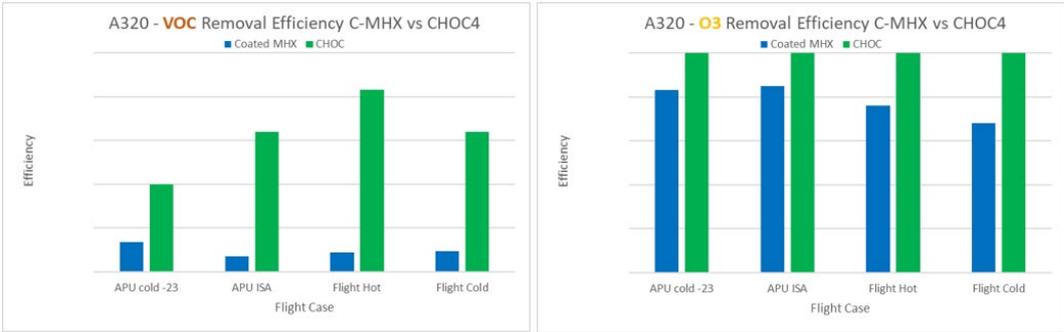


Abbildung 54 bestätigen mit der ermittelten Performance zum Abbau von VOCs und Ozon, dass die beschichtete Oberfläche mit ausreichenden Temperaturen kleiner ist im Verhältnis zum primären Wärmetauscher. Der Haupt-Wärmetauscher mit einer katalytischen Beschichtung (CHOC) weist eine gute Effizienz zum Abbau von Ozon auf, die zwischen 17 % - 32 % geringer ist als mit einem unabhängigen Konverter mit CHOC-Rezeptur. Die Effizienz für den Abbau von VOCs ist mit dem beschichteten Wärmetauscher gegenüber einem unabhängigen Konverter um 66,6 % – 89,5 % reduziert.

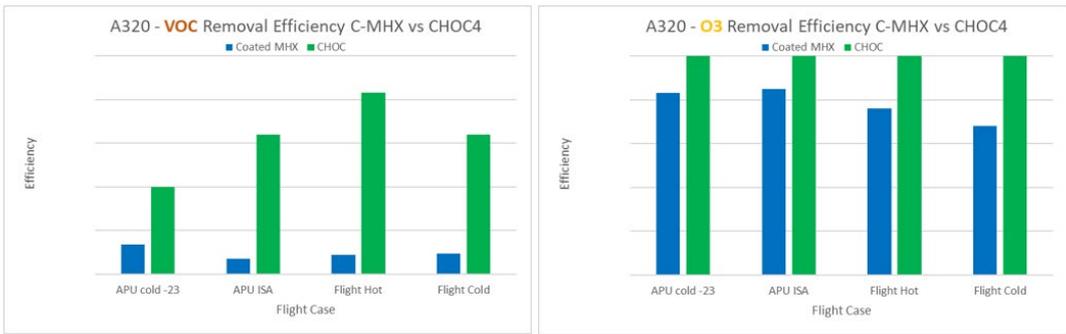


Abbildung 54: Catalytic Pack Main HX – Performance HX vs. Konverter (VOC, Ozon)

2.1.2.2.3.1 Zusammenfassung Wärmetauscher mit Katalysatorbeschichtung

Die Beschichtung der Kühlrippen der warmen Seite des primären Wärmetauschers der Klimaanlage kann für bestimmte Anwendungen nutzbar sein. Ein Beispiel für eine Anwendung wäre, den von der

Regulierung vorgegebenen Ozonwert in der Kabine nicht zu überschreiten. Ein weiteres Beispiel ist eine Anwendung, bei dem die Luft der Klimaanlage nicht über die Zapfluft erzeugt wird.

Für die in PasKaL mit dem Verbundpartner Airbus angedachte Anwendung ist ein primärer Wärmetauscher mit einer CHOC Beschichtung für den Abbau von Kontaminationen, die durch Kohlenwasserstoffe verursacht werden, nur bedingt geeignet. Mit dem Fokus auf eine hohe Performance zum Abbau von VOCs ist für die angedachte Anwendung ein unabhängiger Konverter mit CHOC Beschichtung die bevorzugte Lösung.

Für neue Flugzeugprogramme bzw. überarbeitete Flugzeugsysteme ist im Einzelfall zu entscheiden, ob ein beschichteter primärer Wärmetauscher in der Klimaanlage umsetzbar ist.

Eine beschichteter Haupt-Wärmetauscher ist keine Option, da der Aufwand zum Nutzen in keinem Verhältnis steht.

2.1.2.3 AP2.2.2 – Filter

2.1.2.3.1 Photokatalytische Oxidation - PCO

Eine weitere Möglichkeit zur Reduzierung von Kontaminationen von den Zapfluftquellen (Triebwerke/ APU) bis zur Kabine ist eine Filterung der Luft nach dem Mixer des Flugzeugs. Der Einsatz einer aktiven Filtertechnologie auf Basis einer photokatalytischen Oxidation wird für diese Anwendung untersucht. Für den Prozess der Oxidation wird ein mit einem Katalysator beschichteter Träger mit einer Leuchtdiode als Lichtquelle illuminiert, die eine Wellenlänge im ultravioletten Bereich aufweist (im Folgenden als UV-LED benannt). Für die optimale Ausleuchtung sind die Träger mit den UV-LEDs zwischen den Panels mit dem Katalysator verbaut.

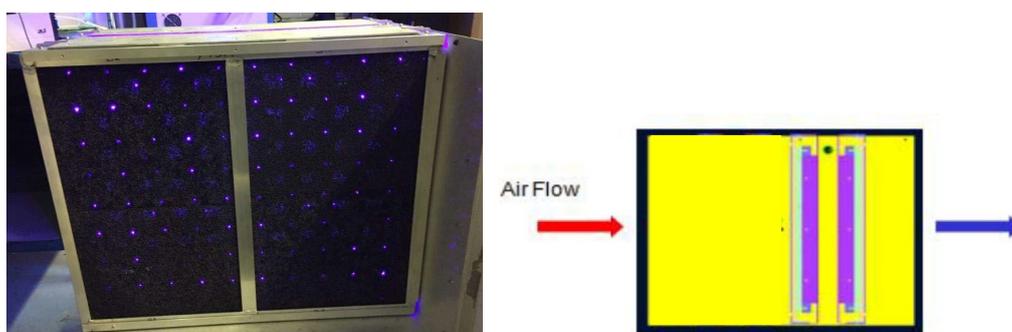


Abbildung 55: PCO Panel

Airbus hat für die Anwendung eine Installation direkt nach dem Mixer im Flugzeug vorgesehen (Abbildung 56). Mit diesem Ansatz wird die Luft von der Zapfluft, die der Kabine als Frischluft zugeführt wird, sowie die zurückgeführte Luft aus der Kabine (Recirculation Air) mit der Komponente gefiltert. Ein geringer Druckverlust über das Filterelement sowie eine hohe Effektivität und eine geringe Erhöhung der Lufttemperatur durch den Filter sind kritische Elemente. Diese sind mit den

hohen Luftströmen in der Luftversorgung zwischen Mixer und Kabine sowie dem definierten, eingeschränkten Bauraum zu erfüllen.

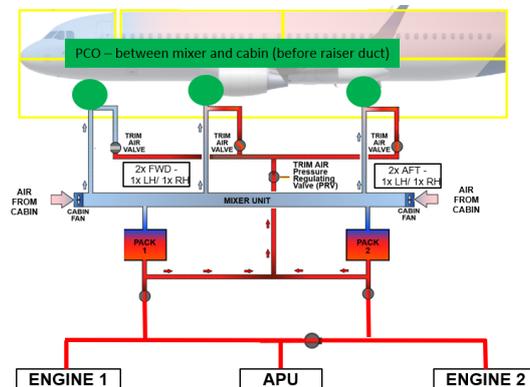


Abbildung 56: PCO Installation nach dem Mixer

Die Untersuchung der Anwendung wurde in mehrere Prozessschritte unterteilt und ist in den folgenden Kapiteln ausgeführt.

2.1.2.3.1.1 Katalysator Evaluierung

Honeywell hat vier unterschiedliche Rezepturen für einen Katalysator zum Beschichten eines Trägermaterials getestet. Für den Test wurde der für andere Anwendungen eingesetzte Katalysator mit drei Rezepturen verglichen, die für unterschiedliche Anwendungen entwickelt wurden. Der Test wurde mit Komponentenevaluatoren durchgeführt.

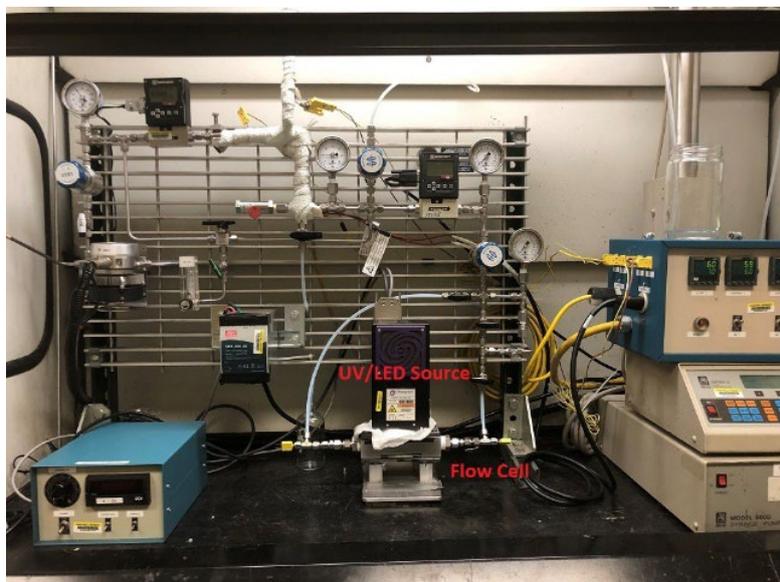


Abbildung 57: PCO – Testsetup Katalysator Vergleichstests

Die Performance der vier Katalysatoren wurde für einen aktiven (UV-LED ein) und einen passiven (UV-LED aus) Betrieb getestet, wobei die Performance für den aktiven Mode bei der Auswahl Priorität hatte. Die Tests wurden in zwei Schritten durchgeführt, um den besten Kandidaten zu ermitteln.

Im ersten Schritt wurden den vier ausgewählten Katalysatoren 5 ppm Ethanol zugeführt und die Abbaurate bei eingeschalteter UV-LED Lichtquelle und ausgeschalteter Lichtquelle (Dark rxn) ermittelt. Der Abbildung 58 ist zu entnehmen, dass die beste Performance für den priorisierten Betrieb mit der eingeschalteten Lichtquelle Rezeptur 1 und Rezeptur 4 haben.

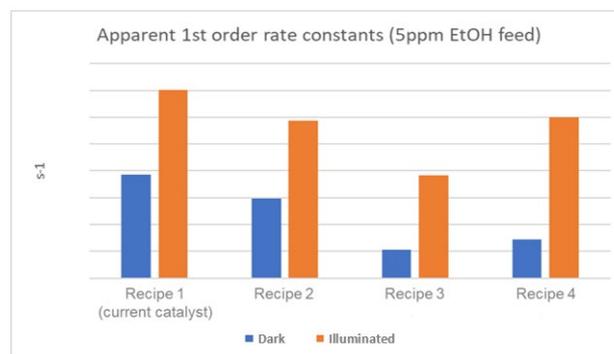


Abbildung 58: PCO – Ergebnis Katalysator mit 5 ppm Ethanol

Für eine finale Auswahl wurden Rezeptur 1 und 4 mit einer Ethanol-Rate von 1 ppm getestet. Der Test zeigt, dass Rezeptur 1 bei aktiver UV-Lichtquelle eine zweimal höhere Performance als Rezeptur 4 hat.

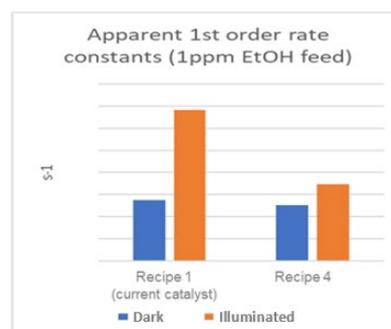


Abbildung 59: PCO – Ergebnis Katalysator mit 1 ppm Ethanol

Der direkte Vergleich von Rezeptur 1 und 4 bei den zugeführten Konzentrationen von 1 ppm und 5 ppm verdeutlicht (Abbildung 60), dass Rezeptur 1 bei der niedrigen Konzentrationen eine bis zu zweimal höhere Performance als bei hohen Konzentrationen hatte.

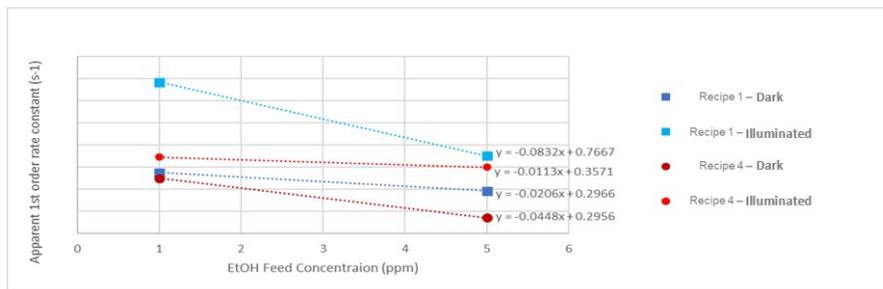


Abbildung 60: PCO –Vergleich Performance vom Katalysator mit 1 ppm und 5 ppm Ethanol

Für die Evaluierung der Performance mit einem Prototyp wurde die Rezeptur 1 für die Beschichtung des Trägermaterials ausgewählt.

2.1.2.3.1.2 Prototyp Test – Ethanol als Referenzkontamination

Honeywell hatte für eine untersuchte Anwendung zur Reduzierung von Kontaminationen der Kabinenluft einen Prototypen mit vier Lichtpanel und vier Katalysatorpanel verfügbar. Dieser Prototyp wurde für die weiteren Tests zur Validierung der Performance vom PCO mit vier neuen Panel eingesetzt, deren Trägermaterial mit dem ausgewählten Katalysator (Rezeptur 1) beschichtet war. Die Testergebnisse waren wesentlich für die Optimierung des PCO Performance-Modells. Das Performance-Modell war eine entscheidende Eingangsgröße, um die Designstudie für die von Airbus geforderte Anwendung durchzuführen.



Abbildung 61: PCO Prototype Testsetup at HAATC

Die Validierung der Performance wurde für die folgenden Betriebspunkte in Abbildung 62 mit Ethanol als Referenzkontamination ermittelt:

Control Variables		Low	Med	High
Duct Flow Rate	cfm	400	x	600
	l/s	188	x	283
Light intensity	watts	0	1000	2000
EtOH concentration	ppb	200	x	1000
Toluene	ppb	50	x	100

*Tested with low concentration EtOH

Abbildung 62: PCO Prototype Testkonditionen

Die Ergebnisse in Abbildung 63 zeigen die Abbaurrate von Ethanol für verschiedene Konzentrationen von Ethanol sowie bei den zwei definierten Luftströmungen und Leistungen auf.

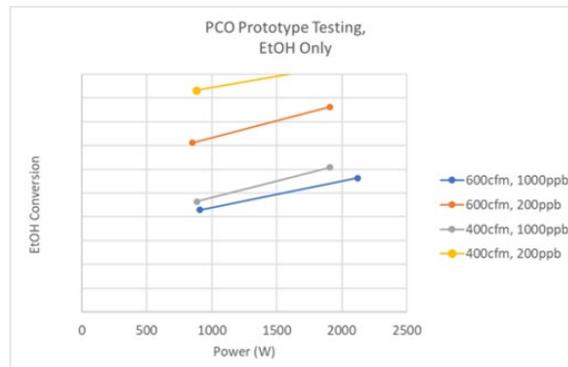


Abbildung 63: PCO Prototype – Ergebnisse Dosierung mit Ethanol

Der Zusammenhang zwischen Leistung, Luftströmung und der eingebrachten Konzentration von Ethanol wird mit dem Ergebnis dargestellt. Die Abbaurrate von Ethanol ist effizienter mit einer höheren Leistung bzw. Lichtintensität. Bei gleichbleibender Lichtintensität verringert sich die Abbaurrate von Ethanol mit höheren Konzentrationen. Eine Erhöhung der Luftströmung verringert die Abbaurrate ebenfalls.

Mit einer kombinierten Dosierung von Ethanol und Toluol ist bei den Tests ermittelt worden, dass eine Wechselwirkung von unterschiedlichen Kontaminationen auf die Performance vom PCO besteht (siehe Abbildung 64). Mit der Zumischung von Toluol zu Ethanol verringerte sich die Abbaurrate von Ethanol.

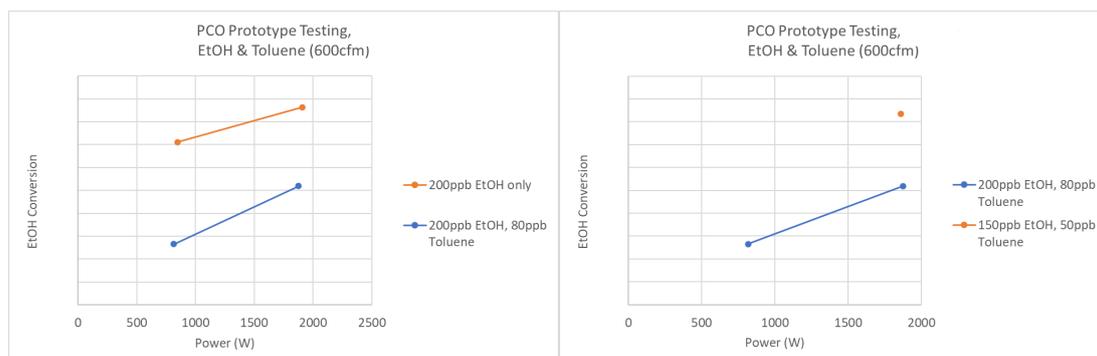


Abbildung 64: PCO Prototype – Ergebnisse Dosierung mit Ethanol und Toluol

Die Ethanol Abbaurrate kann unter Verwendung von Konstanten auf andere Komponenten extrapoliert werden und in die Optimierung für das PCO Performance-Modell einfließen, wobei die Adsorption eine nicht zu vernachlässigende Rolle hat.

2.1.2.3.1.3 PCO – Pre-Filter Test (Valeriansäure, Siloxan)

Der PCO hat einen Carbon Pre-Filter am Eingang. Der Filter hält Komponenten mit einer hohen Absorptionsfähigkeit zurück, die vom PCO nicht so effektiv oxidiert werden, so dass der PCO bei einem Event effektiv sehr flüchtige Schadstoffe oxidieren kann, für die der Kohlefilter uneffektiv ist. Weiter mindert der Pre-Filter hohe Konzentrationen ab, die den PCO im Falle eines Kontaminationsevents direkt erreichen, was zu einer höher Effizienz des PCO führt.

Der Photokatalysator kann durch die Verschmutzung von haftenden Komponenten beeinträchtigt werden und könnte somit die Performance vom PCO negativ beeinflussen. Für den PasKaL Verbundpartner Airbus waren Siloxane besonders kritisch, die über die Kabine in den PCO gelangen können. Honeywell hat als kritische Komponente außerdem Valeriansäure ausgewiesen. Der Test mit dem Carbon Pre-Filter sollte zeigen, dass die beiden kritischen Komponenten vom Pre-Filter abgebaut werden, so dass diese den PCO nicht erreichen.

Der Test wurde mit einem repräsentativen Evaluator für die beiden ausgewählten Kontaminanten einzeln durchgeführt:

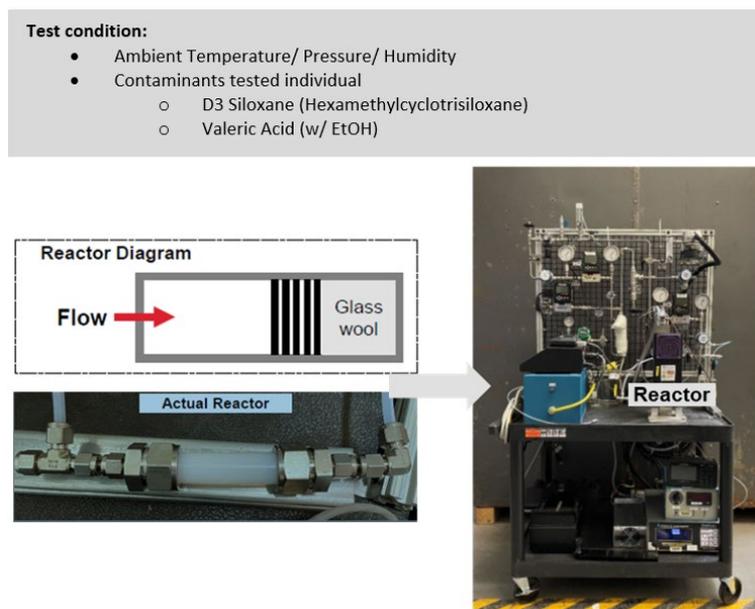


Abbildung 65: PCO – Pre-Filter – Testaufbau (Valeriansäure, Siloxane)

Mit dem Carbon Pre-Filter werden Valeriansäure und Siloxane hervorragend abgebaut. Siloxane wurden vom Carbon Pre-Filter mit über 97 % abgebaut und Valeriansäure mit über 96,5 %. Für Valeriansäure hat sich die Abbaurrate über die Dauer des Test verbessert, weil diese sehr haftend ist und sich am Messequipment festgesetzt hatte und sich über die Dauer des Test löste.

Es ist zu erwähnen, dass Ethanol mit 82,5 % über die Dauer des Tests vom Filter abgebaut wurde.

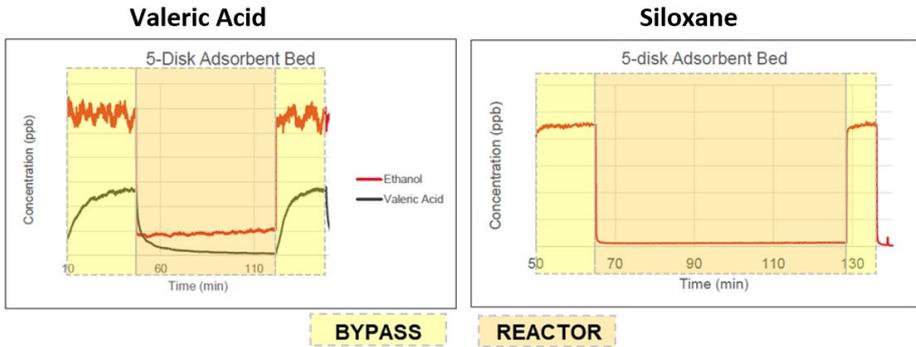


Abbildung 66: PCO – Pre-Filter – Ergebnisse - Valeriansäure, Siloxane

Der Carbon Pre-Filter ist hervorragend geeignet, um den PCO vor dem Eintragen von Valeriansäure und Siloxan zu schützen, so dass diese keine negative Beeinflussung auf die Performance des PCO haben.

2.1.2.3.1.4 PCO – Pre-Filter Test (PM2.5)

Der Paskal Verbundpartner Airbus hat spezifiziert, dass Feinstaub der Partikelgröße PM2.5 (< 2,5 Micrometer) um >90 % bei einer Anzahl von $2.5 \cdot 10^4$ particles/cm³ vermindert werden sollen. PCO ist nicht zur Reduzierung von Feinstaub geeignet und der Carbon Pre-Filter wurde auf seine Eigenschaft zur Reduzierung von Partikelgröße PM2.5 getestet.

Der Test wurde mit einem Filter in voller Größe mit den folgenden Testkonditionen durchgeführt:

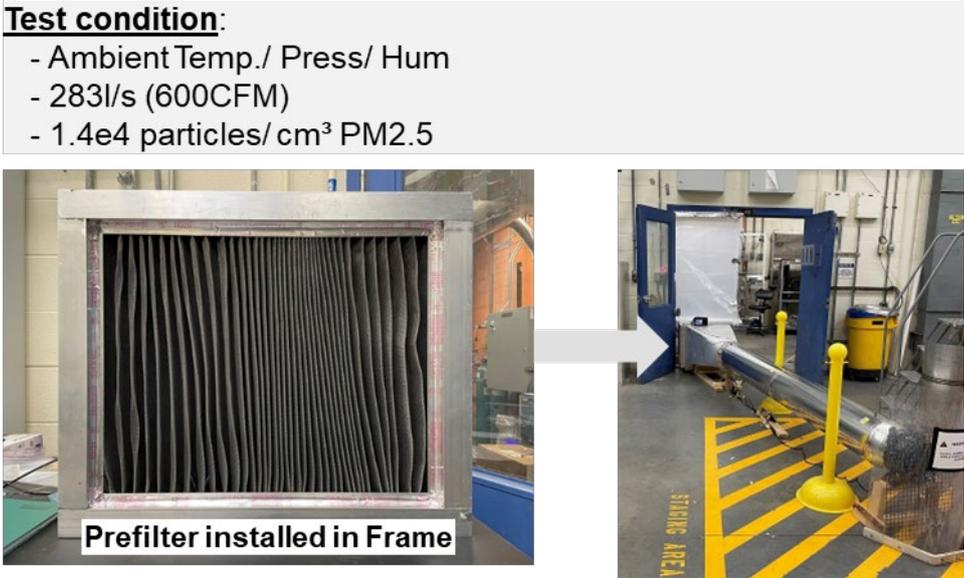
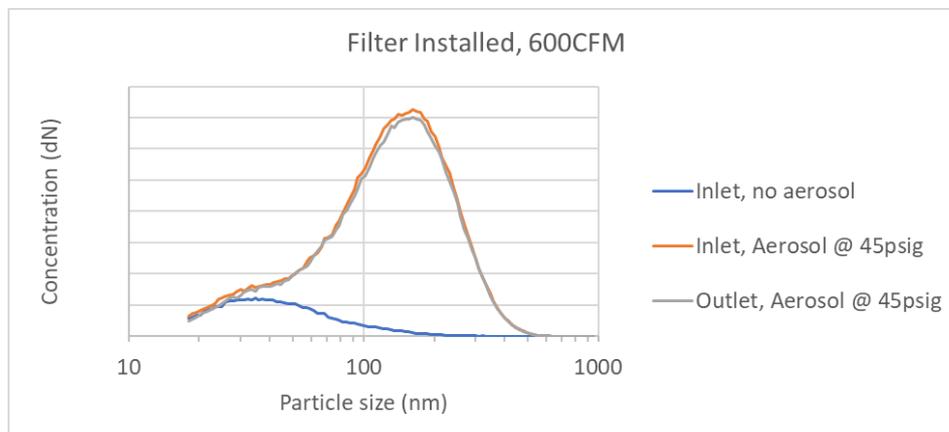


Abbildung 67: PCO – Pre-Filter – Testaufbau (PM2.5)

Die erfassten Daten demonstrieren, dass der Pre-Filter nur eine unzureichende Performance zur Reduzierung von Partikeln der Größe PM_{2,5} hat. Der Carbon Pre-Filter reduziert die Partikel um ~4 %, wobei die Verrohrung ohne Filter schon eine Reduzierung um ~1,7 % verursacht.



Test Condition	Flow Rate	Pressure drop	Particle Count		Removal
			Inlet	Outlet	
	CFM	inH2O	#/cm ³	#/cm ³	%
Blank Duct	600	0.01945	1.41E+04	1.39E+04	1.72
Filter Installed in Duct	600	0.1262	1.49E+04	1.43E+04	4.00

Abbildung 68: PCO – Pre-Filter – Ergebnisse (PM_{2.5})

Das Design des Carbon Pre-Filter ist nicht für die Reduzierung von Partikeln ausgelegt und eine signifikante Reduzierung wurde nicht erwartet. Der Pre-Filter hat einen sehr kleinen Druckverlust von 0,005 psid. Der Test bestätigt die Ergebnisse von der Aerosol Trap Kampagne zur Bestimmung des geeigneten Filtermaterials: ein Druckverlust > 0.1 psid ist für eine effiziente Reduzierung notwendig.

2.1.2.3.1.5 PCO – Design Study

Honeywell hat in PasKaL für die von Airbus eingebrachte Filteranwendung mit der Installation nach dem Mixer eine PCO Designstudie durchgeführt, bei der die Airbus A320 Familie als Anwendungsfall angenommen wurde. Der Bauraum ist am Ausgang des Mixers vorgesehen, bevor die Luft in Richtung der Kabine verteilt wird.

Der Kooperationspartner Airbus hat für die Anwendung die folgenden Anforderungen definiert und im Rahmen von PasKaL an Honeywell gegeben.

Task	Value
Ethanol conversion	90%
Feed ethanol conc.	300 ppb
Air flow	300 L/s = 635 cfm
Flow box volume (liter)	30 L (20x20x75 cm)
Pressure drop limit	5 hPa

Abbildung 69: PCO – Design Study – Anforderungen

Der längliche und schmale Bauraum sowie der maximal erlaubte Druckverlust über den PCO sowie der hohe Luftstrom am Eingang sind kritische Punkte für die Anwendung.

Die Ergebnisse der im Rahmen von PasKaL durchgeführten Tests mit dem PCO sind in das PCO Modell eingeflossen, so dass es repräsentativ ist. Unter anderem lieferten die Performancetests mit Ethanol als Kontaminant die Kinetik als Funktion der Lichtintensität und der Dosierkonzentrationen. Das Model ist die Grundlage zur Ermittlung der Geometrie des PCO für den vorgegebenen Bauraum und die geforderte Performance.

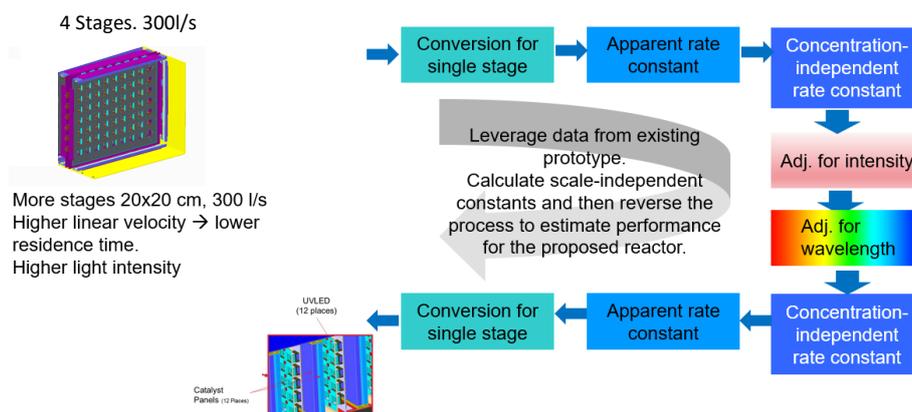


Abbildung 70: PCO – Design Study – Kinetik Prozess

Für die Ermittlung der Konfiguration des Lichtpanels wurde ein optisches Model für die Lichtintensität der ausgewählten UV LED erstellt, um über den Prozess die optimale Performance des Lichtpanels im Zusammenhang mit dem katalytischen Panel zu ermitteln.

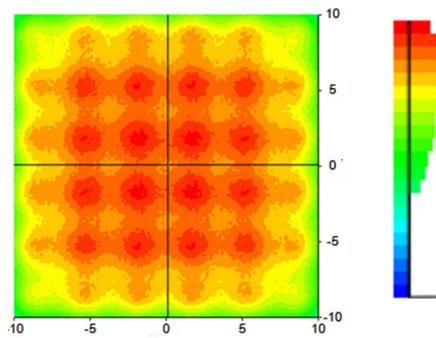


Abbildung 71: PCO – Design Study – Simulation Lichtpanel

Zur Ermittlung des Druckverlustes für die gewählte Geometrie sowie den Temperaturverlauf über den PCO wurde eine CFD Simulation durchgeführt.

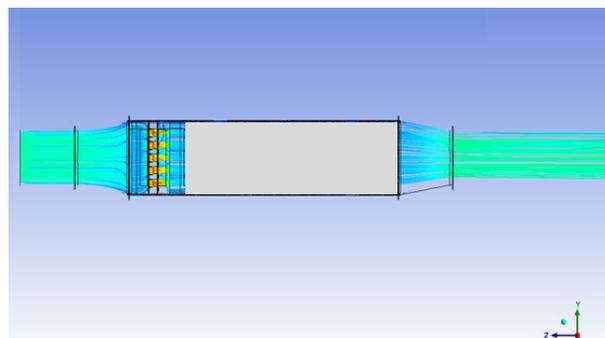


Abbildung 72: PCO – Design Study – CFD Simulation

Mit den Daten aus diesem Prozess wurde eine Performancematrix erstellt, um für verschiedene Konfigurationen die Leistungsfähigkeit des PCO für die vorgesehene Anwendung aufzuzeigen.

PCO unit parameters vs. number of catalyst-LED units					
	Number of catalyst-LED units				
	x + n				
Conversion					
710 mA	23%	40%	54%	64%	79%
1000 mA	26%	46%	60%	70%	84%
1500 mA	31%	53%	68%	78%	90%
2000 mA	35%	58%	73%	82%	93%
Pressure drop (hPa)	14.5	29.0	43.6	58.1	87.1
Weight (kg)	1.85	3.71	5.56	7.42	11.13

Abbildung 73: PCO – Design Study – Catalyst/ LED Panel Performance Matrix

Der von Airbus ausgewiesene Bauraum hat ein kleines Querprofil und verursacht eine höhere lineare Strömungsgeschwindigkeit im Vergleich zum Prototypen von Honeywell. Die höhere

Lineargeschwindigkeit erfordert mehr katalytische Panel und eine höhere Lichtintensität, um die gleiche Abbaurate zu erreichen wie der Prototyp. Um die von Airbus geforderte Abbaurate von >90 % zu erreichen, sind eine Vielzahl von Katalysator/ LED Panel im Bauraum erforderlich.

Die Anzahl der Panel verursacht einen hohen Druckverlust über den PCO, der für Airbus nicht akzeptabel ist. Auch mit einer Reduzierung der Anzahl der Panel und dem damit verminderten Druckverlust, wird der geforderte maximal erlaubte Druckverlust von 5 hPa nicht eingehalten.

Aufgrund der Anzahl der Panel wird die Luft, die durch den PCO strömt, bis zum Ausgang um ca. 5°C erhöht. Im operativen Betrieb bedeutet die Temperaturerhöhung über den PCO, dass die Klimaanlage zum Ausgleich die Lufttemperatur am Eingang des PCO absenken muss, was einen höheren Energieaufwand bedeutet.

Parameter	Value
Weight	11.3 kg (24.5 lb)
Pressure drop	87.1 hPa
Power Consumption	2252 W
Air temperature rise	5°C

Abbildung 74: PCO – Design Study – Key Performance Design Data

Für den von Airbus vorgesehenen Bauraum ist PCO mit den am Markt verfügbaren UV LED nicht die geeignete Anwendung zum Reduzieren von Kontaminationen. Auch mit einer weiteren Optimierung des Designs für die vorgegebenen Dimensionen sind die strikten Vorgaben für den Druckverlust nicht einhaltbar.

2.1.2.3.1.6 PCO – UV LED mit optimierter Wellenlänge

Die Wellenlänge der UV LED hat einen entscheidenden Einfluss auf die Performance vom PCO. Die optimale Wellenlänge für den Prozess der Foto-Katalytischen-Oxidation mit dem Katalysator liegt bei ~300 nm, weil bei kürzeren Wellenlängen der Katalysator mehr Licht adsorbiert, da die Anzahl der Photonen per Watt mit der Wellenlänge abnimmt.

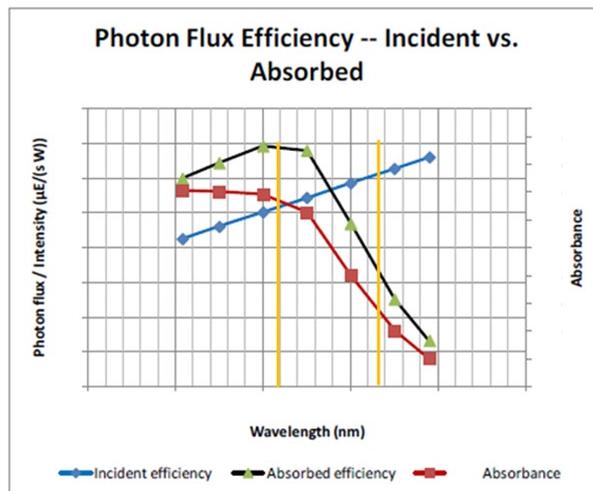


Abbildung 75: PCO – UV LED – Effizienz zur Wellenlänge

Die LED Panel im PCO sind mit UV LEDs bestückt, die eine höhere Wellenlänge zur optimalen Wellenlänge haben. Eine UV LED mit der optimalen Wellenlänge von 300 nm ist noch nicht marktreif. Im Projekt PasKaL hat Honeywell den Prototypen einer UV LED mit 308 nm getestet, die für Honeywell entsprechend angepasst wurde.

Es wurde ein Vergleichstest der UV LED mit 308 nm und der aktuell eingesetzten UV LED ausgeführt. Die Ergebnisse bestätigen die Annahmen, dass die UV LED mit 308 nm einen höheren Wirkungsgrad bei Oxidation von Kontaminationen (Test mit Ethanol) mit dem Katalysator hat.

Test condition: SLPM 3, 4, 5, Ethanol 1000 ppb, Ambient Temp./ Press./ HUM

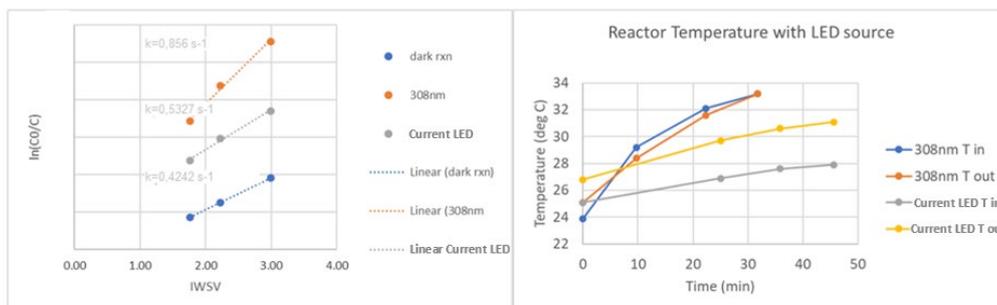


Abbildung 76: PCO – UV LED – Testergebnisse

Die UV LED mit 308 nm zeigt eine Verbesserung der Reaktion um den Faktor $\sim 1,6$ im Vergleich der zurzeit eingesetzten UV LED. Mit der Verfügbarkeit einer marktreifen UV LED mit 308 nm ist eine wesentliche Performanceoptimierung des PCO-Konzeptes möglich.

Ein Nachteil der UV LED mit 308 nm ist eine Zunahme der Temperatur über den Testzeitraum im Vergleich zur eingesetzten UV LED. Photonen haben bei kürzerer Wellenlänge mehr Energie und erzeugen mehr Wärme. Die Designstudie hat gezeigt, dass die Temperaturerhöhung der Luft im PCO

kritisch ist. Bei einer möglichen Anwendung ist eine Anpassung des Kühlkonzeptes für die UV LED mit 308 nm entsprechend vorzunehmen.

2.1.2.3.1.7 PCO – Zusammenfassung

Die ausgeführten Tests mit dem PCO haben gezeigt, dass das System eine sehr hohe Effizienz von bis zu 90 % zum Abbau von Kontaminationen (VOCs) hat. Für die in PasKaL angedachte Anwendung im Airbus A320 zwischen Mixer und Kabine ist PCO aufgrund des Bauraumes nicht die geeignete Anwendung, da insbesondere der maximal zulässige Druckverlust nicht einhaltbar ist und sich die Lufttemperatur zwischen Ein- und Auslass vom PCO um bis zu 5°C erhöht, was von der Klimaanlage kompensiert werden müsste. PCO kann für Anwendungen mit einem größeren Querschnittsprofil sowie niedrigeren Luftströmungen, wie sie in der rückgeführten Kabinenluft üblich sind, eine Anwendung finden.

Mit der Verfügbarkeit von neuen UV LEDs mit einer optimalen Wellen von ~300 nm ist eine weitere Optimierung des PCO möglich.

Das PCO-Konzept wird aufgrund der Ergebnisse zum jetzigen Zeitpunkt nicht weitergeführt.

2.1.3 AP2.3 - Optimierung von Anwendungen für Flugzeugsysteme

Das AP2.3 wurde in die folgenden Unterarbeitspakete aufgeschlüsselt:

- AP2.3.1 – Anwendungen (Connected Aircraft)
- AP2.2.2 – Integrationskonzept

2.1.3.1 AP2.3.1 – Konzepte für Anwendungsmöglichkeiten erstellt (Connected Aircraft)

Das Konzept zur Installation der Sensoren zum Messen der Luftqualität in der Zapfluft ist einzigartig und bietet neue Möglichkeiten der Anwendung. Das Sensorsystem für die Erkennung von Kontaminationen in der Zapfluft wurde im Arbeitspaket 2.1 intensiv untersucht und eine prinzipielle Architektur definiert. Das System ist mit dem Controller so ausgelegt, dass es an die Wünsche des Kunden sowie neue Entwicklungen (FBAR Sensor) anpassbar ist. Der Zugriff auf die Daten des Systems vom Wartungspersonal nach einem möglichen Event ist ein wichtiger Baustein. Mit der Installation der Sensoren in jedem Zapfluftpfad ist eine Zuordnung zum Eintragungsort in dem Zapfluftsystem gegeben. Eine permanente Messung der Luftqualität über alle Flugzyklen in der Zapfluft, bevor diese gefiltert wird, erlaubt eine frühzeitige Erkennung von möglichen Kontaminationsquellen. Mit der frühzeitigen Erkennung ist eine Triggerung von Wartungsarbeiten denkbar (PHM), um mögliche Kontaminationsevents in der Kabine zu vermeiden.

Beim Betrieb des Flugzeuges am Boden mit der APU kann es zu Kontaminationen in der Kabine durch angesogene kontaminierte Außenluft, einen Wartungsfehler an der APU oder durch einen Fehler in der APU kommen. Mit einer Sensorinstallation an der APU kann zwischen einem Fehler durch die Umgebungsluft und einem Fehler in der APU unterschieden werden. Diese Unterscheidung minimiert Bodenzeiten des Flugzeuges und Kosten, die präventiv ersetzte fehlerfreie APUs verursachen.

Eine weitere potentielle Anwendung ist die Erkennung der Performance von Konvertern in der Zapfluft zum Abbau von Kontaminationen (VOCs). Mit der prädiktiven Überwachung könnten Konverter entsprechend ihrer Performance gewartet werden, so dass ein festes Wartungsintervall entfällt. Durch diese Maßnahme ist eine Senkung von operativen Kosten des Flugzeuges möglich.

Es gibt mit der permanenten Überwachung der Luftqualität in der Zapfluft über alle Flugzyklen keine Erfahrung. Mit dem Einsatz des Systems und dem Aufbau einer Datenbank für die Luftqualität in der Zapfluft werden sich weitere Anwendungen ergeben.

2.1.3.2 AP2.3.2 – Bewertung ausgewählter Konzepte abgeschlossen / Integration

Im Rahmen des AP 2.1 ist das Integrationskonzept für das Sensorsystem mit dem Kooperationspartner Airbus optimiert worden. Vorgaben für die elektrische und mechanische Integration von Sensoren sowie deren Umgebungsbedingungen für die permanente Erfassung der Luftqualität im Zapfluftpfad wurden erstellt. Die generellen Vorgaben für das Sensorsystem wurden definiert. Mit der Festlegung von Markerkomponenten und deren Schwellwerten zur Detektierung sind klare Vorgaben für die Weiterentwicklung des Systems zum Erkennen einzelner Komponenten im Zapfluftpfad vorgegeben.

Die Konzepte zur Integration von Filtertechnologien wurden in Zusammenarbeit mit dem Kooperationspartner Airbus erstellt. Vorgaben für die Integration von Konvertern mit einer Katalysatorbeschichtung im Zapfluftpfad wurden erstellt sowie Vorgaben für die Effizienz zum Abbau von VOCs sowie die maximal erlaubten Werte von kritischen Nebenprodukten, die bei der Umwandlung von Öl entstehen.

Mit den Untersuchungen zur Öl-Zersetzung sind Vorgaben für die Auswahl von Materialien im Zapfluftpfad für neue Produkte vorgegeben.

Die Installation von Filtern zwischen Mixer und Kabine ist aufgrund der strengen Vorgaben mit aktuellen Filtertechnologien nicht umsetzbar. Anforderungen an eine entsprechende Anwendung wurden mit Airbus definiert und werden bei zukünftigen Entwicklungen berücksichtigt.

Für die Filterung von UFP sind neue Filterkonzepte erforderlich. Die Tests mit dem Aerosol Trap und dem PCO Pre-Filter geben klare Anforderungen für einen entsprechenden Filter.

3 Veröffentlichungen

Während des Projektzeitraums erfolgte keine Veröffentlichung.

4 Abkürzungsverzeichnis

ACM	Air Cycle Machine
AGI	Airbus Group Innovation
AGS	Air Generation System
APU	Auxiliary Power Unit
AP	ArbeitsPaket
ASM	Air Separation Module
ATI	Aerospace Technology Institute
BACS	Bleed Air Contamination Simulator
BOL	Beginning Of Life
CHOC	Combined Hydrocarbon and Ozone Converter
CSAS	Conditioned Service Air System
DG-Move	Directorate-General for Mobility and Transport
ECLAIR	Enabling CO ₂ reductions b better bLeed AIR management
ECS	Environmental Cooling System
EOL	End Of Life
EPA	United States Environmental Protection Agency
ESPS	Electrostatic Particle Separator (ESPS)
FAA	Federal Aviation Administration
FACTS	FRESH AIRCRAFT
HEPA	High Efficiency Particulate Air filter
Hg	Quecksilber (Hg Lampe – Gasentladungslampe)
IBP	Fraunhofer-Institut für Bauphysik
KlimaTIS	Klimaanlagen Technologien für Innovative Systeme
LED	Light-Emitting Diode/ Leuchtdiode
LuFo	Luftforschungsprogramm
MHX	Main Heat Exchanger
MRO	Maintenance, Repair, Overhaul
PasKaL	Passagierfreundliche Kabine und Luftqualität

PCO	Photo Catalytic Oxidation
PHX	Primary Heat Exchanger
PID	Photoionisationsdetektor
RHX	RAM Air Heat Exchanger
SAE	Society of Automotive Engineers
SIC	Smell In Cabin
SFC	Specific Fuel Consumption
TRL	Technology Readiness Level
UCAIR	UK ATI Cabin Air
UK	United Kingdom
UV	Ultraviolett
UV-LED	Ultraviolette Leuchtdiode
VOC	Volatile Organic Compound/ Flüchtig Organische Verbindungen
VOZC	Volatile Organic Compound and Ozone Converter
WIDS	Worldwide Invention Disclosure System
ZAL	Zentrum für Angewandte Luftfahrtforschung GmbH

Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN N/A	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Schlussbericht	
3. Titel Schlussbericht zum Fördervorhaben LUFO VI-1 – PasKaL (Passagierfreundliche Kabine und Luftqualität)		
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] von Frieling, Ralf	5. Abschlussdatum des Vorhabens 31.01.2023	
	6. Veröffentlichungsdatum 10.07.2023	
	7. Form der Publikation Document Control Sheet	
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) Honeywell Aerospace GmbH Frankfurter Str. 41-65 65479 Raunheim Germany	9. Ber.-Nr. Durchführende Institution N/A	
	10. Förderkennzeichen 20K1904B	
	11. Seitenzahl 69	
12. Fördernde Institution (Name, Adresse) BMWK	13. Literaturangaben 0	
	14. Tabellen 0	
	15. Abbildungen 76	
16. DOI (Digital Object Identifier) N/A		
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum) N/A		
18. Kurzfassung <p>1. Derzeitiger Stand von Wissenschaft und Technik Die Luft in der Flugzeugkabine ist trotz der Passagierdichte überwiegend von sehr hoher Qualität, da diese bis zu 20-mal in der Stunde ausgetauscht wird. Detektoren für eine ständige Kontrolle der Zapfluft auf Verunreinigungen, um den Einfluss von möglichen Kontaminanten auf die Frischluftqualität im Flugzeugbetrieb bewerten zu können, sind für kommerzielle Flugzeuge nicht am Markt. Mit der Spezifizierung von möglichen Kontaminationen in der Zapfluft können Komponenten zur Reduzierung dieser verbessert sowie die Performance validiert werden.</p> <p>2. Zielsetzung der Untersuchung Das Vorhaben untersuchte technologische Lösungen, die die derzeit rein subjektive Interpretation von auftretenden Gerüchen mit objektivierenden Daten belegt und bei der Erkennung und damit Beseitigung von Ursachen unterstützend eingreifen. Es wurde eine gezielte Entwicklung von Sensoren für die Erkennung von Kontaminationen im Zapfluftpfad sowie von Filtern für deren Abbau, mit klaren Vorgaben für die Leistungsfähigkeit, durchgeführt.</p> <p>3. Methode Analyse von Kontaminationen und deren Markerkomponenten in der Zapfluft. Marktanalyse, Bewertung und Auswahl von geeigneten Technologien zum Detektieren und Filtern von Kontaminationen. Validierung der ausgewählten Technologien via Test und Designstudien.</p> <p>4. Ergebnis Vorgaben für Sensoren zum permanenten Monitoren der Luftqualität über alle Flugphasen in der Zapfluft erarbeitet. Entwicklung von Sensoren (TVOC, Speziierung Sensor) zum Messen der Luftqualität und erfolgreiche Validierung in relevanter Umgebung. Vorgabendefinition für Filter zum Abbau von Kontaminationen in der Zapfluft und nach dem Flugzeugmixer. Validierung der Technologien in relevanter Umgebung und mit anwendungsspezifischen Design-/ Integrationsstudien.</p> <p>5. Schlussfolgerung/ Anwendungsmöglichkeiten Produktentwicklung eines Sensorsystems zum permanenten Monitoren der Luftqualität in der Zapfluft, als OE oder RMU Lösung.</p>		
19. Schlagwörter Kabinenluftqualität, Kontaminationserkennung, Photokatalytische-Oxidation, PCO, Konverter, Wärmetauscher mit Katalysatorbeschichtung, TVOC-Sensor, Speziierung-Sensor, FBAR, Zapfluft, Zapflufte Sensoren, Zapfluftfilter, Flugzeugklimaanlage, Kontaminationsevent, Schwebstofffilter, Aerosol-Trap, CHOC, Honeywell, Airbus, TVOC, VOC		
20. Verlag N/A	21. Preis N/A	

Nicht änderbare Endfassung mit der Kennung 2031267-16

Document control sheet

1. ISBN or ISSN N/A	2. type of document (e.g. report, publication) Veröffentlichung (Publikation)	
3. title Schlussbericht zum Fördervorhaben LUFO VI-1 – PasKaL (Passagierfreundliche Kabine und Luftqualität) Final report for the funded project LUFO VI-1 - PasKaL (passenger-friendly cabin and air quality)		
4. author(s) (family name, first name(s)) von Frieling, Ralf	5. end of project 31.01.2023	
	6. publication date 10.07.2023	
	7. form of publication Document Control Sheet	
8. performing organization(s) name, address Honeywell Aerospace GmbH Frankfurter Str. 41-65 65479 Raunheim Germany	9. originators report no. N/A	
	10. reference no. 20K1904B	
	11. no. of pages 69	
12. sponsoring agency (name, address) BMWK	13. no. of references 0	
	14. no. of tables 0	
	15. no. of figures 76	
16. DOI (Digital Object Identifier) N/A		
17. presented at (title, place, date) N/A		
18. abstract <p>1. Current state of science and technology Despite of the passenger density, the air in the aircraft cabin is predominantly of remarkably high quality since it is exchanged up to 20 times an hour. Sensors for continuous monitoring of the bleed air for contaminants to evaluate the impact of such compounds on the cabin air quality during aircraft operation are not available on the market for commercial aircraft. With the specification of possible contaminants in the bleed air, components for the reduction of such can be improved as well as their performance validated.</p> <p>2. Objective of the investigation The project investigated technological solutions to provide objective data for the currently purely subjective interpretation of occurring odors and to provide support in the detection and reduction of contaminants. A development of sensors for the detection of contaminations in the bleed air path as well as of filters for their degradation, with clear specifications of requirements for such components/ systems, was carried out.</p> <p>3. Method Analysis of contaminants and its marker components in the bleed air. Market analysis, evaluation, and selection of suitable technologies for detection and filtering of contaminants. Validation of the selected technologies via test and design studies.</p> <p>4. Result Specification of requirements for sensors for the permanent monitoring of the air quality over all flight phases in the bleed air. Development of sensors (TVOC, speciation sensor) to measure air quality and successful validation in relevant environment. Filter requirements defined for the degradation of contaminants in bleed air and downstream of aircraft mixer. Validation of technologies in relevant environment and with application specific design/integration studies.</p> <p>5. Conclusion/ application possibilities Product development of a sensor system for permanent monitoring of air quality in bleed air, as OE or RMU solution.</p>		
19. keywords Cabin air quality, Contamination detection, Combined Hydrocarbon and Ozone Converter, CHOC, Aerosol Trap, Bleed Air Sensor, Bleed Air Contamination, Catalytic Heat Exchanger, Photocatalytic Oxidation, PCO, TVOC Sensor, Speciation Sensor, FBAR, Contamination event, Honeywell, Airbus, Bleed Air Treatment, Bleed Air Filter, Air conditioning System, Bleed system, Bleed air quality, VOC, TVOC		
20. publisher N/A	21. price N/A	