



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences

Masterarbeit

Larissa Rohlfs

Optimierte Rauchererkennung im Frachtraum von Flugzeugen

*Fakultät Technik und Informatik
Department Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau*

*Faculty of Engineering and Computer Science
Department of Automotive and
Aeronautical Engineering*

Larissa Rohlfs

**Optimierte Rauchererkennung im
Frachtraum von Flugzeugen**

Masterarbeit eingereicht im Rahmen der Masterprüfung

im Studiengang M. Sc. Flugzeugbau
am Department Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau
der Fakultät Technik und Informatik
der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

in Zusammenarbeit mit:
Lufthansa Technik AG
Avionics Engineering
Weg beim Jäger 193
22335 Hamburg

Erstprüfer: Prof. Dr.-Ing. Wiegmann
Zweitprüfer: Dipl.-Ing./ M. Sc. Johannes Helldorff

Abgabedatum: 02. August 2018

Zusammenfassung

Larissa Rohlf

Thema der Master-Thesis

Optimierte Rauchererkennung im Frachtraum von Flugzeugen

Stichworte

Ansaugrauchmelder, Ansprechzeit, Brandmeldesysteme, Flugzeug, Frachtraum, Kamerabrandmelder, Lithium-Batterien, Rauch

Kurzzusammenfassung

In mehreren Fällen wurden Flugzeugabstürze durch Brände im Frachtraum verursacht, die sich durch den Transport von Lithium-Batterien in kürzester Zeit zu unkontrollierbaren Bränden entwickelten. Die schnelle Detektion eines Brands kann die Schwere der Folgen eines solchen Brands mindern. Aus diesem Grund dient diese Thesis als Grundlage für die Entwicklung eines zusätzlichen Brandmeldesystems für den Frachtraum, das Brände in einer noch kürzeren Zeit detektieren soll als die installierten Systeme. Die Thesis umfasst die Erarbeitung, Durchführung und Auswertung von repräsentativen Tests zum Vergleich der Ansprechzeiten von ausgewählten Brandmeldesystemen mit bereits im Flugzeug verbauten Brandmeldesystemen.

Larissa Rohlf

Title of the paper

Optimized smoke detection in aircraft cargo compartments

Keywords

Aspirating smoke detector, response time, smoke and fire detection systems, aircraft, cargo compartment, camera smoke and fire detection system, lithium batteries, smoke

Abstract

Multiple aircraft crashes were caused by fires in the cargo compartment which evolved rapidly to uncontained fires due to the transportation of lithium batteries. A rapid detection of fires could mitigate the severity of the consequences of a fire. For this reason this thesis serves as the basis for the development of a supplementary smoke and fire detection system in aircraft cargo compartments in order to detect a fire in an even shorter period of time. This thesis comprises the elaboration, the conduct and the evaluation of representative tests for the comparison of response times of selected smoke and fire detection systems with systems that are already installed in an aircraft.

I Inhaltsverzeichnis

I	Inhaltsverzeichnis	4
II	Danksagung	6
III	Aufgabenstellung	7
IV	Größen und Einheiten	8
V	Abkürzungen und Symbole	9
VI	Abbildungsverzeichnis	12
VII	Diagrammverzeichnis.....	13
VIII	Tabellenverzeichnis	14
1	Einführung	15
1.1	Anlass und Ziel	15
1.2	Aufbau	17
2	Theorie	19
2.1	Branddetektion	19
2.1.1	Brandkenngrößen	19
2.1.2	Rauchausbreitung eines Brandherds mit Hitzeentwicklung	21
2.1.3	Einteilung von Brandmeldesystemen	23
2.1.4	Sensibilitätsklassen von Rauchansaugsystemen	26
2.2	Luftrechtliche Grundlagen	26
2.2.1	EASA – European Aviation Safety Agency	27
2.2.2	FAA – Federal Aviation Administration	27
2.2.3	SAE – Society of Automotive Engineers.....	27
2.3	Anforderungen einer Frachtfluggesellschaft	30
2.4	Frachtraumcharakteristika	30
2.4.1	Dimensionen	30
2.4.2	Farbgebung.....	31
2.4.3	Brandmeldesysteme	32
2.5	Mathematische Statistik	32
2.5.1	Arithmetisches Mittel	33
2.5.2	Standardabweichung.....	33

3	Methodik zur Spezifikation repräsentativer Tests.....	34
3.1	Auswahl der Brandmeldesysteme unter Verwendung von Requirements Engineering nach dem IREB-Standard.....	34
3.2	Entwicklung des Testaufbaus unter Verwendung einer Funktionenanalyse nach VDI 2803.....	41
3.2.1	Anpassung der Testfeuer.....	43
3.2.2	Konstruktion des Prüfvolumens.....	44
3.2.3	Positionierung der Brandmeldesysteme.....	45
3.2.4	Konfiguration der Brandmeldesysteme.....	51
3.2.5	Elektrischer Aufbau und Datenerfassung.....	52
3.3	Entwicklung der Testprozedur unter Verwendung von modellbasiertem Systems Engineering (MBSE).....	55
4	Auswertung der repräsentativen Tests.....	57
4.1	Darstellung der Ansprechzeiten.....	57
4.1.1	Ansaugrauchmelder.....	57
4.1.2	Passivrauchmelder.....	58
4.1.3	Lüftungsrauchmelder.....	60
4.1.4	Kamerabrandmelder.....	61
4.2	Vergleich der Ansprechzeiten der Brandmeldesysteme.....	65
4.3	Vergleich der Ansprechzeiten mit den Anforderungen der CS 25.858 / FAR 25.858.....	67
5	Bewertung.....	68
6	Zusammenfassung.....	72
7	Ausblick.....	74
IX	Literaturverzeichnis.....	76
X	Anhang A: Auswahl der Brandmeldesysteme.....	81
XI	Anhang B: Entwicklung des Testaufbaus.....	95
XII	Anhang C: Entwicklung der Testprozedur.....	119

II Danksagung

An dieser Stelle möchte ich jenen danken, die mich im Rahmen dieser Master-Thesis unterstützt und motiviert haben.

Danken möchte ich in erster Linie meinen industriellen Betreuern, Herrn Karsten Kühl und Herrn Johannes Helldorff, für Ihre ausgiebige Unterstützung. Durch anregende Diskussionen und kritisches Hinterfragen gaben Sie mir bei der Entwicklung der Master-Thesis wertvolle Hinweise und konstruktive Kritik. Auch Ihre moralische Unterstützung und Ihre kontinuierliche Motivation haben maßgeblich zur Vollendung dieser Master-Thesis beigetragen.

Ganz besonders gilt mein Dank Prof. Dr. -Ing. Wiegmann, der meine Arbeit und auch mich betreut hat. Neben der konstruktiven Kritik und den wertvollen Hinweisen zur inhaltlichen als auch formellen Gestaltung der Arbeit, haben Sie meine Fragen immer geduldig und ausführlich beantwortet.

Außerdem möchte ich den Unternehmen danken, die mir freundlicherweise ihre Brandmeldesysteme zur Verfügung gestellt und tatkräftig unterstützt haben.

Weiterhin möchte ich Tim Lübcke danken. Sie haben mich mit dem Brandlabor vertraut gemacht und mich in meinem Vorhaben unterstützt sowie alle aufgetretenen Fragen geduldig beantwortet.

Auch meine Kollegen haben maßgeblich daran mitgewirkt, dass diese Master-Thesis nun in dieser Form vorliegt. Vielen Dank, dass Sie mir die Möglichkeit gegeben haben, bei Ihnen zu forschen und zu arbeiten.

Daneben gilt mein Dank meinen Korrekturlesern Bernhard Rohlf und Thorsten Schütte, welche in zahlreichen Stunden Korrektur gelesen haben. Sie wiesen auf Schwächen hin und konnten mir als Fachfremde aufzeigen, an welchen Stellen weiterer Erklärungsbedarf bestand.

Nicht zuletzt gebührt meiner Familie und meinen Freunden Dank, die mich während der Anfertigung dieser Master-Thesis unterstützt und motiviert haben.

III Aufgabenstellung

Im Rahmen dieser Masterarbeit soll ein Rauchererkennungssystem ausgewählt werden welches für eine Installation im Frachtraum eines Flugzeugs geeignet ist. Die Aufgabe besteht zum einen aus der Auswahl geeigneter Anlagen, zum anderen aus der Durchführung und Auswertung von repräsentativen Tests zur Evaluierung der Leistungsfähigkeit.

Es sind die gültigen gesetzlichen Bestimmungen von Seiten der europäischen Agentur für Flugsicherheit (EASA) sowie weitere Richtlinien luftfahrtrechtlicher Organisationen zu berücksichtigen, besonders im Hinblick auf Gerätequalifizierung und Systemzertifizierung.

Arbeitsumfang

Folgende Aspekte sind im Rahmen der Masterarbeit zu untersuchen:

- Einführung in die Thematiken Lithium-Batterien und deren Brandverhalten sowie Grundlagen der Rauchdetektion
- Darlegung der Kundenanforderungen und der gesetzlichen Bestimmungen von Seiten der europäischen Agentur für Flugsicherheit (EASA) sowie anderer Institutionen
- Beschreibung der Kriterien für die Auswahl der zu testenden Rauchmeldesysteme
- Entwicklung von repräsentativen Tests zum Vergleich der unterschiedlichen Rauchmeldesysteme hinsichtlich ihrer Ansprechzeit
- Durchführung und Dokumentation der Testreihen
- Auswertung der Testergebnisse
- Entwicklung eines Integrationskonzepts für Frachträume unter Berücksichtigung der gültigen gesetzlichen Bestimmungen

IV Größen und Einheiten

Größe	Einheit	Abkürzung
Druck	Hektopascal	hPa
Länge	Meter	m
Länge	Zentimeter	cm
Länge	Millimeter	mm
Länge	Mikrometer	µm
Länge	Nanometer	nm
Leistung	Kilowatt	kW
Masse	Kilogramm	kg
Masse	Gramm	g
Spannung	Volt	V
Stromstärke	Milliampere	mA
Temperatur	Grad Celsius	°C
Verhältnis	Prozent	%
Volumen	Liter	l
Volumen	Milliliter	ml
Zeit	Minute	min
Zeit	Sekunde	s

V Abkürzungen und Symbole

Abkürzung	Bedeutung
A380	Flugzeug des Herstellers Airbus
AC	„alternating current“ - Wechselstrom
AFT	Hinten – Bezeichnung zur Beschreibung der Position der Unterdeck-Frachträume
ARINC	„Aeronautical Radio Incorporated“ (Organisation, die u. a. Luftfahrtstandards erstellt)
AS	„Aerospace Standard“ – Luft- und Raumfahrt Standard
B747-400F	Frachtversion des Großraumflugzeugs B747-400 des Herstellers Boeing
B777F	Frachtversion des Großraumflugzeugs B777 des Herstellers Boeing
BITE	„Built-in Test Equipment“ – Ausrüstung eines Systems um die eigene Funktionalität zu überprüfen.
bzw.	beziehungsweise
ca.	circa
CO	Kohlenstoffmonoxid
CS-25	„Certification Specifications and Acceptable Means of Compliance for Large Aeroplanes“
D	Durchmesser
DAL	„Design Assurance Level“ – Kategorien zur Einstufung von Systemen hinsichtlich ihrer Ausfallwahrscheinlichkeit und der daraus resultierenden Folgen
DIN	Deutsches Institut für Normung
DIN EN 54	Europäische Norm für Brandmeldeanlagen
DO 160 G	„Environmental Conditions and Test Procedures for Airborne Equipment“
EASA	„European Aviation Safety Agency“ – Europäische Agentur für Flugsicherheit
EFB	„Electronic Flight Bag“ – Elektronisches Gerät zur Informationsverwaltung für die Flugbesatzung
EN	Europäische Norm
FAA	„Federal Aviation Administration“ – Bundesluftfahrtbehörde der Vereinigten Staaten
FAR	„Federal Aviation Regulations“
FH	„flight hours“ - Flugstunden
FW	Vorne - Bezeichnung zur Beschreibung der Position der Unterdeck-Frachträume
i	Schrittweite bei der Berechnung einer Summe
IATA	„International Air Transport Association“ – Internationale Luftverkehrs-Vereinigung
ICAO	„International Civil Aviation Organization“ – Internationale Zivilluftfahrtorganisation
ID	Identifikationszeichenfolge

Abkürzung	Bedeutung
inkl.	inklusive
IR	Infrarot
IREB	„International Requirements Engineering Board“
Kat.	Kategorie
ld	Lichtdämpfung
LD	„Lower Deck“ - Unterdeck
LED	“light-emitting diode” – lichtemittierende Diode
LHT	Lufthansa Technik AG
Max./ max.	Maximal
MBSE	Modellbasiertes Systems Engineering
MD	„Main-Deck“ – Hauptdeck
MD-11F	Frachtversion des Großraumflugzeugs MD-11 des Herstellers McDonnell Douglas
Min/ min.	mindestens
MTBF	„Mean Time Between Failure“ – Mittlerer Zeitraum zwischen den Fehlerzuständen einer Komponente
n	Größe der Stichprobe
n/a	„not available“ – nicht verfügbar
o. g.	oben genannt
P	Punkt P
$R_{\text{meß}}$	Zu messender Widerstand
R_{ref}	Referenzwiderstand
s	Standardabweichung
s^2	Varianz
SAE	„Society of Automotive Engineers“
TF2	Testfeuer 2
TF5	Testfeuer 5
TF5A	Testfeuer 5A
u. a.	unter anderem
U_0	Ausgangsspannung
$U_{\text{meß}}$	Zu messende Spannung
UML	Unified Modeling Language
UPS	„United Parcel Service of America Inc.“ – globales Kurier-, Express-, und Paketdienstunternehmen
USB	„Universal Serial Bus“ – Serielles Bussystem zur Verbindung eines Computers mit externen Geräten
UV	Ultraviolett
x	x-Achse

Abkürzung	Bedeutung
x_1, x_2, \dots	Wert 1, Wert 2, ...
x_i	Wert an der Stelle i der Stichprobe
x_n	Letzter Messwert der Stichprobe
\bar{x}	Mittelwert einer Stichprobe
y	y -Achse
z	z -Achse
z. B.	zum Beispiel
ρ	Griechischer Buchstabe Rho – Radialkoordinate
φ	Griechischer Buchstabe Phi – Winkelkoordinate

VI Abbildungsverzeichnis

<i>Abbildung 1.</i> Feuer im Main-Deck-Frachtraum einer B747-400F von UPS[2].....	15
<i>Abbildung 2.</i> Umsetzungen bei einer Verbrennung.....	19
<i>Abbildung 3.</i> Größenbereiche [μm] unterschiedlicher Partikel.....	21
<i>Abbildung 4.</i> Rauchausbreitung eines Brandherds mit Hitzeentwicklung.....	22
<i>Abbildung 5.</i> Einteilung der Brandmeldesysteme nach detektierten Brandkenngrößen.....	23
<i>Abbildung 6.</i> Schematischer Aufbau eines Ionisationsrauchmelders [14].....	24
<i>Abbildung 7.</i> Schematischer Aufbau eines Streulichtrauchmelders [14].....	25
<i>Abbildung 8.</i> Schematischer Aufbau eines Durchlichtrauchmelders [14].....	25
<i>Abbildung 9.</i> Aufbau des Pyrolyseschwelbrands nach DIN EN 54, Anhang B [26].....	28
<i>Abbildung 10.</i> Pyrolyseschwelbrand nach DIN EN 54, Anhang B [14].....	28
<i>Abbildung 11.</i> Offener Flüssigkeitsbrand nach DIN EN 54, Anhang G [14].....	29
<i>Abbildung 12:</i> Aufbau des reduzierten offenen Flüssigkeitsbrands nach DIN EN 54, Anhang H [14].....	30
<i>Abbildung 13.</i> Main-Deck-Frachtraum einer B777F [41].....	32
<i>Abbildung 14.</i> Funktionenbaum nach VDI 2803 [50].....	42
<i>Abbildung 15.</i> Prüfvolumen zur Durchführung repräsentativer Rauchmeldertests.....	44
<i>Abbildung 16.</i> Zylinderkoordinaten [53].....	45
<i>Abbildung 17.</i> Positionierung der Rauchmeldereintrittsöffnungen und des Kameraobjektivs auf dem Messkreis.....	47
<i>Abbildung 18.</i> Positionierung der Ansaugrauchmelder an der Seitenwand des Prüfvolumens.....	48
<i>Abbildung 19.</i> Anordnung der Brandmeldesysteme im Prüfvolumen.....	50
<i>Abbildung 20.</i> Elektrischer Testaufbau und Datenerfassung.....	53
<i>Abbildung 21.</i> „Discrete“-Benutzeroberfläche der Software Bus Inspector Pro [58].....	54
<i>Abbildung 22.</i> Sichtfelder des Kamerabrandmelders oben beim Pyrolyseschwelbrand.....	62
<i>Abbildung 23.</i> Sichtfelder des Kamerabrandmelders unten beim Pyrolyseschwelbrand.....	62
<i>Abbildung 24.</i> Sichtfelder des Kamerabrandmelders oben beim Flüssigkeitsbrand.....	64
<i>Abbildung 25.</i> Sichtfelder des Kamerabrandmelders unten beim Flüssigkeitsbrand.....	64
<i>Abbildung 26.</i> Integrationskonzept für Ansaugrauchmelder in MD- und LD- Frachträumen.....	69

VII Diagrammverzeichnis

<i>Diagramm 1.</i> Relative Ansprechzeiten und Mittelwert für den Ansaugrauchmelder bei acht Pyrolyseschwelbränden (TF2).	58
<i>Diagramm 2.</i> Relative Ansprechzeiten und Mittelwert für den Ansaugrauchmelder bei acht reduzierten offenen Flüssigkeitsbränden (TF5A).	58
<i>Diagramm 3.</i> Relative Ansprechzeiten und Mittelwert für den Passivrauchmelder bei acht Pyrolyseschwelbränden (TF2).	59
<i>Diagramm 4.</i> Relative Ansprechzeiten und Mittelwert für den Passivrauchmelder bei acht reduzierten offenen Flüssigkeitsbränden (TF5A).	59
<i>Diagramm 5.</i> Relative Ansprechzeiten, Mittelwert und Trendlinie für den Lüftungsrachmelder bei acht Pyrolyseschwelbränden (TF2).	60
<i>Diagramm 6.</i> Vergleich der relativen Ansprechzeiten des Ansaugrauchmelders, des Passivrauchmelders und des Lüftungsrachmelders beim Pyrolyseschwelbrand.	65
<i>Diagramm 7.</i> Vergleich der relativen Ansprechzeiten des Ansaugrauchmelders und des Passivrauchmelders beim reduzierten offenen Flüssigkeitsbrand.	66

VIII Tabellenverzeichnis

Tabelle 1	<i>Messbare, physikalische Begleiterscheinungen von Brandkenngrößen</i>	20
Tabelle 2	<i>Sensibilitätsklassen von Rauchansaugsystemen nach DIN EN 54</i>	26
Tabelle 3	<i>Anforderungen an ein Brandmeldesystem im Frachtraum nach CS 25.858/FAR 25.858</i>	27
Tabelle 4	<i>Testbedingungen für Brandmeldesysteme im Frachtraum nach AS8036</i>	28
Tabelle 5	<i>Maße im Frachtraum einer B777F und einer MD-11F</i>	31
Tabelle 6	<i>Exemplarisches Filtern relevanter Punkte zur Formulierung von natürlichsprachigen Anforderungen an ein Brandmeldesystem im Frachtraum</i>	35
Tabelle 7	<i>Anforderungen zur Auswahl eines Brandmeldesystems für den Frachtraum</i>	36
Tabelle 8	<i>Ausgewählte Brandmeldesysteme für repräsentative Tests zum Vergleich der Ansprechzeiten [42, 44, 48, 49]</i>	40
Tabelle 9	<i>Lösungen zu Elementarfunktionen</i>	43
Tabelle 10	<i>Notation der UML für Aktivitätsdiagramme</i>	55
Tabelle 11	<i>Vergleich von Mittelwert und Standardabweichung der relativen Ansprechzeiten bei Pyrolyseschwelbrand und reduziertem offenen Flüssigkeitsbrand für den Ansaugrauchmelder</i>	58
Tabelle 12	<i>Vergleich von Mittelwert und Standardabweichung der relativen Ansprechzeiten bei Pyrolyseschwelbrand und reduziertem offenen Flüssigkeitsbrand für den Passivrauchmelder</i>	59
Tabelle 13	<i>Mittelwert und Standardabweichung der relativen Ansprechzeiten bei einem Pyrolyseschwelbrand für den Lüftungrauchmelder</i>	61
Tabelle 14	<i>Vergleich von Mittelwert und Standardabweichung des Passivrauchmelders, des Ansaugrauchmelders und des Lüftungrauchmelders bei Pyrolyseschwelbrand und reduziertem offenen Flüssigkeitsbrand</i>	67

1 Einführung

1.1 Anlass und Ziel

In den Jahren von 2006 bis 2016 wurde für drei Vorfälle von Bränden im Frachtraum das Mitführen von Lithium-Batterien als Brandursache oder als Ursache für einen Brandverlauf mit katastrophalen Auswirkungen identifiziert. Ein Brandvorfall ereignete sich im September 2010 22 Minuten nach dem Start in Dubai auf dem Hauptdeck („Main-Deck“ (MD)) einer B747-400F, einem Frachtflugzeug der Firma „United Parcel Service of America Inc.“ (UPS), Abbildung 1. Als Brandursprung konnte mit hoher Bestimmtheit ein Frachtcontainer festgestellt werden, der mit mehreren tausend Lithium-Batterien beladen war. Während des Brandverlaufs konnte die strukturelle Integrität des Flugzeugrumpfes nicht mehr aufrechterhalten werden. Die Zeitspanne zwischen der Entdeckung des Brands und der Notlandung am Flughafen Dubai betrug 27 Minuten und 45 Sekunden. Bei dem Vorfall kamen beide Piloten ums Leben. [1]



Abbildung 1. Feuer im Main-Deck-Frachtraum einer B747-400F von UPS[2].

Datum: 3. September 2010, Dubai Airport.

Lithium-Batterien werden in Lithium-Primär-Batterien (Lithium-Metall-Batterien) und Lithium-Sekundär-Batterien (Lithium-Ionen-Batterien) unterschieden [3]. Primärbatterien sind nicht wiederaufladbare Batterien [3]. Sekundärbatterien können wiederaufgeladen werden (Akku) [3]. Bei beiden Batterietypen kann ein thermisches Versagen auftreten, das mit dem sogenannten thermischen Durchgehen abschließt [3]. Das thermische Durchgehen ist eine sich selbst verstärkende exotherme Reaktion, bei der sehr schnell sehr hohe Temperaturen ($>660\text{ °C}$ [3]) erreicht werden [4]. Dabei kann es auch zur Entzündung des Lithiums kommen [4]. Die Stärke des thermischen Durchgehens hängt

vom Ladezustand, von der Umgebungstemperatur, von der Zellchemie und von der Konstruktion der Zelle ab [3].

Lithium-Batterien sind als Klasse 9 der Gefahrgutklassen der Vereinten Nationen zu kennzeichnen [5]. Die Klasse 9 steht für diverse gefährliche Substanzen und Waren, einschließlich umweltschädlicher Substanzen [6]. Solch eine Kennzeichnung erfordert einen Hinweis an die Piloten über den Bestand von Gefahrgütern in der Fracht [1]. Auch wenn eine Kennzeichnung gefährlicher Güter gesetzlich verpflichtend ist, so wird dieser Verpflichtung nicht in allen Fällen nachgekommen. Auch beim oben genannten Flug von UPS wurden Lithium-Batterien zwar als Fracht vermerkt, jedoch wurde keine der Sendungen offiziell als Gefahrgut der Klasse 9 ausgewiesen [1].

Während in einem Frachtraum der Klasse E (Main-Deck-Frachtraum in Frachtflugzeugen, für Mitglieder der Flugbesatzung zugänglich) Brände ausschließlich durch die Regelung der Belüftung beeinflusst werden können, wird bei einem Brand in Frachträumen der Klasse C (nicht zugänglich durch Mitglieder der Flugbesatzung) aktiv mit dem Mittel Halon 1301 gelöscht [7]. Von der amerikanischen Luftfahrtbehörde „Federal Aviation Administration“ (FAA) veranlasste Tests haben gezeigt, dass Halon 1301 weder in der Lage ist, das thermische Durchgehen von Lithium-Metall- noch von Lithium-Ionen-Batterien zu stoppen [1]. Es kann ausschließlich eine offene Flamme von Lithium-Ionen-Batterien, nicht jedoch von Lithium-Metall-Batterien, unterdrücken [1]. Dieses Ergebnis veranlasste dazu, den Transport von Lithium-Metall-Batterien auf Passagierflugzeugen zum 1. Januar 2015 zu verbieten [1].

Die internationale zivile Luftfahrtorganisation „International Civil Aviation Organisation“ (ICAO) hat seit 2014 drei multidisziplinäre Koordinationsveranstaltungen zum Thema „Transport von Lithium-Batterien“ durchgeführt und Handlungsempfehlungen, wie zum Beispiel die Entwicklung von Verpackungsstandards zur Risikominimierung für den Transport von Lithium-Batterien, erarbeitet [8–10]. Auch die FAA, die Flugsicherheitsbehörde der europäischen Union „European Aviation Safety Agency“ (EASA) und die internationale Luftverkehrs-Vereinigung „International Air Transport Association“ (IATA) veröffentlichten unterschiedliche Richtlinien und Hinweisdokumente, die unter anderem präventive Maßnahmen zum Thema Lithium-Batterien enthalten [11–13].

Um im Brandfall den Schaden so gering wie möglich zu halten, ist es essentiell, den Brand so früh wie möglich zu erkennen. Beim Flug der B747 von UPS wurde der Brand circa 10 bis 15 Minuten nach der Entzündung detektiert. Die Zeitspanne zwischen Detektion des Brands und dem Zeitpunkt, an dem das Feuer nicht mehr unter Kontrolle gebracht werden konnte, betrug hier circa 28 Minuten. In zwei weiteren Fällen, bei denen nachweislich Lithium-Batterien involviert waren, betrug die Zeitspanne 23 beziehungsweise 17 Minuten [1]. Je länger ein Brand andauert, desto mehr gerät die Unversehrtheit des Flugzeugs in Gefahr, was zu einem Ausfall von wichtigen Systemen, wie zum Beispiel der Flugsteuerung oder der Sauerstoffversorgung, führen kann.

Aufgrund der schnellen Brandentwicklungszeiten ist eine schnelle Branddetektion wichtig. Es soll überprüft werden ob konventionelle Rauchmeldesysteme in Flugzeugen einen Brand ausreichend schnell detektieren, oder ob es Brandmeldesysteme gibt, die einen Brand schneller detektieren, als die bestehenden Systeme. Um dieser Fragestellung nachzugehen werden repräsentative Tests durchgeführt, in denen bestehende Rauchmeldesysteme aus dem Flugzeug mit noch nicht luftfahrtzugelassenen Brandmeldesystemen hinsichtlich ihrer Ansprechzeit auf verschiedene Testfeuer verglichen werden. Dabei werden unterschiedliche Detektions-Technologien in Betracht gezogen.

1.2 Aufbau

Das erste Kapitel gibt Auskunft über den Anlass des Themas der Arbeit - die ausgehende Gefahr durch Lithium-Batterien beim Transport als Fracht im Flugzeug. Zudem wird als Zielsetzung der Vergleich von unterschiedlichen Brandmeldesystemen in repräsentativen Tests mit bereits im Flugzeug verbauten Brandmeldesystemen hinsichtlich ihrer Ansprechzeiten formuliert. Es folgt eine Übersicht über den Aufbau der Arbeit.

Die Theorie in Kapitel 2 vermittelt zum Verständnis dieser Arbeit notwendige Kenntnisse zu den Themen Branddetektion (Kapitel 2.1), Luftrechtliche Grundlagen (Kapitel 2.2), Anforderungen einer Frachtfluggesellschaft (Kapitel 2.3), Frachtraumcharakteristika (Kapitel 2.4), sowie mathematische Statistik (Kapitel 2.5).

Das Kapitel 3 führt durch die Spezifikation der repräsentativen Tests für den Vergleich der Brandmeldesysteme hinsichtlich ihrer Ansprechzeiten.

Für die Auswahl der Brandmeldesysteme (Kapitel 3.1) werden die Kapitel Branddetektion und Anforderungen einer Frachtfluggesellschaft herangezogen. Im Kapitel Branddetektion werden die Brandkenngrößen und ihre physikalisch messbaren Begleiterscheinungen zusammengefasst. Zusätzlich werden die Detektionstechnologien verschiedener Brandmeldesysteme aufgezeigt. Aus den Anforderungen einer Frachtfluggesellschaft werden relevante Anforderungen für die Auswahl der Brandmeldesysteme herausgefiltert. Dabei wird die Methode des Requirements Engineering verwendet.

Die Entwicklung des Testaufbaus (Kapitel 3.2) gliedert sich in die Anpassung der Testfeuer (Kapitel 3.2.1), die Konstruktion des Prüfvolumens (Kapitel 3.2.2), die Positionierung der Brandmeldesysteme (Kapitel 3.2.3), die Konfiguration der Brandmeldesysteme (Kapitel 3.2.4) und in den elektrischen Aufbau und die Datenerfassung (Kapitel 3.2.5). Für die Konstruktion des Prüfvolumens sowie für die Positionierung der Brandmeldesysteme wird auf Informationen über die zu verwendenden Testfeuer (Kapitel 2.2.3) sowie über die Eigenschaften von Frachträumen (Kapitel 2.4.1 und 2.4.2) und dort eingesetzten Brandmeldesystemen (Kapitel 2.4.3) zurückgegriffen. Dabei wird als Methode eine Funktionenanalyse verwendet. Die Konfiguration der Brandmeldesysteme sowie der elektrische Testaufbau basieren auf den technischen Daten der jeweiligen Brandmeldesysteme.

Das Kapitel 3.3 erläutert die Entwicklung der Testprozedur. Die Testprozedur greift auf die vorhergehenden Unterkapitel der Spezifikation von repräsentativen Tests zurück. Zur Entwicklung der Testprozedur wurde die Methode des modellbasierten Systems Engineering herangezogen.

In Kapitel 4 werden die in den Tests gemessenen Ansprechzeiten der Brandmeldesysteme ausgewertet. Nach einer Darstellung der Daten jedes Brandmeldesystems (Kapitel 4.1.1 bis 4.1.4) werden diese verglichen (Kapitel 4). Die Vergleiche werden anhand einer grafischen Auswertung sowie durch die Bildung der Größen arithmetisches Mittel und Standardabweichung vorgenommen. Es folgt ein Vergleich der Testergebnisse mit den luftrechtlichen Anforderungen an Brandmeldesysteme im Frachtraum (Kapitel 4.3). Die luftrechtlichen Anforderungen wurden in Kapitel 2.2.2 der Theorie dokumentiert.

In Kapitel 5 werden Erkenntnisse aus den Ergebnissen gezogen und bewertet. Außerdem werden Handlungsempfehlungen abgeleitet.

Kapitel 6 fasst die Ergebnisse dieser Arbeit zusammen.

Der Ausblick (Kapitel 7) zeigt neue Fragestellungen sowie zu überprüfende Sachverhalte auf.

2 Theorie

In den theoretischen Grundlagen werden die Themen Branddetektion, luftrechtliche Grundlagen zu Brandmeldesystemen im Frachtraum, Anforderungen einer Frachtfluggesellschaft an ein ergänzendes Brandmeldesystem im Frachtraum, Frachtraumcharakteristika sowie mathematische Statistik behandelt.

2.1 Branddetektion

Dieses Kapitel geht auf die physikalischen Kenngrößen eines Brands, die Rauchausbreitung eines Brandherds mit Hitzeentwicklung, die Funktionsprinzipien von Brandmeldesystemen sowie die Sensibilitätsklassen von Rauchsaugsystemen ein.

2.1.1 Brandkenngrößen

Bei einer Verbrennung finden eine energetische Umsetzung und eine stoffliche Umsetzung des Brandguts statt [14], *Abbildung 2*.

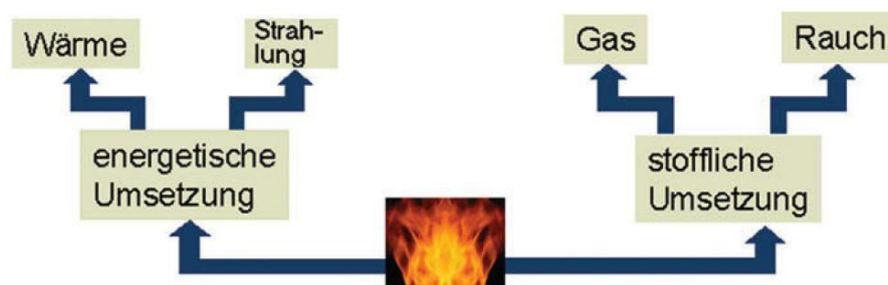


Abbildung 2. Umsetzungen bei einer Verbrennung.
Ausschnitt aus *Abbildung 23.11* nach [14].

Bei der energetischen Umsetzung entstehen Wärme und Strahlung [14]. Bei der stofflichen Umsetzung entstehen Gas und Rauch [14]. Diese Brandkenngrößen [14] werden genutzt, um mittels Brandmeldetechnik einen Brand zu erkennen. In *Tabelle 1* sind die zu erfassenden physikalischen Begleiterscheinungen zu jeder Brandkenngröße aufgelistet.

Tabelle 1
 Messbare, physikalische Begleiterscheinungen von Brandkenngrößen
 Eigene Darstellung nach [14]

Brandkenngröße	Messbare, physikalische Begleiterscheinung
Wärme	Temperaturgrenzwert
	Temperaturanstieg über die Zeit
Strahlung	Strahlungsintensität
	Strahlungsfrequenz
Gas	Auftreten einer Gaskonzentration
Rauch	Änderung eines Ionenstroms
	Streuung von Licht
	Dämpfung einer Lichtstrecke

Die Brandkenngröße Rauch bedarf einer weiteren Spezifikation. Rauch ist ein Aerosol, das sich unter anderem (u. a.) bei Verbrennungsprozessen bildet [15]. Als Aerosol wird ein Zweiphasensystem bezeichnet, das aus einer Gasphase und einer Partikelphase (Feststoffe oder Flüssigkeiten) besteht [16]. Die feinstverteilten Partikel [15], die in der Gasphase eines Rauchaerosols dispergieren, sind Dämpfe, Flüssigkeiten und Feststoffe [17]. Letztere sind zum Beispiel (z. B.) Asche [18] und Ruß [15]. Als Asche werden die zurückbleibenden anorganischen Bestandteile bei der restlosen Verbrennung organischer Substanzen bezeichnet [19]. Ruß ist ein schwarzes Pulver, das zu 80 bis 99,5% aus organischem Kohlenstoff besteht [20]. Es entsteht u. a. bei der Verbrennung von Kohlenwasserstoffen [20]. Einzelne Rußpartikel weisen Größen von 0,01 µm bis circa (ca.) 0,14 µm auf [14]. *Abbildung 3* zeigt neben Rauchaerosolen und Ruß die Größenbereiche unterschiedlicher Partikel. Rauchaerosole können größere Partikel als Ruß aufweisen, da sich an Ruß adsorbierte Schadstoffe sowie Asche im Rauchaerosol aufhalten [21]. Rauchaerosole treten bereits im Entstehungsbrand auf [21].

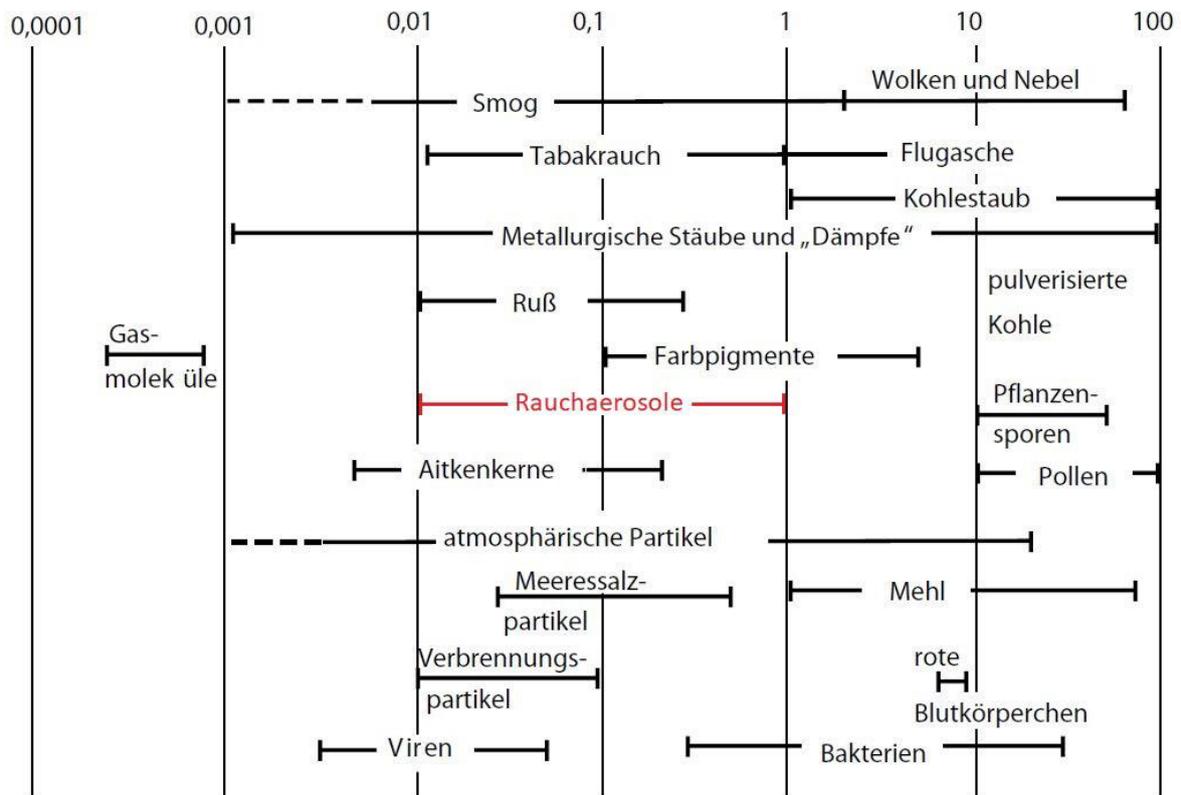


Abbildung 3. Größenbereiche [µm] unterschiedlicher Partikel.
Erweiterte Darstellung nach [14].

2.1.2 Rauchausbreitung eines Brandherds mit Hitzeentwicklung

Abbildung 4 zeigt die reguläre Rauchausbreitung bei einem Brandherd mit Hitzeentwicklung [22]. Der Rauch steigt an Orten großer Hitze nach oben und verteilt sich anschließend im Bereich unter der Decke strahlenförmig in alle Richtungen. Wenn ein Brandherd mittig in einem rechteckigen Raum platziert wird, kann eine gleichmäßige und gleichzeitige Ausbreitung des Rauchs in alle Ecken nicht mit Gewissheit vorausgesagt werden. Diese Gegebenheit muss bei der Positionierung der Brandmeldesysteme im Testaufbau beachtet werden, da andernfalls die Detektionseinheiten der Brandmeldesysteme nicht zur gleichen Zeit mit Rauch beaufschlagt würden. Dadurch würden die Ansprechzeiten der Brandmeldesysteme verfälscht.

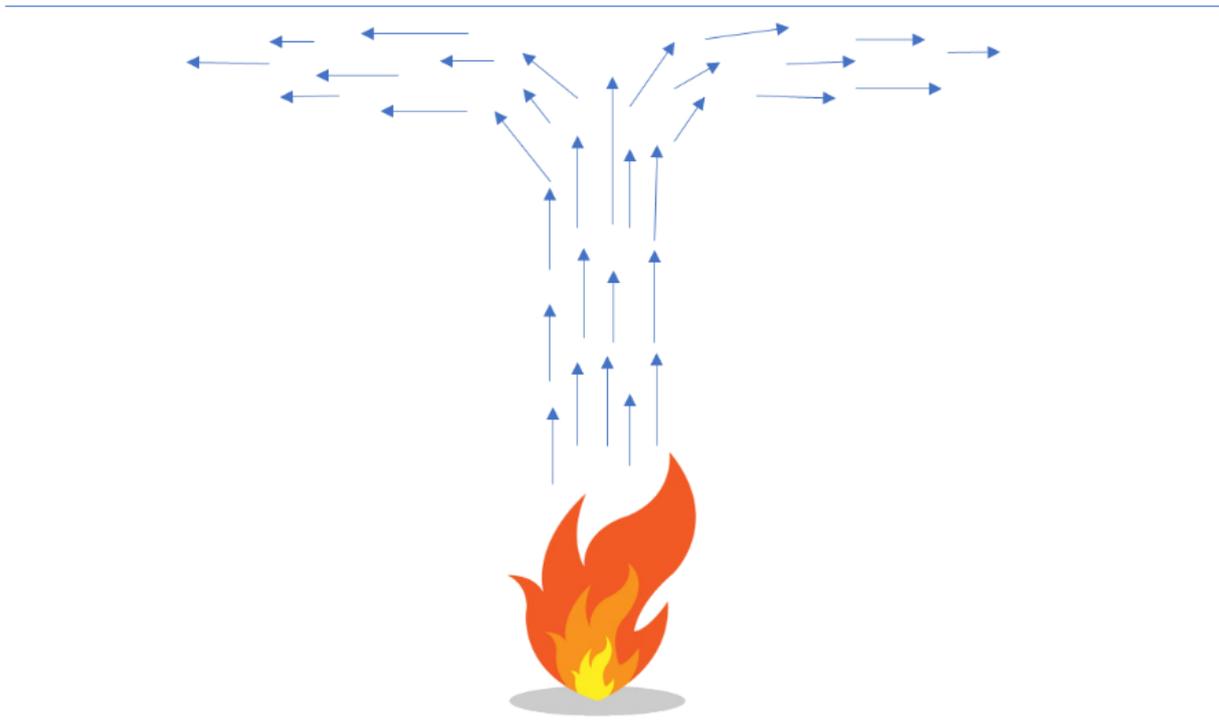


Abbildung 4. Rauchausbreitung eines Brandherds mit Hitzeentwicklung.
Eigene Darstellung nach[22]. Flamme aus [23]

2.1.3 Einteilung von Brandmeldesystemen

Brandmeldesysteme können nach unterschiedlichen Gesichtspunkten, wie z. B. nach ihrem Überwachungsbereich, nach ihrer Rücksetzbarkeit, nach ihrer Montageart oder nach ihren verwendeten Brandkenngrößen eingeteilt werden [23]. Letztere Einteilung ist in *Abbildung 5* abgebildet.

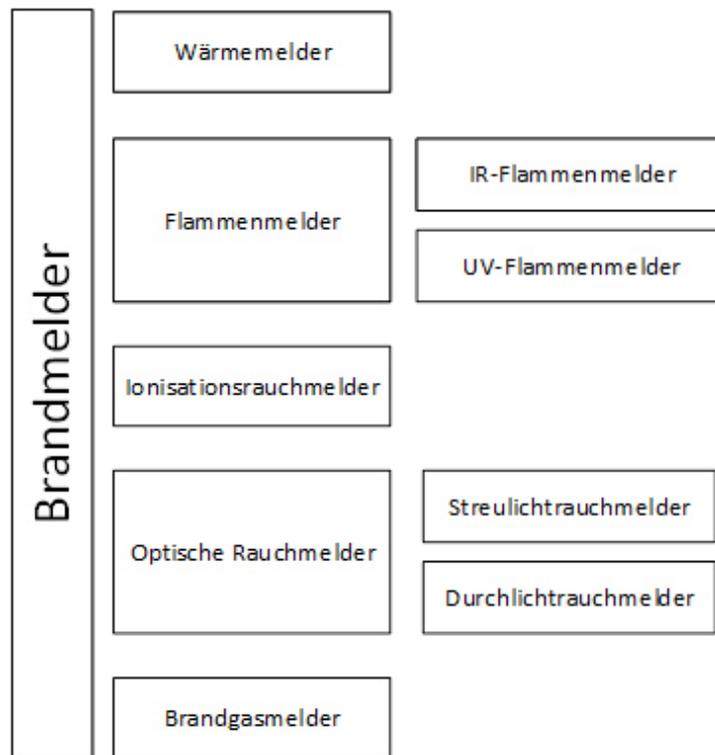


Abbildung 5. Einteilung der Brandmeldesysteme nach detektierten Brandkenngrößen.

Eigene Darstellung nach der DIN EN 54-1 [23].

Wärmemelder sprechen auf einen Temperaturanstieg an. Flammenmelder sprechen auf Strahlung an, die von den Flammen eines Brands ausgesendet werden. Hierbei kommen Infrarot (IR)-Flammenmelder und Ultraviolett (UV)-Flammenmelder zum Einsatz. Ionisationsrauchmelder sprechen auf Verbrennungsprodukte an, die den Ionisationsstrom in der Detektionseinheit beeinflussen. Optische Rauchmelder sprechen auf Verbrennungsprodukte an, die in der Lage sind, die Dämpfung oder Streuung von Lichtstrahlen im infraroten, sichtbaren oder ultravioletten Bereich des elektromagnetischen Spektrums zu beeinflussen. Brandgasmelder sprechen auf gasförmige Verbrennungsprodukte oder gasförmige Produkte einer thermischen Zersetzung, wie z. B. Kohlenstoffmonoxid, an. [23]

Kamerabrandmelder werden nicht in der DIN EN 54-1 genannt. Dennoch sind sie für den Verlauf der Arbeit relevant und werden betrachtet. Folgend werden die Funktionsprinzipien von Wärmemeldern, eines Flammenmelders, eines Ionisationsrauchmelders, eines Streulichrauchmelders, eines Durchlichrauchmelders und eines Kamerabrandmelders erklärt.

2.1.3.1 Wärmemelder

Wärmemelder können nach Wärmemaximal- und Wärmedifferentialmeldern, Tabelle 1, unterschieden werden. Beide Wärmemelder verwenden einen Thermistor, einen Halbleiter mit temperaturbedingtem Widerstand, zur Temperaturmessung und eine Auswerteeinheit. Die Auswerteeinheit detektiert bei Erreichen einer Maximaltemperatur (Wärmemaximalmelder) oder bei einem definierten Zeitverhalten des Wärmeanstiegs (Wärmedifferentialmelder). [14]

2.1.3.2 Flammenmelder

IR-Flammenmelder werden zur Detektion von offenen Flammen eingesetzt. Sie detektieren die von der Flamme ausgehende Strahlung, Tabelle 1. Dabei ist eine freie Sicht auf den Brandherd notwendig. Zur Unterscheidung von Flammen und Störgrößen, wie z. B. Sonnenstrahlung, werden mehrere Sensoren unterschiedlicher Wellenlängen-Ansprechbarkeit eingesetzt. [14]

2.1.3.3 Ionisationsrauchmelder

Der Ionisationsrauchmelder, *Abbildung 6*, beinhaltet zwei in Reihe geschaltete Ionisationskammern. Eine der Kammern ist für Rauch zugänglich. In jeder Kammer sind zwei Metallelektroden angebracht, an die eine Gleichspannung angelegt ist. Außerdem ist in jeder Kammer ein schwach radioaktiver Stoff eingebracht, der die Luft in der Kammer ionisiert. Bei Anlegen einer Spannung fließt ein Ionenstrom. Wenn Rauchaerosole in die Ionisationskammer eintreten, lagern sich die Ionen an den Rauchpartikeln an. Da die Beweglichkeit der Ionen durch die Masse der Rauchpartikel bestimmt wird, kommt es zu einer Stromminderung. Die Stromminderung wird nicht direkt gemessen, sondern ein Spannungsabfall über der geschlossenen Ionisationskammer. Bei einer definierten Grenze des Spannungsabfalls wird ein Brand detektiert. [14]

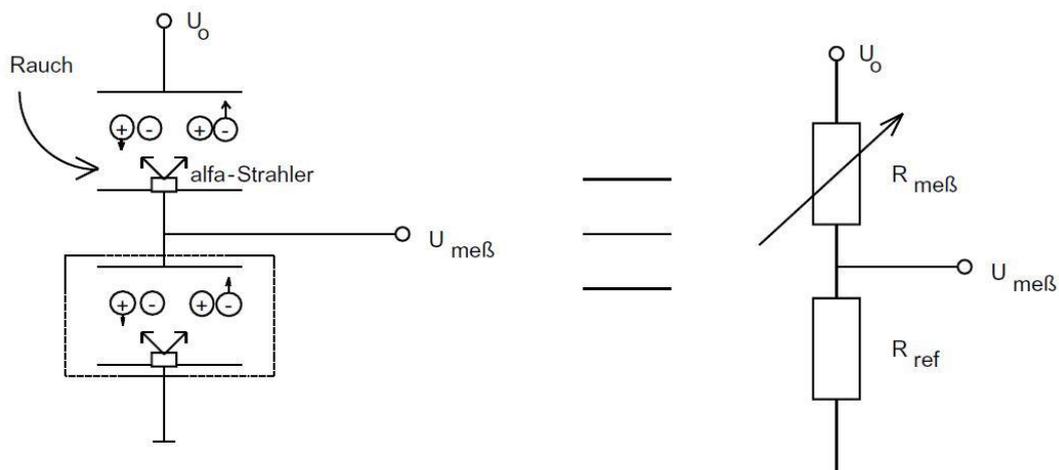


Abbildung 6. Schematischer Aufbau eines Ionisationsrauchmelders [14].

2.1.3.4 Streulichtrauchmelder

Streulichtrauchmelder, *Abbildung 7*, nutzen den Effekt der Lichtstreuung an Partikeln. Eine lichtemittierende Diode (LED) (900 nm, Infrarotbereich) ist auf eine lichtabsorbierende Fläche ausgerichtet. Eine Photodiode ist so angeordnet, dass der Lichtstrahl der LED im Normalzustand nicht auf sie trifft. Bei Eintritt von Rauchaerosolen in die Messkammer wird ein Teil des Lichts an den Rauchpartikeln gestreut und trifft auf die Photodiode. Durch das Empfangen von Licht einer definierten Intensität detektiert sie einen Brand [14]

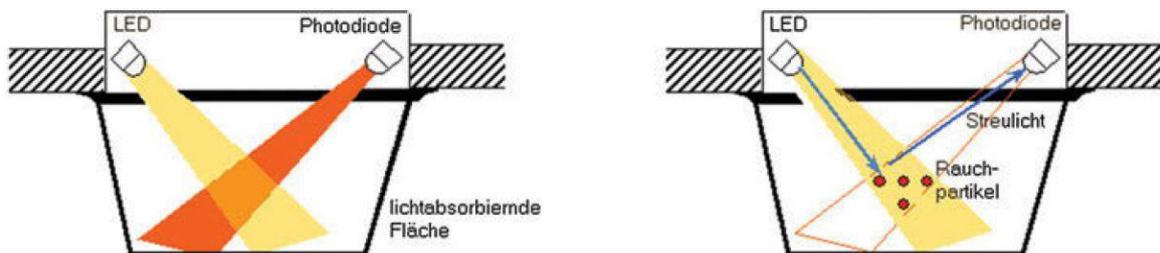


Abbildung 7. Schematischer Aufbau eines Streulichtrauchmelders [14].

Zusätzlich zu den Streulichtrauchmeldern mit einer LED gibt es Streulichtrauchmelder mit zwei LEDs, die je eine LED im Infrarotbereich und eine blaue LED (ca. 470 nm) im Bereich des sichtbaren Lichts beinhalten. Die blaue LED ermöglicht aufgrund der Abstrahlung von kürzeren Lichtwellen zusätzlich die Erfassung kleinerer Rauchpartikel, als die Partikel, die mit der LED im Infrarotbereich erkannt werden. [14]

2.1.3.5 Durchlichtrauchmelder

Durchlichtrauchmelder bestehen aus einem Lichtsender und einem Lichtempfänger, die gemeinsam eine Lichtschranke bilden, *Abbildung 8*. [14]

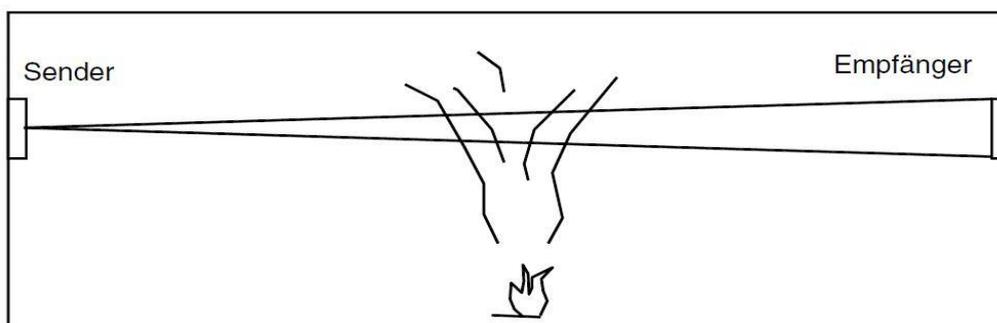


Abbildung 8. Schematischer Aufbau eines Durchlichtrauchmelders [14].

Im Betrieb erfährt der Empfänger eine definierte Lichtintensität. Der Eintritt von Rauchaerosolen in die Lichtschranke dämpft das Licht, sodass den Empfänger eine geringere Lichtintensität erreicht. Bei einer definierten Grenze der Lichtdämpfung wird ein Brand detektiert. [14]

2.1.3.6 Kamerabrandmelder

Für die Branderkennung mit einem Kamerasystem kann jede herkömmliche Videokamera verwendet werden, die ein Kamerabild mit hinreichender Qualität für diesen Zweck aufzeichnet. Eine Rauchdetektion erfolgt durch einen Rauchdetektionsalgorithmus auf einer Recheneinheit, welche das aufgezeichnete Bildmaterial in Echtzeit auswertet. Dabei werden Parameter wie Pixeländerungen, Farben, Bewegungsgeschwindigkeiten und Helligkeit analysiert [24]. Der Kamerabrandmelder ist bei der Rauchdetektion nicht auf ein Ankommen des Rauchs an seiner Montageposition angewiesen, da ausschließlich vertikale und horizontale Zugrichtungen des Rauchs erfasst werden [22]. Weiterhin existieren Kamerabrandmelder, die zusätzlich Flammen detektieren können. Sie analysieren Parameter wie z. B. Flammenfarbe, Flammenform und Flackerfrequenzen [22] [25].

2.1.4 Sensibilitätsklassen von Rauchansaugsystemen

Rauchansaugsysteme werden in die drei Sensibilitätsklassen A, B und C nach DIN EN 54-20 [26] eingeteilt, Tabelle 2.

Tabelle 2
Sensibilitätsklassen von Rauchansaugsystemen nach DIN EN 54
Eigene Darstellung nach DIN EN 54-20 [26, 27]

Klasse	Sensibilität	Einsatzbereich
Klasse A	Sehr hoch	Frühestmögliche Branderkennung, vor allem für stark klimatisierte Bereiche mit hoher Luftverdünnung.
Klasse B	Erhöht	Sehr frühe Branderkennung für die Mehrzahl der Bereiche, in denen wertvolle Güter und/oder Prozesse gesichert werden sollen.
Klasse C	Normal	Für Bereiche mit allgemeinen Brandschutzanforderungen.

2.2 Luftrechtliche Grundlagen

Das folgende Kapitel geht auf die luftrechtlichen Grundlagen unterschiedlicher Organisationen und Gremien zu Brandmeldesystemen im Frachtraum ein. Dazu werden Informationen aus relevanten Schriften der EASA, der FAA und der Society of Automotive Engineers (SAE) herangezogen.

2.2.1 EASA – European Aviation Safety Agency

Die EASA ist die Flugsicherheitsbehörde der Europäischen Union (EU) für die zivile Luftfahrt. Sie erstellt und überwacht hohe Sicherheits- und Umweltstandards auf europäischer Ebene. Zusätzlich zertifiziert und genehmigt sie Produkte und Organisationen im Bereich Lufttüchtigkeit [28]. Die EASA ist der Herausgeber der „Certification Specifications and Acceptable Means of Compliance for Large Aeroplanes“ (CS-25) [29]. In der CS-25 Revision 21 Abschnitt D befindet sich der Teil CS 25.858 über Feuerdetektionssysteme im Frachtraum „Cargo compartment fire detection systems“, Tabelle 3, [30]. Darin wird spezifiziert, dass die Einhaltung folgender Regeln durch das Rauch- oder Feuermeldesystem „smoke or fire detection system“ nachgewiesen werden muss [30].

2.2.2 FAA – Federal Aviation Administration

Die Bundesluftfahrtbehörde der Vereinigten Staaten „Federal Aviation Administration“ (FAA) ist das amerikanische Pendant zur EASA [31]. In den staatlichen Luftverkehrsvorschriften „Federal Aviation Regulations“ 25 (FAR-25) sind verglichen mit der CS-25 dieselben oder ähnliche Spezifikationen beschrieben [32]. Der für diese Arbeit relevante Paragraph 25.858 ist in den Revisionen 25 bis 93 in beiden Dokumenten deckungsgleich, Tabelle 3 [33].

Tabelle 3
Anforderungen an ein Brandmeldesystem im Frachtraum nach CS 25.858/FAR 25.858
Übersetzte Darstellung nach [30, 33]

ID	Anforderungen an ein Brandmeldesystem im Frachtraum
1	Das Detektionssystem muss innerhalb einer Minute nach Beginn eines Feuers einen visuellen Hinweis an die Flugbesatzung herausgeben.
2	Das Detektionssystem muss das Feuer bei einer Temperatur erkennen, die deutlich unter der Temperatur liegt, bei der die strukturelle Integrität eines Flugzeugs deutlich nachlässt.
3	Es müssen Mittel bereitgestellt werden, die es der Flugzeugbesatzung ermöglichen während des Fluges die Funktionstüchtigkeit jedes Rauch- oder Feuermelders zu überprüfen.
4	Die Wirksamkeit des Detektionssystems muss für alle genehmigten Betriebszustände und -bedingungen nachgewiesen sein.

2.2.3 SAE – Society of Automotive Engineers

Die „Society of Automotive Engineers“ (SAE) ist eine Organisation aus Ingenieuren und Experten aus dem Bereich Luft- und Raumfahrt, der Automobilindustrie und der Nutzfahrzeugindustrie. U. a. entwickelt die Organisation weltweit anerkannte Luftfahrtstandards. [34]

In dem Aerospace Standard AS8036 zum Testen von Brandmeldesystemen im Frachtraum definiert die SAE die Testatmosphäre, die Testposition der zu prüfenden Brandmeldesysteme und die anzuwendenden Testfeuer, Tabelle 4. [35]

Tabelle 4

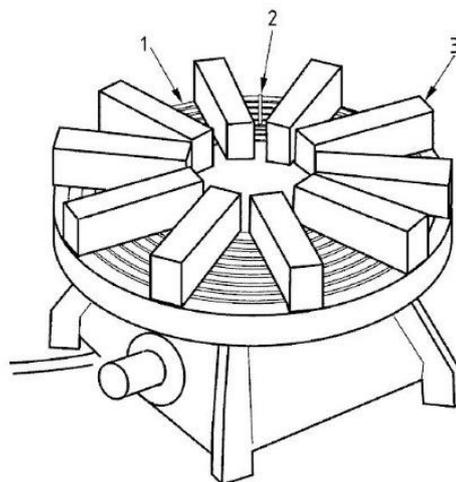
Testbedingungen für Brandmeldesysteme im Frachtraum nach AS8036

Eigene Darstellung nach [35]

Aspekt	Definition im AS8036
Testatmosphäre	Umgebungstemperatur: ca. 25 °C Umgebungsdruck: ca. 1013 hPa Relative Luftfeuchte: < 85 %
Testposition	Befestigung mit üblichen Befestigungsmitteln. Test in üblicher Einbau und Betriebsposition.
Testfeuer	Testfeuer 2 (Pyrolyseschwelbrand) nach DIN EN 54 Testfeuer 5 (Offener Flüssigkeitsbrand) nach DIN EN 54

2.2.3.1 Testfeuer 2 – Pyrolyseschwelbrand

Das Testfeuer 2 (TF2) aus der DIN EN 54 ist ein Pyrolyseschwelbrand, bei dem etwa 10 getrocknete Buchenholzstäbe mit einem Feuchtegehalt von etwa 5 % auf einer Heizplatte zum Schwelen gebracht werden, *Abbildung 9* [26].



Legende

- 1 Gerillte Heizplatte
- 2 Temperatursensor
- 3 Holzstäbe

Abbildung 9. Aufbau des Pyrolyseschwelbrands nach DIN EN 54, Anhang B [26].



Abbildung 10. Pyrolyseschwelbrand nach DIN EN 54, Anhang B [14].

Die Buchenholzstäbe müssen Maße von etwa 75 mm x 25 mm x 20 mm aufweisen. Die Heizplatte ist rund und besitzt einen Durchmesser von 220 mm. Die Leistung der Heizplatte soll etwa 2 kW betragen. Die Buchenholzstäbe sind nach *Abbildung 9* anzuordnen. Dabei müssen sie mit der 20 mm-Seite auf der Heizplatte aufliegen. Weitere Testfeuerbedingungen können der DIN EN 54 entnommen werden. Der Brandherd des Pyrolyseschmelbrands ist auf *Abbildung 10* dargestellt.

2.2.3.2 Testfeuer 5 – Offener Flüssigkeitsbrand

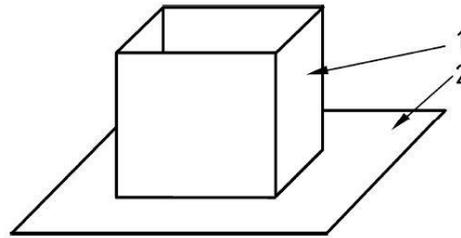
Das Testfeuer 5 (TF5) ist ein offener Flüssigkeitsbrand, bei dem etwa 650 g einer Mischung aus n-Heptan (Reinheit >99 %) mit etwa 3 % Toluol (Reinheit >99 %) in einer Stahlwanne entzündet wird. Die Stahlwanne muss quadratische Abmessungen von etwa 330 mm x 330 mm x 50 mm aufweisen. Das Gemisch soll durch eine Flamme oder einen Funken entzündet werden. Weitere Testfeuerbedingungen können der DIN EN 54 entnommen werden. *Abbildung 11* zeigt den Brandherd eines offenen Flüssigkeitsbrands.



Abbildung 11. Offener Flüssigkeitsbrand nach DIN EN 54, Anhang G [14].

2.2.3.3 Testfeuer 5A – Reduzierter offener Flüssigkeitsbrand

Das Testfeuer 5A (TF5A) ist ein reduzierter offener Flüssigkeitsbrand, bei dem etwa 200 ml n-Heptan in einer quadratischen Stahlwanne mit dem Maßen 100 mm x 100 mm x 100 mm verbrannt werden, *Abbildung 12* [26]. Die quadratische Stahlwanne steht auf einer Grundplatte aus Metall [26].



- Legende**
 1 Wanne
 2 Grundplatte

Abbildung 12: Aufbau des reduzierten offenen Flüssigkeitsbrands nach DIN EN 54, Anhang H [14].

Als Grundplatte kann die Stahlwanne des Testfeuers 5, Kapitel 2.2.3.2, verwendet werden [26].

2.3 Anforderungen einer Frachtfluggesellschaft

Frachtfluggesellschaften stellen diverse Anforderungen an Frachträume in Flugzeugen um ihre Ziele umzusetzen, wie z. B. den sicheren Transport von Fracht und Besatzung. Eine Frachtfluggesellschaft, deren Flotte überwiegend aus den Flugzeugmustern B777F und MD-11F des Herstellers Boeing besteht, hat im Rahmen einer Marktstudie Anforderungen an ein zusätzliches Brandmeldesystem im Frachtraum formuliert und zur Verfügung gestellt, *Anhang A 1*. Darin sind Anforderungen an ein Brandmeldesystem im Frachtraum sowie Gedanken zu den Detektionstechnologien, zu Hardware- und Softwareschnittstellen sowie zur Konfiguration im Frachtraum dokumentiert.

2.4 Frachtraumcharakteristika

Das Kapitel Frachtraumcharakteristika fasst Informationen zu den Dimensionen sowie zu der Farbgebung in Frachträumen zusammen. Diese Informationen werden zur Erarbeitung der Rauchmelder- tests genutzt, weil sie die Detektionsfähigkeit bestimmter Brandmeldesysteme beeinflussen können.

2.4.1 Dimensionen

In Tabelle 5 sind Maße aus den Main-Deck-Frachträumen sowie aus den vorderen „forward“ (FW) und hinteren „aft“ (AFT) Unterdeck „lower-deck“ (LD)-Frachträumen der Frachtflugzeuge B777F und MD-11F dargestellt. Die Dimensionen der Frachträume werden in den Tests für die Abstände zwischen Detektionseinheit und Brandherd herangezogen. Der Abstand zwischen der Ladungshöhe und der Decke ist für den Kamerabrandmelder ein wichtiger Parameter, da sein Sichtfeld durch die Ladungshöhe eingeschränkt ist. Weitere Dimensionen werden für die Erarbeitung eines Integrationskonzepts verwendet.

Tabelle 5
 Maße im Frachtraum einer B777F und einer MD-11F
 Eigene Darstellung nach [36–40]

Bezeichnung	Maß [m]	
	B777F	MD-11F
MD Länge	52,4	44
MD Breite	5,82	5,69
MD Höhe	3,05	2,86
MD Ladungshöhe	2,4	2,477
MD Abstand Ladungshöhe – Decke	0,65	0,383
LD FW Länge	14,96 – 20,3	n/a
LD FW Breite	3,1880 – 4,166	3,1880 – 4,166
LD FW Höhe	1,686	1,676
LD FW Ladungshöhe	1,63	1,626
LD FW Abstand Ladungshöhe – Decke	0,076	0,05
LD AFT Länge	11,36	n/a
LD AFT Breite	3,1880 – 4,166	3,1880 – 4,166
LD AFT Höhe	1,686	1,676
LD AFT Ladungshöhe	1,63	1,626
LD AFT Abstand Ladungshöhe - Decke	0,066	0,05
LD3-Frachtcontainer - Länge	1,56	1,56
LD3-Frachtcontainer - Breite	1,53 – 2,01	1,53 – 2,01
LD3-Frachtcontainer - Höhe	1,63	1,63

2.4.2 Farbgebung

Die Farbgebung im Frachtraum ist ausschließlich für die Verwendung eines Kamerabrandmelders entscheidend, da für die Detektion ein Kontrast zwischen dem Hintergrund und dem Rauch benötigt wird. In *Abbildung 13* ist der unbenutzte Main-Deck-Frachtraum einer B777F abgebildet. Die Seiten- und Deckenverkleidungen sind im Regelfall in einem matten Weißton lackiert [41]. Dies ist ein Beispiel für die farbliche Gestaltung im Frachtraum. In weiteren Frachträumen weichen die Weißtöne unter Umständen ab.

Über die Lebensdauer des Flugzeugs kann der Frachtraum unterschiedlichen Witterungsbedingungen ausgesetzt sein. Z. B. wird in trockenen Wüstengebieten Sand und Dreck eingetragen oder in kalten Gebieten Schnee und Feuchtigkeit. Diese und noch weitere Umstände führen dazu, dass die Verkleidung im Frachtraum abnutzt und neben der Ursprungslackierung ein breites Spektrum an Graustufen bis hin zu Schwarz aufweisen kann. Zudem sind Frachträume ausschließlich während der Beladung beleuchtet. Während des Flugs ist keine Beleuchtung der Frachträume vorgesehen.



Abbildung 13. Main-Deck-Frachtraum einer B777F [41].

2.4.3 Brandmeldesysteme

In den Frachträumen der A380 wird ein Passivrauchmelder verwendet [42, 43]. Dort ist er an mehreren Positionen mittig in die Decke eingelassen [43]. Es befindet sich nicht über jedem Frachtcontainer ein Passivrauchmelder. Dadurch kommt es vor, dass sich bei einem Brand im Frachtcontainer, der nächste Passivrauchmelder nicht direkt über dem Brandherd befindet.

Der ebenfalls im A380 verbaute Lüftungsrauchmelder [44, 45] ist nicht im Frachtraum angebracht, sondern auf dem Lüftungsrohr der Abluft des Avionikraums [45]. Der Lüftungsrauchmelder entnimmt im Flugzeug die Probe aus dem Lüftungsrohr des flugzeugeigenen Klimatisierungssystems und wird dadurch zwangsbelüftet.

2.5 Mathematische Statistik

Zur Auswertung der repräsentativen Tests, Kapitel 4, wird mathematische Statistik verwendet. Die Verwendung des Erwartungswerts aus der Stochastik wurde ausgeschlossen, weil bei jeder Versuchsdurchführung dieselben Testbedingungen sichergestellt wurden. Dadurch ist in der Theorie bei jeder Versuchsdurchführung dieselbe Ansprechzeit für ein Brandmeldesystem zu erwarten. Die gemessenen Ansprechzeiten können demnach nicht unterschiedlich gewichtet werden. Die

Verwendung und Darstellung geometrischer Lageparameter wie des Medians einer Messreihe wurde ausgeschlossen, da sich aus dieser Größe keine hinreichenden Erkenntnisse für den Vergleich der Ansprechzeiten der Brandmeldesysteme ziehen lassen. Die Streuung der Messwerte, die sich geometrisch über die Lageparameter Quantile abbilden lässt, kann für die Testauswertung stattdessen ebenso gut mit der Größe Standardabweichung bewertet werden. Folgend wurde sich für die Verwendung des arithmetischen Mittels entschieden, die jeden Messwert aus dem kontinuierlichen Wertebereich der Tests als gleich wahrscheinlich betrachtet. Zusätzlich wurde die Standardabweichung als Maß für die Streuung der Einzelmesswerte um das arithmetische Mittel verwendet.

2.5.1 Arithmetisches Mittel

Das arithmetische Mittel \bar{x} (1) einer Stichprobe der Größe n aus den Werten x_1, x_2, \dots, x_n definiert sich wie folgt [46]:

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i \quad (1)$$

2.5.2 Standardabweichung

Zur Beschreibung der Streuung der Einzelwerte x_i um das arithmetische Mittel \bar{x} wird die Standardabweichung s verwendet (2). Sie bildet sich aus der Quadratwurzel der Varianz s^2 und trägt dieselbe Einheit wie die Einzelwerte der Stichprobe [46].

$$s = \sqrt{s^2} = \sqrt{\frac{(x_1 - \bar{x})^2 + (x_2 - \bar{x})^2 + \dots + (x_n - \bar{x})^2}{n - 1}} = \sqrt{\frac{1}{n - 1} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (2)$$

Für die Auswertung der Messergebnisse wurden die absoluten Ansprechzeiten auf einen Referenzwert, die größte gemessene Ansprechzeit aus beiden Messreihen, bezogen und somit relativiert. Anschließend wurden das arithmetische Mittel und die Standardabweichung aus den relativen Ansprechzeiten gebildet.

3 Methodik zur Spezifikation repräsentativer Tests

Für die Spezifikation von repräsentativen Tests wurden als erstes die zu testenden Brandmeldesysteme ausgewählt. Anschließend wurde ein Testaufbau entwickelt. Zum Schluss wurde eine Testprozedur zur Durchführung und Dokumentation der Tests erarbeitet.

3.1 Auswahl der Brandmeldesysteme unter Verwendung von Requirements Engineering nach dem IREB-Standard

Requirements Engineering bezeichnet einen systematischen Ansatz zur Spezifikation und zur Verwaltung von Anforderungen innerhalb eines Projekts. Dabei werden Ziele wie z. B. das Erkennen von Anforderungen, die Konformität von Anforderungen zu vorgegebenen Standards, die Einbeziehung von Wünschen der Projektbetroffenen und die Dokumentation und die Verwaltung von Anforderungen verfolgt. [47]

Im Rahmen des Projekts muss das zu entwickelnde System klar definiert und gegenüber der Umgebung abgegrenzt sein. Gleichzeitig wird der Systemkontext, der Teil der Umgebung mit einem Bezug zum System, betrachtet. Er ist für die Definition und das Verständnis der Anforderungen an das betrachtete System von Bedeutung. [47]

Als Anforderungen werden Bedingungen oder Fähigkeiten bezeichnet, die zur Lösung eines Problems oder zur Erreichung eines Ziels benötigt werden beziehungsweise (bzw.) die ein System oder Teilsystem erfüllen oder besitzen muss. Eine Anforderung ist durch die Qualitätskriterien Abgestimmtheit unter den Projektbetroffenen, Eindeutigkeit, Notwendigkeit, Konsistenz, Prüfbarkeit, Realisierbarkeit, Verfolgbarkeit, Vollständigkeit und Verständlichkeit gekennzeichnet. Anforderungen werden in drei Arten unterschieden. Es gibt funktionale Anforderungen, Qualitätsanforderungen und Randbedingungen. Eine funktionale Anforderung beschreibt eine Funktionalität, die das System bereitstellen soll. Eine Qualitätsanforderung bezieht sich auf ein Qualitätsmerkmal, wie z. B. die Verfügbarkeit. Randbedingungen sind Anforderungen, die den Lösungsraum des zu entwickelnden Systems einschränken. [47]

Anforderungen können in natürlicher Sprache oder durch konzeptuelle Modelle dokumentiert werden. Der Vorteil der natürlichen Sprache ist, dass sie den Projektbetroffenen bereits bekannt ist. Jedoch kann eine natürlichsprachige Dokumentation der Anforderungen von den Projektbetroffenen unterschiedlich interpretiert werden, wenn sie nicht eindeutig formuliert ist. Zum Arbeiten mit konzeptuellen Modellen ist das Erlernen einer neuen Notation erforderlich. Diese muss erst von den Projektbetroffenen erlernt werden, kann dem Leser jedoch das Verständnis erleichtern, da weniger Möglichkeiten zur Interpretation gelassen werden. [47]

Die Methode des Requirements Engineering wird für die Auswahl der Brandmeldesysteme für die Tests herangezogen. Als zu entwickelndes System wird der Testaufbau einschließlich aller

Komponenten betrachtet. Die Brandmeldesysteme werden als Teilsystem des Testaufbaus betrachtet. Zum Systemkontext der auszuwählenden Brandmeldesysteme werden die Frachtraumeigenschaften wie Geometrie und Farbgebung, Schnittstellen zum Flugzeug sowie die Umgebungsbedingungen Temperatur, Luftdruck und relative Luftfeuchte im Frachtraum gezählt.

Zur Auswahl der Brandmeldesysteme werden zuerst als nicht relevant betrachtete Überlegungen aus den Anforderungen einer Frachtfluggesellschaft, Kapitel 2.2, eliminiert. Punkte, die ausgearbeitet werden sollen und als Anforderung zur Auswahl der Brandmeldesysteme dienen sollen, werden beibehalten. Für die Auswahl der Brandmeldesysteme werden vorerst alle Technologien in Betracht gezogen. Exemplarisch ist in Tabelle 6 das Herausfiltern von relevanten Punkten, die als Anforderungen dienen sollen, aufgezeigt.

Tabelle 6
Exemplarisches Filtern relevanter Punkte zur Formulierung von natürlichsprachigen Anforderungen an ein Brandmeldesystem im Frachtraum

Problem	Überlegungen und Lösungen	Relevante Fragestellungen	Kommentar
Wie kann das System in einer Flotte von Boeing 777 und MD11 Flugzeugen installiert werden?	Max. Frachthöhe	Installation ohne Primärstruktur zu verändern möglich?	Frachtraumcharakteristika werden als Randbedingungen hinzugezogen.
	B777: 160cm/315cm (main/lower) MD11: max. 160cm/ 240cm	Optimale Positionierung? (Anzahl, Position seitlich/mittig, 360°)	Optimale Positionierung kann erst nach Auswahl eines geeigneten Systems definiert werden.

Anschließend werden die relevanten Punkte aus *Anhang A 1* in Anforderungen natürlicher Sprache umformuliert und weiter spezifiziert und um selbst festgelegte Anforderungen ergänzt. Die Anforderungen werden als funktionale Anforderungen (F), Qualitätsanforderungen (Q) und Randbedingungen (R) gekennzeichnet, *Anhang A 2*. Dann werden die Anforderungen mit den zur Verfügung stehenden Daten der Brandmeldesysteme abgeglichen und nicht bewertbare Anforderungen eliminiert. In Tabelle 7 sind alle verbleibenden Anforderungen, in *Anhang A 2* in fettem Schriftbild geschrieben, enthalten, die zur Bewertung der Brandmeldesysteme herangezogen werden.

Tabelle 7

Anforderungen zur Auswahl eines Brandmeldesystems für den Frachtraum

Kategorie	ID	Ebene 1	ID	Ebene 2	ID	Ebene 3
Geometrie und technische Anforderungen (A)	A2	Das System soll weniger wiegen als 40 kg. (Q)				
	B1	Das System muss eine flugzeugbasierte Lösung sein. (Kunde) (Q)				
	B4	Das System soll innerhalb eines C-Checks nachrüstbar sein. (Q)				
Integration (B)	B5	Das Rauchmeldesystem soll mit einer Betriebsspannung von 28V gespeist werden. (Q)				
	C1	Das Rauchmeldesystem muss einen Brand in den Frachtcontainern (ohne Sicht auf den Brandherd) innerhalb von einer Minute nach seiner Entstehung detektieren. (CS 25.858) (F)	C1.1	Das Rauchmeldesystem kann eine Temperaturänderung detektieren. (F)	C1.1.1	Das Rauchmeldesystem kann einen signifikanten Temperaturanstieg (bedarf weiterer Spezifikation) innerhalb eines Zeitraums von einer Minute in einem Frachtcontainer detektieren. (F)

Kategorie	ID	Ebene 1	ID	Ebene 2	ID	Ebene 3
					C1.1.2	Das Rauchmeldesystem kann die Überschreitung einer definierten Maximaltemperatur (bedarf weiterer Spezifikation) in einem Frachtcontainer innerhalb von einer Minute detektieren. (F)
			C1.2	Das Rauchmeldesystem muss eine signifikante Aerosolkonzentration (bedarf weiterer Spezifikation) in einem Frachtcontainer innerhalb von einer Minute detektieren. (Kunde) (F)		
			C1.3	Das Rauchmeldesystem kann eine signifikante CO-Konzentration (bedarf weiterer Spezifikation) innerhalb von einer Minute detektieren. (F)		
			C1.4	Das Rauchmeldesystem kann Flammen (bedarf weiterer Spezifikation) innerhalb von einer Minute detektieren. (Kunde) (F)		
C3		Das Rauchmeldesystem muss durch eine Software überwacht werden.	C3.2	Eine Lokation des Brandereignisses im Frachtraum soll möglich sein. (Kunde) (F)		

Kategorie	Ebene 1		Ebene 2		Ebene 3	
	ID		ID		ID	
	C4	Bei einem Brandereignis muss ein Alarm für die Flightcrew vorhanden sein.	C4.3	Es soll mehr als eine Alarmstufe programmierbar sein. (F)		
			C4.4	Die Schwellen der Alarme sollen frei wählbar sein. (F)	C4.4.1	Die Schwelle des Voralarms soll frei wählbar sein. (F)
					C4.4.2	Die Schwelle des Hauptalarms soll frei wählbar sein. (F)
			C4.5	Bei Detektion mehrerer Brandkenngrößen soll das Alarmsignal einen Hinweis auf die Art der Brandkenngröße geben. (Kunde) (F)		
	C6	Die Daten von > 100 Ereignissen (Brand, Fehlalarm) sollen gespeichert werden. (F)				
	C7	Es soll Schnittstellen vorhanden sein. (F)				
	C8	Das System soll seine Funktionalität ständig überprüfen und bei einer Störung diese der Flugbesatzung melden. (BITE) (Kunde) (F)				

In *Anhang A 3* und *Anhang A 4* sind alle relevanten zur Verfügung stehenden Daten zu den zur Auswahl stehenden Rauchansaugsystemen und Kamerabrandmeldern notiert. Die Gründe zum Ausschluss weiterer Technologien ist dem Kapitel 3.1 zu entnehmen. Aus oben genannten (o. g.) Anhängen kann die Erfüllung jedes Kriteriums durch die zur Auswahl stehenden Brandmeldesysteme entnommen werden. Tabellenfelder, die in *Anhang A 3* und *Anhang A 4* durch ein „n/a“ gekennzeichnet sind, bedeuten ein Nichtvorhandensein von Informationen. Informationen, die keinen Bezug zu den Anforderungen haben aber dennoch Spalten gesammelt wurden, sind ergänzende Informationen. An bestimmten Stellen ist es nötig, die ergänzenden Informationen zur Bewertung hinzuzuziehen, da sonst kein Ergebnis ermittelt werden kann. In *Anhang A 3* und *Anhang A 4* sind

ebenfalls die Ausschlusskriterien für die einzelnen nicht im Test verwendeten Brandmeldesysteme vermerkt.

Bei der Auswahl der Brandmeldesysteme für die Tests wurden reine Wärmemelder, reine Flammenmelder und reine Durchlichtrauchmelder für eine Anwendung im Flugzeug aus den untenstehenden Gründen ausgeschlossen.

Als Brandmeldesystem ist ein flugzeugbasiertes System, Tabelle 7, ID B1, gefordert und es wird u. a. aufgrund des Logistik- und Wartungsaufwands kein Brandmeldesystem akzeptiert, das in oder an einem Frachtcontainer verbaut ist. Es gibt viele unterschiedliche Arten von Frachtcontainern und Paletten mit unterschiedlichen Eigenschaften. Einige Frachtcontainer sind luftdicht, andere ermöglichen den Austritt von Rauch und Gasen. Einige Frachtcontainer sind wärmeisoliert, andere sind es nicht. Es ist nicht mit Sicherheit vorherzusagen, welche Brandkenngröße als erstes von einem Brandmeldesystem detektiert werden kann, das außerhalb eines Frachtcontainers verbaut ist. Für die Detektion von Wärme wäre eine großflächige Überwachung der Frachtcontainerwände notwendig. Solch eine Integration des Brandmeldesystems wäre aufgrund der sehr dicht gestellten Frachtcontainer und dem geringen Platz zu Wänden und Decken im Frachtraum schwer zu realisieren. Zudem würde eine Integration hinter den Verkleidungen um das System vor Beschädigungen zu schützen die Detektionssensibilität deutlich vermindern. Aus diesen Gründen ist nach dem heutigen Kenntnisstand die Detektion von Rauchaerosolen zu bevorzugen. Da Rauchaerosole, wie in Kapitel 2.1.1 beschrieben, eine Brandkenngröße ist, die bereits im Entstehungsbrand vorhanden ist, ist anzunehmen, dass eine Rauchdetektion außerhalb eines luftdurchlässigen Frachtcontainers zu einem früheren Zeitpunkt möglich ist als eine Wärmedetektion.

Wie in Kapitel 2.1.3.2 beschrieben, benötigt ein Flammenmelder direkte Sicht auf den Brandherd, um einen Brand zu detektieren. Diese kann durch ein Verbauen außerhalb des Frachtcontainers, Tabelle 7, ID B1, nicht gewährleistet werden, vor allem nicht, wenn ein Brand in einem Frachtcontainer detektiert werden soll.

Bei einem Durchlichtrauchmelder, wie in Kapitel 2.1.3.5 beschrieben, müssen Sender- und Empfängereinheiten mit einer bestimmten Genauigkeit aufeinander ausgerichtet sein. Durch eine Torsion des Rumpfes während des Fluges ist es denkbar, dass Sender- und Empfängereinheit ihren Kontakt verlieren. Auch kann ein nicht den Regeln entsprechendes Beladen von Paletten zu einer Versperrung der Sender/Empfänger-Kontakts führen.

Die Auswertung von *Anhang A 3* und *Anhang A 4* führt zu folgender Auswahl an Brandmeldesystemen, die in repräsentativen Tests hinsichtlich ihrer Ansprechzeiten auf zwei verschiedene Testfeuer verglichen werden sollen, Tabelle 8. Die Produktbezeichnungen wurden pseudonymisiert und werden im Folgenden mit der Angabe ihrer Art, Tabelle 8, als Ansaugrauchmelder, Passivrauchmelder, Lüftungsrachmelder und Kamerabrandmelder bezeichnet.

Tabelle 8

Ausgewählte Brandmeldesysteme für repräsentative Tests zum Vergleich der Ansprechzeiten [42, 44, 48, 49]

Art	Ansaug- rauchmelder	Passiv- rauchmelder	Lüftungs- rauchmelder	Kamera- brandmelder
Detektions- größe	Rauchaerosol	Rauchaerosol	Rauchaerosol	Rauchaerosol und Flammen
Detektions- art	Optisch, nach Durchlicht- prinzip.	Optisch, nach Streulicht- prinzip.	Optisch, nach Streulicht- prinzip.	Bildanalyse, Algorithmus

Der Passivrauchmelder und der Lüftungsrachmelder werden bereits in der A380 von Airbus, Kapitel 2.4.3, verwendet. Folglich dienten sie in den Tests als Referenz, sodass die weiteren zwei Technologien mit ihnen verglichen werden konnten.

Der Ansaugrauchmelder 2 wurde aus zehn zur Auswahl stehenden Ansaugrauchmeldern ausgewählt, *Anhang A 3*. Der Ansaugrauchmelder 2 hat im Vergleich zu den weiteren Ansaugrauchmeldern einen sehr großen Sensibilitätswertebereich, Tabelle 7, ID C4.3 und C4.4. Die Möglichkeit Ansaugrohre von bis zu 170 m Länge anzuschließen ist ausreichend, um mit einer Meldereinheit den gesamten Main-Deck-Frachtraum abzudecken. Die weiteren betrachteten Ansaugrauchmelder teilweise noch größere Bereiche erfassen. Sie wären für den Zweck im Frachtraum jedoch überdimensioniert. Der Ansaugrauchmelder 2 kann bei einer Spannung von 18 V Gleichspannung bis 30 V Gleichspannung betrieben werden. Somit ist eine Versorgung mit 28 V Gleichspannung durch die 28 V-Verteilerschiene im Flugzeug möglich, Tabelle 7, ID B5. Hierbei stehen ihm die weiteren betrachteten Rauchansaugsysteme in nichts nach. Im Vergleich zu den weiteren betrachteten Rauchansaugsystemen liegt sein Gewicht mit 3,74 kg im Mittelfeld, Tabelle 7, ID A2. Der Ansaugrauchmelder 2 kann 18000 Ereignisse speichern und erfüllt das Kriterium mindestens 100 Ereignisse zu speichern. Außerdem hat er drei programmierbare Alarmschwellen, Tabelle 7, ID C4.3 und C4.4. Die weiteren Brandmeldesysteme haben eine größere Anzahl an Alarmschwellen, die jedoch nicht benötigt werden. Der Ansaugrauchmelder 2 verfügt über eine Ethernet- und eine „Universal Serial Bus“ (USB)-Schnittstelle und kann diskrete Pegel ausgeben, Tabelle 7, ID C7. Das Vorhandensein der USB-Schnittstelle unterscheidet ihn von den übrigen Rauchansaugsystemen. Durch den Einsatz einer einzelnen Detektionseinheit ist keine Lokalisation des Brands innerhalb des überwachten Bereichs möglich, Tabelle 7, ID C3.2. Diese Funktion können die weiteren Brandmeldesysteme allerdings ebenfalls nicht bieten.

Bei den Kamerabrandmeldern standen 5 Geräte zur Bewertung. Bis auf den Kamerabrandmelder 5 stammen alle Kamerabrandmelder aus dem Luftfahrtbereich und sind für eine Anwendung im Flugzeug vorgesehen. Aus diesem Grund halten die Kamerabrandmelder für die Luftfahrt teilweise für eine Integration in das Flugzeug relevante Schnittstellen vor. Außerdem werden sie regulär mit einer Versorgungsspannung von 28 V Gleichstrom gespeist, Tabelle 7, ID B5, wie sie auch im Flugzeug

bereitgestellt wird. Der Kamerabrandmelder 5 hat zwei wesentliche Vorteile gegenüber den übrigen Kamerabrandmeldern. Erstens wurde die Recheneinheit direkt in das Gehäuse der Kamera integriert, sodass keine zusätzliche Servereinheit benötigt wird. Zweitens ist er in der Lage, sowohl Rauch als auch Flammen zu detektieren. Die übrigen Kamerabrandmelder sind ausschließlich für eine Rauchdetektion ausgelegt. Kamerabrandmelder 1 bis 3 betrachteten Kamerabrandmeldern waren nicht verfügbar. Über Kamerabrandmelder 4 lagen zu wenig Daten vor, um einen sinnvollen Vergleich anstellen zu können. Daraus folgte die Auswahl des Kamerabrandmelders 5 aus den fünf zur Auswahl stehenden Kamerabrandmeldern, *Anhang A 4*.

Die ausgewählten Brandmeldesysteme erfüllen die Anforderungen ID B1, ID C3, ID C4, ID C6, ID C7 und ID C8 aus Tabelle 7. Die Anforderungen ID A2, ID B4, ID B5, sowie ID C3.2 sind auf Basis der aktuellen Kenntnisse ebenfalls als erfüllt zu betrachten. Eine genauere Aussage kann zu einem späteren Zeitpunkt anhand konkreter Integrationskonzepte getroffen werden. Integrationsaspekte, wie z. B. die Versorgungsspannung der Kamera, sind für eine Integration in das Flugzeug anpassbar und stellen aus diesem Grund keinen Ausschlussgrund dar. Die Erfüllung der Anforderung ID C1, die Forderung nach der Erkennung eines Brands in einem Frachtcontainer innerhalb von einer Minute, kann zu diesem Zeitpunkt nicht bewertet werden. Die Erfüllung dieses Kriteriums ist Kapitel 4.3 zu entnehmen.

3.2 Entwicklung des Testaufbaus unter Verwendung einer Funktionenanalyse nach VDI 2803

Eine Funktionenanalyse hat die Aufgabe, Objekte auf ihre Wirkungen, Zwecke und Konzepte hin zu analysieren. Sie dient u. a. der Strukturbildung, des Verständnissgewinns, der Priorisierung und der Ergebnisabsicherung. Als Funktion wird in der Funktionenanalyse die Wirkung eines Objekts verstanden. Funktionen werden durch ein quantifizierbares Substantiv und ein aktives Verb im Infinitiv formuliert. Ein Beispiel dafür ist z. B. „Prüfvolumen einschließen“. Funktionen werden in Funktionenarten und Funktionenklassen unterteilt. Es gibt zwei Funktionenarten. Das sind Gebrauchsfunktionen und Geltungsfunktionen. Gebrauchsfunktionen beschreiben objektiv quantifizierbare Wirkungen eines Objekts. Geltungsfunktionen beschreiben subjektiv wahrnehmbare Wirkungen eines Objekts. Funktionenklassen werden zur Erstellung einer Rangordnung verwendet. Den höchsten Rang haben Haupt- und Nebenfunktionen. Diese können über mehrere Ebenen immer weiter in Teilfunktionen gegliedert werden. Der niedrigste Rang wird durch Elementarfunktionen beschrieben. Elementarfunktionen lassen sich nicht in weitere Funktionen aufspalten. Die Funktionen eines Objekts werden z. B. in einem Funktionenbaum nach ihren Funktionenklassen strukturiert, *Abbildung 14* [50]

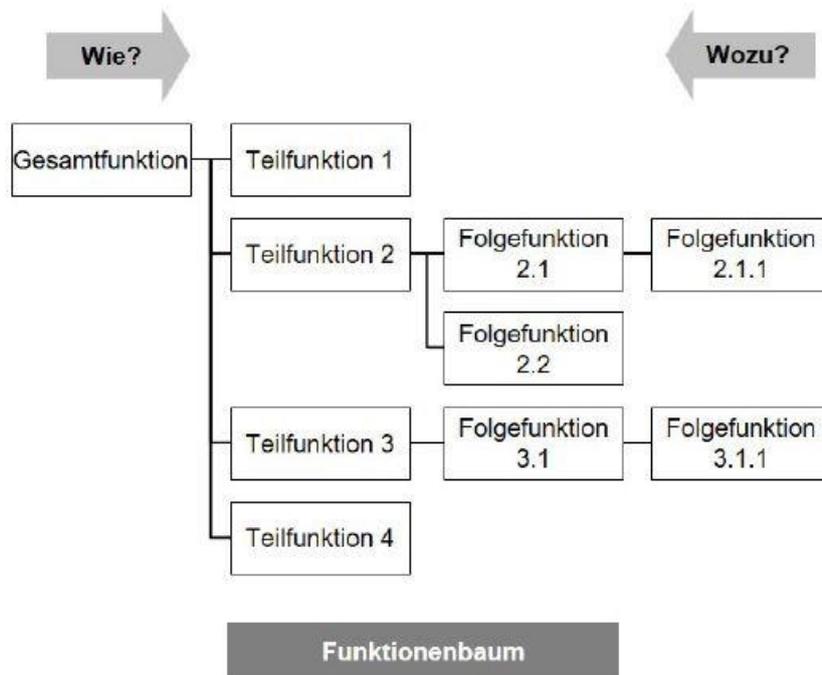


Abbildung 14. Funktionsbaum nach VDI 2803 [50].
Ausschnitt aus Bild 1. Funktionen in verschiedenen Funktionendiagrammen.

Um die Funktionen logisch in den Funktionsbaum einzuordnen, wird ausgehend vom höchsten Rang zum Niedrigeren mit dem Fragewort „Wie?“ gefragt. Vom niedrigsten Rang bis hin zum höchsten Rang wird mit „Wozu?“ gefragt. Zur Bereinigung der Rangordnung werden vermeidbare und unerwünschte Funktionen eliminiert. Im Anschluss werden für alle Elementarfunktionen aus der Rangordnung mehrere Lösungsmöglichkeiten definiert. Dabei ist es wichtig, dass die Funktionen einem bestimmten Abstraktionsgrad entsprechen. Dieser sollte auf der Grenze zum symbolischen Bereich liegen. Andernfalls ist der Ideenfindungsspielraum eingeschränkt. Die unterschiedlichen Lösungsmöglichkeiten aller Elementarfunktionen können nun beliebig zu unterschiedlichen Konzepten kombiniert werden. [50]

Zur Entwicklung des Testaufbaus, Kapitel 3.2, wurde ein Funktionsbaum zu der Hauptfunktion „Rauchmelder testen“ entwickelt, *Anhang B 1*. Darin sind nicht nur Funktionen zur Konstruktion des Testaufbaus erfasst worden, sondern alle denkbaren Funktionen, die zur Testrealisierung erfüllt werden müssen. Alle Elementarfunktionen wurden wie in Tabelle 9 aufgelistet und Lösungsmöglichkeiten erarbeitet. Verwendete Lösungen sind in fettem Schriftbild geschrieben.

Tabelle 9
 Lösungen zu Elementarfunktionen
 Ausschnitt aus Anhang B 2

ID	Elementarfunktion	Lösung 1	Lösung 2	Lösung 3
02.3. 6	Prüfvolumeninhalt benutzen	Tür zum Begehen	von außen fern- steuerbare Roboterarme	
02.3. 7	Prüfvolumen einsehen	Ausschnitt	Fensterscheibe	Kamera innen, Monitor außen

Anmerkung. Verwendete Lösungen in fettem Schriftbild.

Die Tests haben im Brandlabor auf dem Werksgelände der Lufthansa Technik AG in Hamburg stattgefunden, *Anhang B 1*, ID 02.1.1. Es stand ein Stellplatz mit einem Grundriss von 1850 mm x 2350 mm und einer Höhe von 2000 mm zur Verfügung, *Anhang B 2*, ID 02.1.2. Für den Vergleich von Ansprechzeiten ist die Größe des Prüfvolumens irrelevant. Ein Test in dem kleineren Volumen beeinflusst die Repräsentativität des Tests zum Vergleich der Ansprechzeiten nicht, da ein größeres Volumen ausschließlich zu einer Verlängerung der Transportwege des Rauchaerosols zu den Detektionseinheiten der Brandmeldesysteme führt. Dadurch kommt es zu einer Verlängerung der Ansprechzeiten aller Brandmeldesysteme, für die der Transportweg eine Rolle spielt. Die Repräsentativität des Tests sowie der Vergleich der Ansprechzeiten wurde durch die Vereinheitlichung des Abstands der Brandmeldesysteme zum Brandherd sichergestellt. Für den Vergleich der Ansprechzeiten mit der Anforderung 1 der EASA, Kapitel 2.2.1, können die absoluten Ansprechzeiten auf Ansprechzeiten bei konkreten Frachtraumdimensionen hochskaliert werden.

3.2.1 Anpassung der Testfeuer

Wie in Kapitel 2.2.3 beschrieben sind durch die SAE im Aerospace Standard AS8036 [35] atmosphärische Bedingungen, die Testposition der Brandmeldesysteme und die zu verwendenden Testfeuer nach DIN EN 54 [26] zum Test von Brandmeldesystemen für den Frachtraum vorgeschrieben. Die Brandmeldesysteme sollen einem Pyrolyseschmelbrand (TF2), Kapitel 2.2.3.1, und einem offenen Flüssigkeitsbrand (TF5), Kapitel 2.2.3.2, ausgesetzt werden. Da, wie oben beschrieben, ausschließlich ein begrenzter Bereich zur Verfügung steht, ist das Umsetzen des offenen Flüssigkeitsbrands aus Gründen der Arbeitssicherheit nicht zu realisieren. Stattdessen wird auf den reduzierten offenen Flüssigkeitsbrand (TF5A), Kapitel 2.2.3.3, zurückgegriffen. Dieser weist eine geringere und andersartige Rauchentwicklung auf, als der offene Flüssigkeitsbrand, weil der Flüssigkeit n-Heptan beim Testfeuer TF5A kein Toluol beigemischt wird und weil eine kleinere Menge des n-Heptans verbrannt wird. Da alle Brandmeldesysteme gleichzeitig mit demselben Testfeuer getestet werden, wirkt sich das verwendete Testfeuer TF5A nicht verfälschend auf den Vergleich der Brandmeldesysteme hinsichtlich ihrer Ansprechzeiten aus. Das Testfeuer TF5A ist ausschließlich dazu imstande

die Ansprechzeiten aller Brandmeldesysteme gleichartig abweichend vom Testfeuer TF5 zu beeinflussen. Zudem kann davon ausgegangen werden, dass Brandmeldesysteme, welche die geringe Rauchentwicklung des Testfeuers TF5A erfassen, in jedem Fall die höhere Rauchentwicklung des Testfeuers TF5 erfassen würden.

3.2.2 Konstruktion des Prüfvolumens

Der Testaufbau soll relevante Merkmale des Frachtraums, die einen Einfluss auf die Ansprechzeit der Brandmeldesysteme haben können, abbilden, *Anhang B 2*, ID 06, sodass die Ergebnisse aus den Versuchsreihen am Ende auf eine Anwendung im Frachtraum übertragen werden können und als repräsentativ gelten. Für die Tests der Brandmeldesysteme wurde ein abgeschlossenes Prüfvolumen definiert, *Anhang B 2*, ID 02.3.2, um nicht kontrollierbare Strömungen zu verhindern, *Anhang B 1*, ID 02.3.4, die ein aussagekräftiges Ergebnis über die Ansprechzeiten der Brandmeldesysteme verfälschen würden. Bei der konkreten Auslegung eines Brandmeldesystems für den Frachtraum können potentielle Strömungen berücksichtigt werden. Zusätzlich schützt ein abgeschlossenes Volumen das Brandlabor vor einem offenen Brand und vor Verschmutzung, *Anhang B 2*, ID 02.2.2. In der DIN EN 54 wird zum Testen von Brandmeldesystemen ein Raum mit einem Grundriss von 9 m bis 11 m mal 6 m bis 8 m [51] und einer Höhe von 3,8 m bis 4,2 m [51] vorgeschrieben. Die unter Kapitel 3.2 beschriebenen Gründe führten zu einer Dimensionierung des Prüfvolumens, die die komplette Stellfläche im Brandlabor ausnutzt, um an die Maße eines Frachtraums heranzureichen, *Anhang B 2*, ID 06. Es resultierten Innenmaße von 1830 mm x 2000 mm und eine Höhe von 1800 mm für das Prüfvolumen.

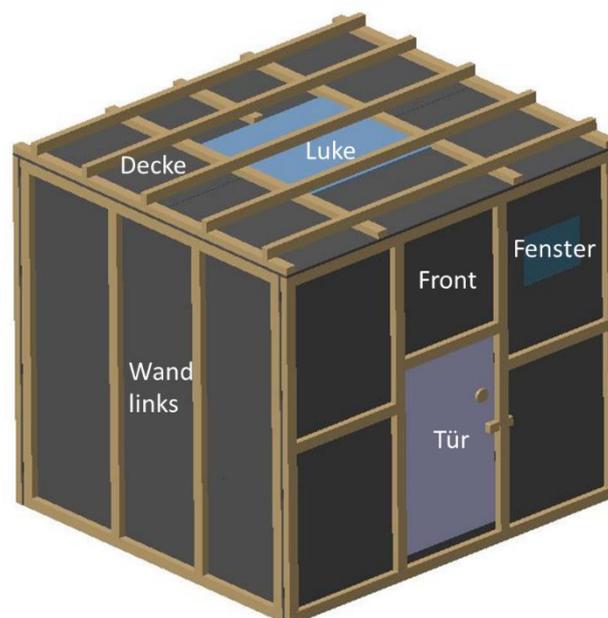


Abbildung 15. Prüfvolumen zur Durchführung repräsentativer Rauchmeldertests.

Die geringeren Maße des Prüfvolumens verringern die Strecke zwischen Brandherd und Detektionseinheit der Brandmeldesysteme gegenüber der Norm DIN EN 54 [51]. Dadurch sind im Gegensatz zu den Tests nach Norm geringere Ansprechzeiten aller Brandmeldesysteme zu erwarten. Die Vergleichbarkeit der Brandmeldesysteme wird dadurch nicht beeinflusst, da die Strecke zwischen Brandherd und Raucheintrittsöffnung bzw. Detektionseinheit für alle Brandmeldesysteme gleich gehalten wurde, *Anhang B 2*, ID 06. Das Prüfvolumen, *Abbildung 15*, ist ein Quader aus einem schwer entflammaren Material, das der Baustoffklasse B nach DIN 4102-1 [52] zugeordnet wird. Das Prüfvolumen ist über eine Tür zugänglich, *Anhang B 2*, ID 02.3.6, und kann durch ein Fenster eingesehen werden, *Anhang B 2*, ID 02.3.7. Die Stabilität des Quaders wird durch eine Rahmenkonstruktion an den Außenseiten, *Anhang B 2*, ID 02.3.3, sichergestellt. Auf dem Dach des Prüfvolumens befindet sich eine Luke. Diese kann aufgeschoben werden, um den Rauch aus dem Prüfvolumen zu evakuieren, *Anhang B 2*, ID 04.2. Über dem Stellplatz im Brandlabor befindet sich eine Absaugesse, *Anhang B 2*, ID 04.2. Diese kann die Evakuierung des Prüfvolumens beschleunigen. Die zum Bau des Prüfvolumens notwendigen technischen Zeichnungen sind in *Anhang B 3* bis *Anhang B 7*, *Anhang B 11* bis *Anhang B 20* einzusehen.

3.2.3 Positionierung der Brandmeldesysteme

Die Unterschiedlichkeit der Brandmelder-Technologien verlangte nach unterschiedlichen Aspekten, die bei der Integration der Brandmeldesysteme im Prüfvolumen beachtet wurden. Der Brandherd wurde in der Mitte des Prüfvolumens auf dem Boden positioniert, um eine ungestörte Rauchausbreitung zu gewährleisten. Da beide Brandherde eine hinreichende Hitzeentwicklung aufweisen, ist von einer Rauchausbreitung, wie in Kapitel 2.1.2, auszugehen. Weiterhin wurde der repräsentative Fall angenommen, dass sich ein Brand nicht direkt unter einer Detektionseinheit entwickelt, Kapitel 2.4.3. Aus diesen Gründen wurde für die Positionierung Brandmeldesysteme zylindrische Koordinaten verwendet, *Abbildung 16*.

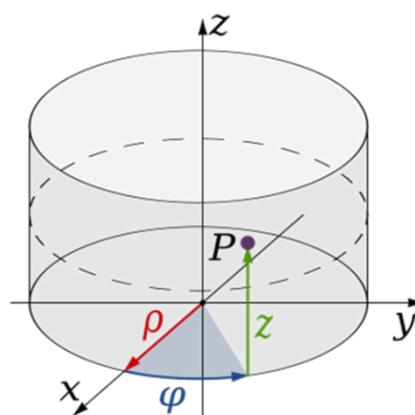


Abbildung 16. Zylinderkoordinaten [53].

Die Z-Achse befindet sich an der Position des Brandherds.

Die Raucheintrittsöffnungen des Ansaugrauchmelders, des Lüftungsrauchmelders und des Passivrauchmelders sowie das Objektiv des Kamerabrauchmelders wurden auf einem Messkreis, *Abbildung 16*, mit der Radialkoordinate ρ um den Brandherd in derselben Höhe z montiert. Die Montagepositionen der o. g. Brandmelder-Elemente unterschieden sich ausschließlich durch die Winkelkoordinate φ .

Da der Passivrauchmelder in Frachträumen direkt an der Decke montiert ist, Kapitel 2.4.3, wurde im Testaufbau durch seine Montage an der Decke des Prüfvolumens die Höhe $z = 1778$ mm des Messkreises definiert. Die Radialkoordinate des Messkreises wurde auf den Abstand $\rho = 915$ mm zur z -Achse (Position des Brandherds) festgelegt. Diese Radialkoordinate repräsentierte den größtmöglichen realisierbaren Abstand zwischen Brandherd und Raucheintrittsöffnung im Prüfvolumen, unter Einhaltung der Bedingung, dass die Brandmeldesysteme bewusst in einem Abstand zu den Ecken des Prüfvolumens platziert wurden, Kapitel 2.1.2. Für alle weiteren Brandmeldesysteme im Test wurde bei der Positionierung ebenfalls der repräsentative Fall, *Anhang B 1*, ID 06, eines lokalen Brands im Frachtraum angenommen, der sich nicht direkt an der Montageposition des jeweiligen Brandmeldesystems befindet. Für den Kamerabrauchmelder spielte der Abstand zum Brandherd keine Rolle, da sie nicht auf ein Ankommen des Rauchs an ihrer Montageposition angewiesen ist, Kapitel 2.1.3.6. Zur Vereinheitlichung wurde das Objektiv des Kamerabrauchmelders ebenfalls auf dem Messkreis positioniert. Der vereinheitlichte Abstand zwischen Brandherd und Raucheintrittsöffnungen bzw. Kameraobjektiv betrug ca. 2 m, *Anhang B 2*, ID 06.

betrachtet, dass ausschließlich die Ansaugöffnung, die am weitesten von der Detektionseinheit entfernt ist (Ende des Rohres), mit Rauch beaufschlagt wird, *Anhang B 2*, ID 02.4.1 Das war die Ansaugöffnung, die den Messkreis im Prüfvolumen tangiert, *Abbildung 17*. Dadurch wurde der o. g., Fall abgebildet, dass sich der Brandherd nicht direkt unter der Raucheintrittsöffnung des Brandmeldesystems befindet. Die weiteren fünf Ansaugöffnungen wurden außerhalb des Prüfvolumens platziert, sodass sie Umgebungsluft ansaugen, in der sich kein Rauch befindet. Dafür wurden alle Undichtigkeiten des Prüfvolumens abgeklebt. Für eine optimierte Ausnutzung der Stellfläche wurden die Ansaugrohre ausschließlich an der linken Wand des Prüfvolumens mithilfe von Kunststoffschellen montiert, *Anhang B 8*. Eine horizontale Integration im Frachtraum begünstigt die Erreichung des Ziels, die gesamte Frachtraumlänge mit möglichst wenig Ansaugrohrlänge, und damit auch mit geringem Gewicht, *Tabelle 7*, ID A2, zu überwachen. Aus diesem Grund wurde auf einen überwiegend horizontalen Verlauf der Ansaugrohre im Testaufbau geachtet.

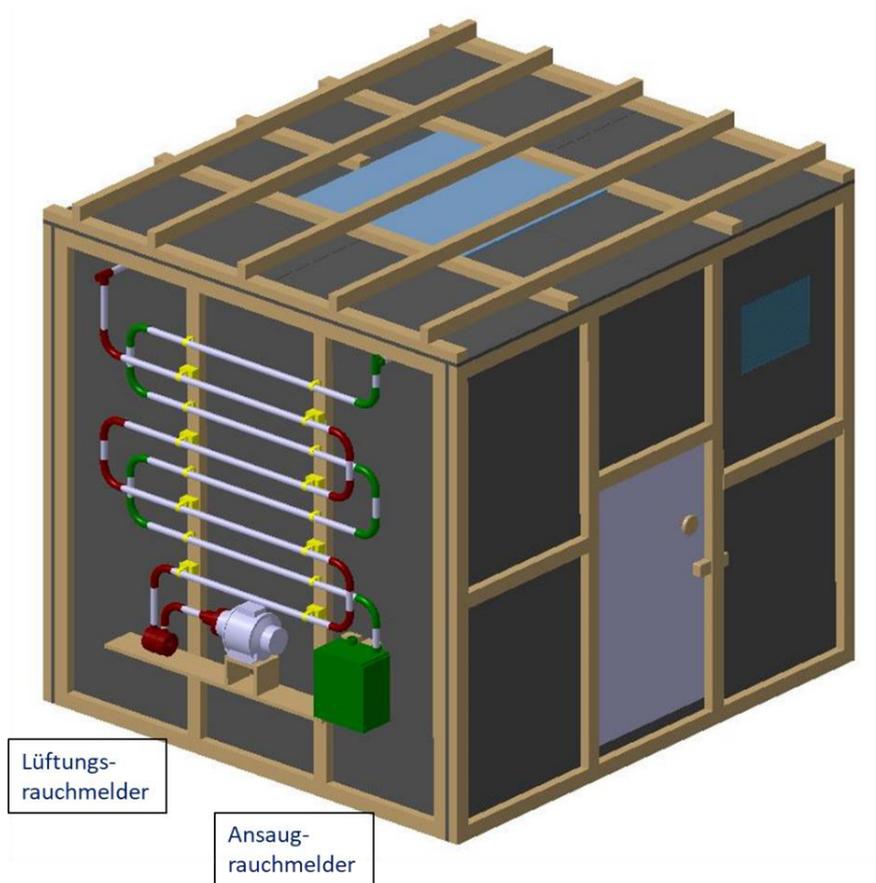


Abbildung 18. Positionierung der Ansaugrauchmelder an der Seitenwand des Prüfvolumens.

Die Detektionseinheit des Ansaugrauchmelders, sowie dessen Rohrverlauf, sind in grün dargestellt. Die Detektionseinheit des Lüftungsrauchmelders, sowie dessen Rohrverlauf, sind in Rot dargestellt. Befestigungsschellen sind in Gelb dargestellt.

Der Ansaugrauchmelder besitzt einen eingebauten Lüfter, der sich auf die drei Stufen Hoch (ca. 60 l/min) [55], Mittel (ca. 40 l/min) [55] und Niedrig (ca. 20 l/min) [55] einstellen lässt. Die Zwangsbelüftung des Lüftungsrauchmelders wurde im Test durch einen dem Brandmeldesystem nachgestellten Lüfter abgebildet. Zur Herstellung einer Vergleichbarkeit, *Anhang B 2*, ID 06, zwischen den beiden Rauchansaugsystemen wurde der Volumenstrom beider Rauchansaugsysteme aneinander angeglichen. Dazu wurden die Strömungsgeschwindigkeiten bei gleichen Querschnitten mithilfe eines Hitzdrahtanemometers hinter den Lüftereinheiten gemessen. Der Volumenstrom des Lüftungsrauchmelders konnte durch einen eingebauten Kugelhahn reguliert werden. Die größte Annäherung der Strömungsgeschwindigkeiten wurde bei Einstellen der Lüfterstufe Mittel des Ansaugrauchmelders erreicht, *Anhang C 2*, Seite 10 von 15. Die Durchführung eines Dichtigkeits tests der Ansaugrohre war nicht erforderlich [54].

Eine als wahrscheinlich angenommene Einbauposition eines Kamerabrandmelders im Frachtraum wäre an einem Ende des Frachtraums mittig unter der Decke, sodass die Erfassung der vollen Frachtraumlänge möglich ist. Zur Abdeckung der toten Winkel des Kamerabrandmelders könnte am gegenüberliegenden Ende des Frachtraums ein zweiter Kamerabrandmelder eingebracht werden. Für die Tests wurde ein horizontaler Objektivöffnungswinkel von 90° gewählt, da dieser mindestens benötigt würde, um einen Frachtraum in voller Breite zu erfassen, Kapitel 2.4.1. Bei einem Brand in einem Frachtcontainer ist zu erwarten, dass der Rauch aus allen offenen Ritzen des Frachtcontainers entweicht. Bei einer mittig unter der Frachtraumdecke positionierten Kamera, wäre ihre Sichtfeldlinie demnach genau in Richtung des Brandherds, ausgehend von einem Brandherd im Frachtcontainer, ausgerichtet. Die Randbereiche des Kamerasichtfelds würden demnach nicht zwingend und vor allem nicht ausschließlich für eine Branddetektion verwendet. Diese Annahme wurde im Testaufbau umgesetzt und die Sichtlinie der Kamera in Richtung des Brandherds ausgerichtet, *Abbildung 17*. Weiterhin ist im Lower-Deck-Frachtraum nur ein kleiner Spalt von ca. fünf Zentimetern zwischen Frachtraumdecke und Frachtcontaineroberfläche vorhanden, Kapitel 2.4.1. Damit die Kamera den Spalt vollständig erfassen kann, ist die Sichtlinie horizontal ausgerichtet und nicht nach unten geneigt. Im Test wurde der Spalt durch eine Blende simuliert, die in einem Abstand von 30 cm vor dem Objektiv der Kamera platziert wurde, *Abbildung 19*.

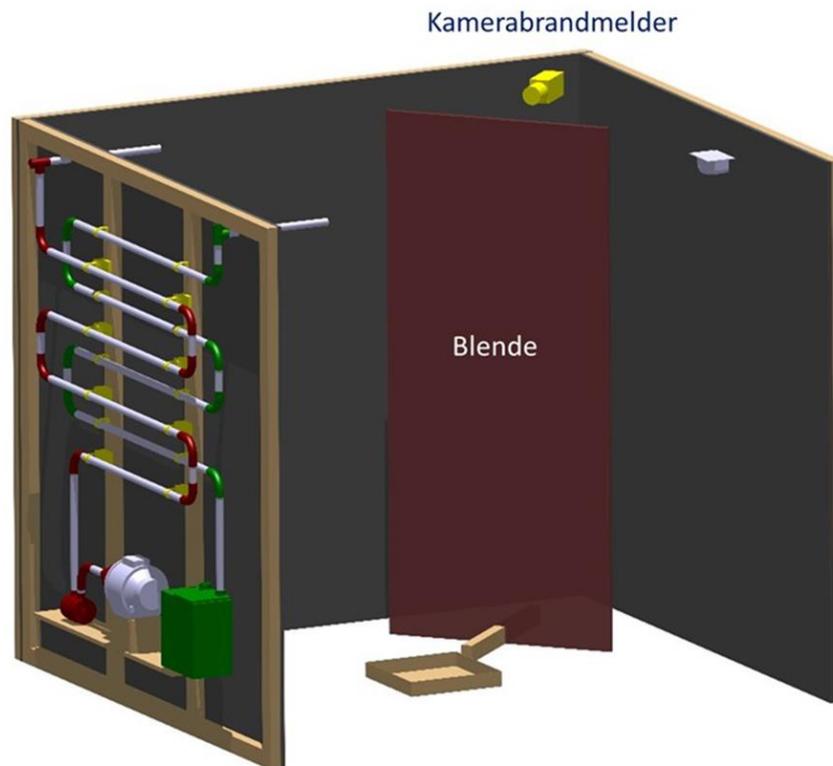


Abbildung 19. Anordnung der Brandmeldesysteme im Prüfvolumen.

Positionierung der Blende in einem Abstand von 30 cm vor dem Objektiv des Kamerabrandmelders (gelb).

Die Blende wurde so breit gewählt, dass sie über die gesamte Sichtfeldbreite des Kamerabrandmelders hinausragt. Im Frachtraum reichen die Frachtcontainer fast bis an die Seitenwände heran, sodass keine Seitenbereiche erfasst werden können. Da die Farbgebung des Frachtraums, Kapitel 2.4.1, einen Einfluss auf die Detektionsfähigkeit des Kamerabrandmelders haben kann, wurden alle Wände, die sich im Sichtfeld des installierten Kamerabrandmelders befanden, u. a. gegenüberliegende Wandteile, Decke und Blende, mattweiß gestrichen. Da der Kamerabrandmelder für ihren Betrieb eine Mindestbeleuchtungsstärke von sieben Lux benötigt, wurde eine Lampe im Prüfvolumen platziert und die Beleuchtungsstärke dokumentiert.

Weiterhin wurde eine Kamera auf dem Boden des Prüfvolumens positioniert. Diese wurde in erster Linie dazu verwendet, die Versuchsdurchführung und den Brandherd zu überwachen und zu dokumentieren. Da es sich bei der zweiten Kamera ebenfalls um einen Kamerabrandmelder des obigen Typs handelte, konnten aus dem Videomaterial ebenfalls Schlüsse zur Branddetektion bei direkter Sicht auf den Brandherd gezogen werden. Die Auswertung des Videomaterials des zweiten Kamerabrandmelders ist gesondert von allen anderen Ergebnissen zu betrachten, da für diesen Kamerabrandmelder keine Maßnahmen getroffen wurden, ihr Sichtfeld oder die Position an die Realität im Frachtraum anzupassen. Im Folgenden wird der Kamerabrandmelder, mit direkter Sicht auf den Brandherd, als „Kamera unten“ bezeichnet. Der zweite Kamerabrandmelder, ohne direkte Sicht auf den Brandherd, wird als „Kamera oben“ bezeichnet.

3.2.4 Konfiguration der Brandmeldesysteme.

Für den Passivrauchmelder und den Lüftungsrauchmelder können keine Einstellungen vorgenommen werden. Beim Ansaugrauchmelder und beim Kamerabrandmelder müssen bestimmte Einstellungen festgelegt und vorgenommen werden. Im Folgenden sind die gewählten Einstellungen beschrieben.

3.2.4.1 Konfiguration des Ansaugrauchmelders

Dem Ansaugrauchmelder ist seine Rohrnetzkonfiguration mitzuteilen. Hierfür wurde in der zugehörigen Software [55] das Rohrnetz konfiguriert. Es waren die Rohrlängen und deren Ausrichtung sowie die Anzahl, die Durchmesser und die Positionen der Ansaugöffnungen zu wählen, *Anhang B 9* und *Anhang B 10*. Für den Test wurde die Lüftereinstellung Mittel gewählt, damit die Volumenströme der beiden Rauchansaugsysteme so nah wie möglich beieinanderliegen. Zusätzlich konnten die drei programmierbaren Alarmschwellen Voralarm, Feualarm 1 und Feualarm 2, gewählt werden. Ausschließlich der Feualarm eins wurde im Test als Signal abgegriffen und musste für den Test festgelegt werden. Für den Passivrauchmelder und den Lüftungsrauchmelder lagen keine Informationen zur Sensibilität vor. Aus diesem Grund war kein Angleich der Sensibilitäten der Brandmeldesysteme zu realisieren. Infolgedessen wurde aufgrund einer persönlichen Mitteilung [54] für den Test die Standardsensibilitätseinstellung des Ansaugrauchmelders gewählt. Die Alarmschwelle für den Feualarm 1 lag somit bei 0,04705 % Lichtdämpfung pro Meter (% ld/m) und entsprach der Klassifikation B, Kapitel 2.1.4. Diese Klassifikation verspricht einen guten Kompromiss zwischen sehr früher Branderkennung bei gleichzeitiger Vermeidung von Fehlalarmen aufgrund von Störgrößen [54]. Anschließend wurde die vorgenommene Konfiguration über eine USB-Schnittstelle auf den Ansaugrauchmelder aufgespielt.

3.2.4.2 Konfiguration des Kamerabrandmelders

Für den Kamerabrandmelder können Einstellungen für den Rauchdetektionsalgorithmus sowie Einstellungen für den Flammendetektionsalgorithmus vorgenommen werden. Da der installierte Kamerabrandmelder keine direkte Sicht auf den Brandherd hat, Kapitel 3.2.3, ist für ihn ausschließlich die Einstellung des Algorithmus zur Rauchererkennung relevant. Der Algorithmus wertet die physikalischen Eigenschaften von Rauch aus [22], Kapitel 2.1.3.6. Er erkennt die Bewegung von farbneutralem Rauch (weiß, grau, schwarz) [22]. Umgebungsrauch, der sich im Bereich abnehmender Rauchdichte befindet, wird nicht detektiert, da die Rauchbewegung nicht direkt sichtbar ist [22]. Die Verifikationszeit des Rauchererkennungsalgorithmus kann aus einem definierten Wertebereich ausgewählt. Es bestanden keine Erfahrungen mit Kamerabrandmeldern, aus diesem Grund wurde die Verifikationszeit nach einer persönlichen Mitteilung [56] auf die Standardeinstellung 10 Sekunden festgelegt. Für den Kamerabrandmelder mit Sicht auf den Brandherd wurden sowohl für die Flammendetektion als auch für die Rauchdetektion die schnellsten Verifikationszeiten ausgewählt um die

Stärke der Technologie in der Brandfrüherkennung zu erproben. Auf den Kamerabrandmeldern wurde die Softwareversion 6.50 eingesetzt.

3.2.5 Elektrischer Aufbau und Datenerfassung

Zur Durchführung der Tests müssen diverse Geräte mit Spannung, *Anhang B 2*, ID 02.4.4 und ID 02.4.6, versorgt und an ein Datenerfassungsmodul, *Anhang B 2*, ID 05.1, angeschlossen werden, *Abbildung 20*. Die beiden bereits in Flugzeugen verbauten Brandmeldesysteme, Passivrauchmelder und Lüftungsrauchmelder, werden regulär mit einer Gleichspannung von 28 V betrieben [42, 44]. Der Ansaugrauchmelder wurde ebenfalls mit 28 V versorgt [48]. Damit konnten die Systeme von einer gemeinsamen Spannungsquelle versorgt werden. Der Kamerabrandmelder benötigt eine Gleichspannung von 12 V [22]. Für ihn wurde das mitgelieferte Netzteil verwendet. Alle Netzteile sowie Lüfter, Laptop und Heizplatte wurden durch die reguläre Netzspannung mit 230 V versorgt, *Anhang B 2*, ID 02.4.6. Zur Überwachung des Ansaugrauchmelders mit der zugehörigen Software [55] wurde er über eine USB-Schnittstelle mit dem Laptop verbunden. Zusätzlich wurden über die Software die Alarmzustände des Ansaugrauchmelders auf einen Normalzustand zurückgesetzt, um den Ansaugrauchmelder für jede Versuchsdurchführung in einen betriebsbereiten Zustand zu versetzen. Eine weitere USB-Schnittstelle des Laptops führte zum Datenerfassungsmodul, dem „Aeronautical Radio Incorporated Tester“ (ARINC Tester [57]), *Anhang B 2*, ID 05.1. Die zugehörige Software Bus Inspector Pro Rev 4.07 [58] ermöglichte die Visualisierung der eingehenden Alarmsignale, *Anhang B 2*, ID 05.3.

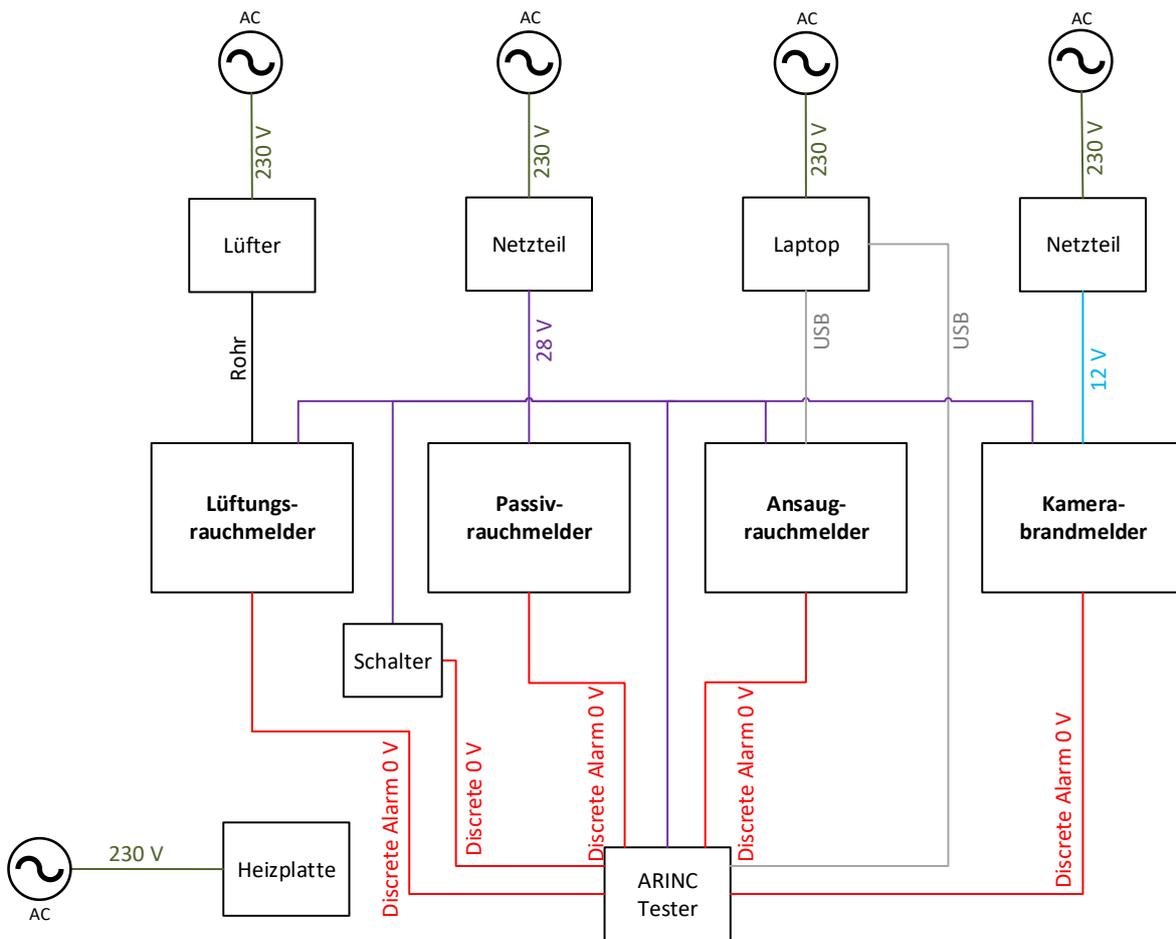


Abbildung 20. Elektrischer Testaufbau und Datenerfassung.

Der ARINC-Tester wurde aus mehreren Gründen als Messinstrument verwendet. Er bot die Erfassung einer ausreichenden Anzahl von zwölf diskreten Signalen [57]. Für den Testaufbau war eine Erfassung von sechs diskreten Signalen notwendig. Außerdem ermöglichte der ARINC Tester sowohl die Erfassung von „High“-Pegeln (28 V-Pegel) als auch von „Low“-Pegeln (0 V-Pegel) [57]. Das wurde durch den Vergleich der eingehenden Alarmpegel mit den angelegten Referenzpegeln von 0 V und 28 V am ARINC-Tester erreicht [57], *Anhang B 2*, ID 05.2. Da der Passivrauchmelder und der Lüftungsrauchmelder bei einem Alarm einen 0 V-Pegel durchschalten [42, 44], wurden ihre Alarmsignale zur Erfassung auf die Low-Pegel-Eingänge gelegt. Beim Ansaugrauchmelder und beim Kamerabrandmelder ist die Größe des Alarmpegels selbst zu wählen [48, 49] und wird zur Vereinheitlichung ebenso als 0 V definiert. Dadurch konnten ihre Alarmsignale ebenfalls auf die Low-Pegel-Eingänge des ARINC Testers gelegt werden. Die zum ARINC Tester zugehörige Software, Bus Inspector Pro Rev. 4.07 [58], ermöglichte eine Visualisierung der binären Zustände (Signal / kein Signal) der Eingänge des ARINC-Testers in Form von sich einschaltenden virtuellen Lämpchen und der Änderung einer dargestellten Hexadezimalzahl [57, 58], *Abbildung 21*. Die Hexadezimalzahl gab

an, auf welchen Eingängen in einem Moment ein Signal erfasst wird. Der Schalter in *Abbildung 20* wurde dazu verwendet, den Beginn des Testfeuers (D12) auf der „Discrete“-Benutzeroberfläche, *Abbildung 21*, zu markieren. Auch das Schaltersignal ist als Low-Pegel konfiguriert und schaltet beim Umlegen 0 V zum ARINC Tester durch.

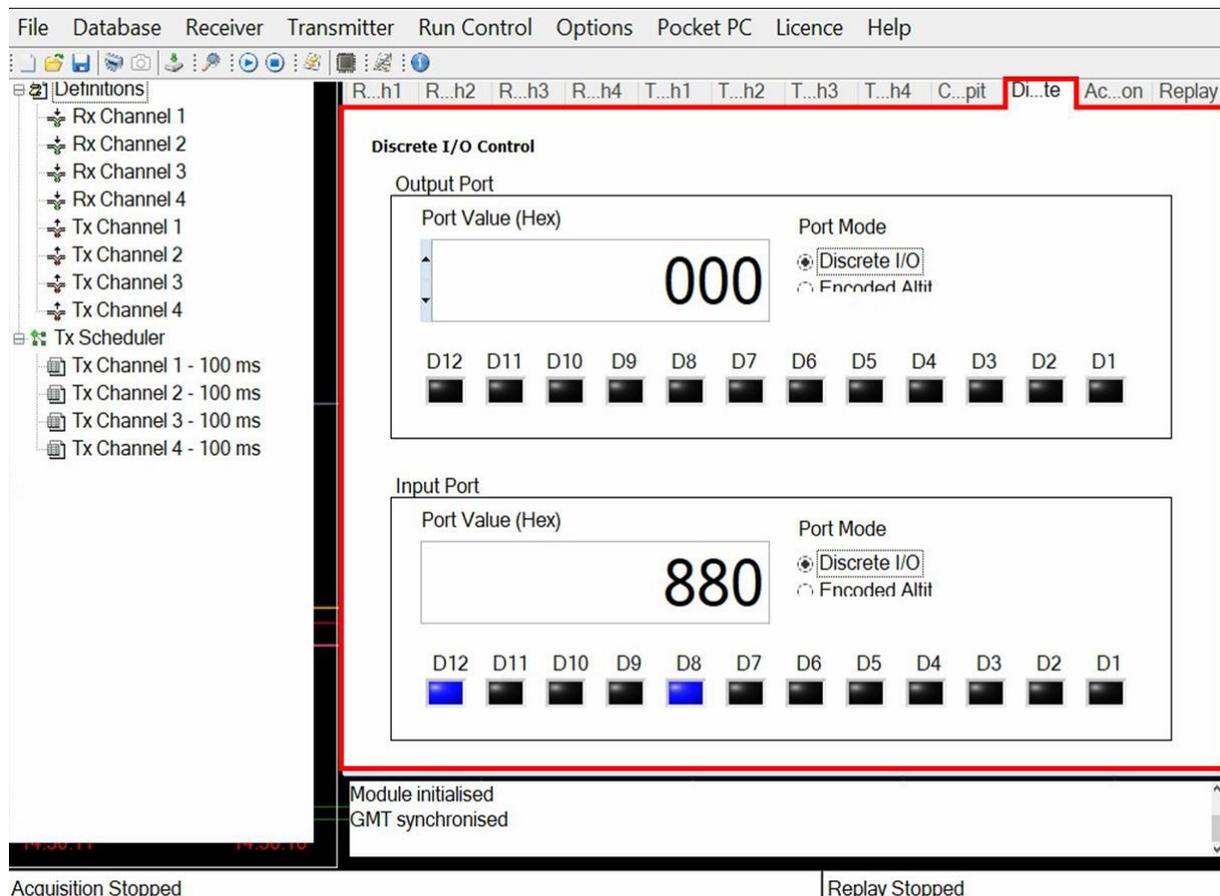


Abbildung 21. „Discrete“-Benutzeroberfläche der Software Bus Inspector Pro [58].

Die Benutzeroberfläche wird für die Visualisierung der binären Zustände der ARINC Tester-Eingänge verwendet.

Zur Ermittlung der Ansprechzeiten aller Brandmeldesysteme nach der Testdurchführung wird das Fenster der Discrete-Benutzeroberfläche der Software Bus Inspector Pro [58] mithilfe des Bildschirmaufnahmeprogramms OBS Studio [59] aufgenommen, *Anhang B 2*, ID 05.4. Dabei wird eine Rate von 30 Bildern pro Sekunde verwendet. Mit hinreichender Genauigkeit kann die Aufnahme im Nachgang ausgewertet werden und der Ansprechzeitpunkt jedes Brandmeldesystems auf eine dreißigstel Sekunde genau bestimmt werden.

3.3 Entwicklung der Testprozedur unter Verwendung von modellbasiertem Systems Engineering (MBSE)

Die Methode des Systems Engineering kam aus dem Bedürfnis, unterschiedliche Methoden und Disziplinen zu vereinen, hervor. Die Kernherausforderung des Systems Engineering ist es, komplexe und komplizierte Systeme zu handhaben. Im Systems Engineering ist ein System wie folgt definiert. [60]

„Ein System ist ein von Menschen erstelltes Artefakt, bestehend aus Systembausteinen, die gemeinsam ein Ziel verfolgen, das von den Einzelementen nicht erreicht werden kann. [...]“
[60]

Der Begriff Systems Engineering umfasst alle Methoden, die genutzt werden, um erfolgreich Systeme zu entwickeln. Die Nutzung von Modellen ist essentiell zur Entwicklung komplexer Systeme. Durch eine Modellierung können Sachverhalte auf unterschiedlichen Abstraktionsebenen betrachtet werden. Es haben sich unterschiedliche Modellierungssprachen gebildet. Die „Unified Modeling Language“ (UML) ist eine Modellierungssprache, die aus der Softwareentwicklung kommt. Aus der UML wurde ein großer Teil der Notationen für die Anwendung im Systems Engineering übernommen und teilweise erweitert. [60]

Das Aktivitätsdiagramm spezifiziert Abläufe sowie deren Ein- und Ausgabedaten. Optional können Vor- und Nachbedingungen definiert werden. In Tabelle 10 ist die verwendete Notation für Aktivitätsdiagramme mit der UML dargestellt. [60]

Tabelle 10
Notation der UML für Aktivitätsdiagramme

Notation	Bezeichnung
	Startpunkt
	Endpunkt
	Aktion
	Aktivitätsparameter
	Zeitempfangssignal
	Ablaufpfade trennen/zusammenführen

Notation	Bezeichnung
	Region, die unterbrochen werden kann
	Abbruchpfeil

Für diese Arbeit wurde ein Aktivitätsdiagramm verwendet, um beispielhaft den Hergang der Testprozedur für die Tests mit dem reduzierten offenen Flüssigkeitsbrand zu entwickeln sowie strukturiert und leicht erfassbar darzustellen, *Anhang C 1*.

Das Dokument, welches für die Durchführung der Tests verwendet wird, gliedert sich in die Teile Einführung, Testaufbau, Allgemeine Informationen, Testprozeduren, Ergebnisse und Fazit.

In der Einführung wird das Ziel des Tests formuliert. Es werden relevante Referenz- und Designdokumente aufgelistet. Der Testkontext grenzt den Gültigkeitsbereich des Tests ab. Weiterhin wird die Testausrüstung benannt. Das Kapitel Testaufbau liefert Informationen zum Prüfvolumen, zur Positionierung der Brandmeldesysteme und des Brandherds, sowie zum elektrischen Aufbau des Tests und der Datenerfassung. Im Kapitel Allgemeine Informationen werden Informationen wie z. B. Datum, Ort, Uhrzeit und Teilnehmer des Tests erfasst. Das Kapitel Testprozeduren umfasst eine Prozedur zur Testvorbereitung, welche einmalig durchgeführt wird, sowie eine Prozedur für jedes Testfeuer, die je acht Mal durchgeführt wird. Zur Entwicklung der Prozeduren wurde die obenstehende Methode des Systems Engineering nach Tim Weilkiens herangezogen. Im Kapitel Ergebnisse werden die Testergebnisse und -auffälligkeiten knapp beschrieben. Das Fazit gibt Auskunft darüber, ob die Tests erfolgreich durchgeführt wurden.

In *Anhang C 2* befindet sich das ausgefüllte Testdokument der durchgeführten Rauchmeldertests mit allen dokumentierten Kennwerten und Ergebnissen.

4 Auswertung der repräsentativen Tests

In diesem Kapitel werden die Ansprechzeiten der Brandmeldesysteme aus den durchgeführten repräsentativen Tests sowie die daraus ermittelten deskriptiven statistischen Größen arithmetisches Mittel und Standardabweichung dargestellt. Die Messwerte wurden relativiert, indem sie auf eine Referenzgröße bezogen wurden, Kapitel 2.5. Die getesteten Brandmeldesysteme werden hinsichtlich ihrer durchschnittlichen Ansprechzeit, Kapitel 2.5.1, und der Streuung ihrer Ansprechzeiten, Kapitel 2.5.2, verglichen. Das Videomaterial der Kamerabrandmelder wurde ebenfalls für die Auswertung herangezogen. Anschließend werden die Ergebnisse mit den Anforderungen aus der CS 25.858 bzw. der FAR 25.858 verglichen.

4.1 Darstellung der Ansprechzeiten

Folgend werden die Ansprechzeiten bzw. Videos aller getesteten Brandmeldesysteme dargestellt und interpretiert.

4.1.1 Ansaugrauchmelder

Das *Diagramm 1* zeigt die relativierten Ansprechzeiten des Ansaugrauchmelders in Prozent für die acht Tests mit dem TF2 (Pyrolyseschwelbrand). Das *Diagramm 2* zeigt die relativierten Ansprechzeiten des Ansaugrauchmelders in Prozent für die acht Tests mit dem TF5A (Reduzierter offener Flüssigkeitsbrand). Die relativen Ansprechzeiten zeigen, dass der Pyrolyseschwelbrand im Mittel schneller vom Ansaugrauchmelder detektiert wurde als der reduzierte offene Flüssigkeitsbrand. Der Vergleich der deskriptiven statistischen Größen des reduzierten offenen Flüssigkeitsbrands mit denen des Pyrolyseschwelbrands, Tabelle 11, zeigt, dass der Mittelwert der Ansprechzeiten beim reduzierten offenen Flüssigkeitsbrand ca. doppelt so groß ist wie der Mittelwert der Ansprechzeiten beim Pyrolyseschwelbrand. Ein Pyrolyseschwelbrand wird vom Ansaugrauchmelder im Durchschnitt doppelt so schnell erkannt wie ein reduzierter offener Flüssigkeitsbrand. Die Standardabweichung der Ansprechzeiten beim reduzierten offenen Flüssigkeitsbrands ist ca. 2,46 Mal so groß wie die Standardabweichung der Ansprechzeiten beim Pyrolyseschwelbrand. Die durchschnittliche Abweichung der Ansprechzeiten von ihrem Mittelwert ist um diesen Faktor größer.

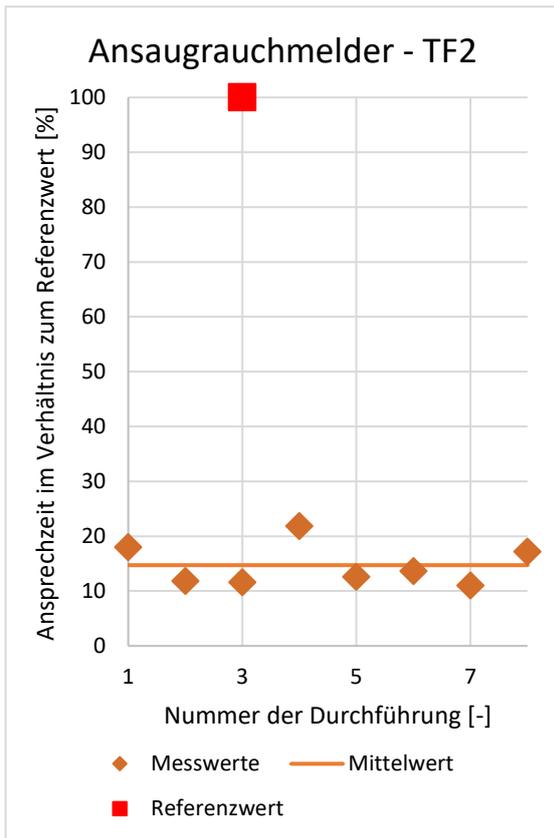


Diagramm 1. Relative Ansprechzeiten und Mittelwert für den Ansaugrauchmelder bei acht Pyrolyseschwelbränden (TF2).

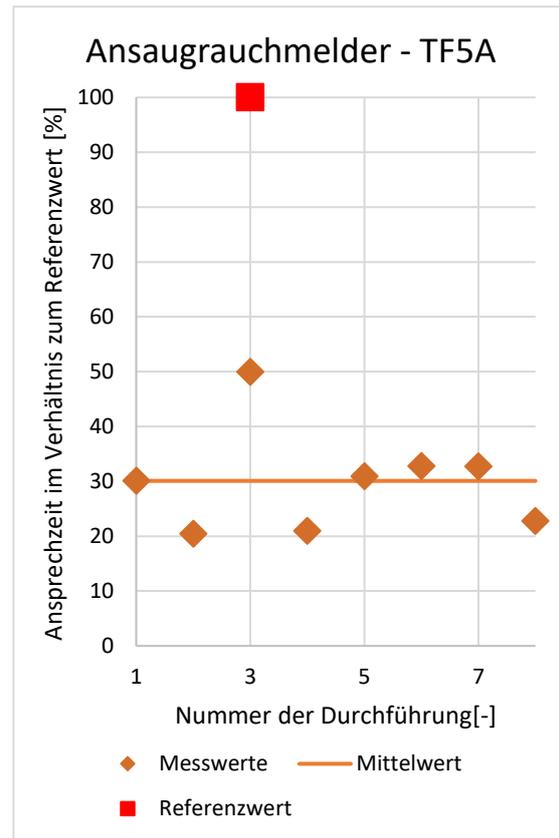


Diagramm 2. Relative Ansprechzeiten und Mittelwert für den Ansaugrauchmelder bei acht reduzierten offenen Flüssigkeitsbränden (TF5A).

Tabelle 11

Vergleich von Mittelwert und Standardabweichung der relativen Ansprechzeiten bei Pyrolyseschwelbrand und reduziertem offenen Flüssigkeitsbrand für den Ansaugrauchmelder

Testfeuer	Mittelwert [%]	Standardabweichung [%]
TF2	14,72	3,88
TF5A	30,09	9,55

4.1.2 Passivrauchmelder

Das Diagramm 3 zeigt die relativierten Ansprechzeiten des Passivrauchmelders in Prozent für die acht Tests mit dem TF2 (Pyrolyseschwelbrand). Das Diagramm 4 zeigt die relativierten Ansprechzeiten des Passivrauchmelders in Prozent für die acht Tests mit dem TF5A (Reduzierter offener Flüssigkeitsbrand). Die relativen Ansprechzeiten zeigen, dass der Pyrolyseschwelbrand im Mittel deutlich schneller vom Passivrauchmelder detektiert wurde als der reduzierte offene Flüssigkeitsbrand. Der Vergleich der deskriptiven statistischen Größen des reduzierten offenen Flüssigkeitsbrands mit denen des Pyrolyseschwelbrands, Tabelle 12, zeigt, dass der Mittelwert der Ansprechzeiten beim reduzierten offenen Flüssigkeitsbrand ca. 4,65 Mal so groß ist wie der Mittelwert der Ansprechzeiten beim Pyrolyseschwelbrand. Ein Pyrolyseschwelbrand wird vom Passivrauchmelder also im Durchschnitt

4,65 Mal so schnell erkannt. Die Standardabweichung der Ansprechzeiten beim reduzierten offenen Flüssigkeitsbrand ist ca. 3,52 Mal so groß wie die Standardabweichung der Ansprechzeiten beim Pyrolyseschwelbrand. Die durchschnittliche Abweichung der Ansprechzeiten vom Mittelwert ist um diesen Faktor größer.

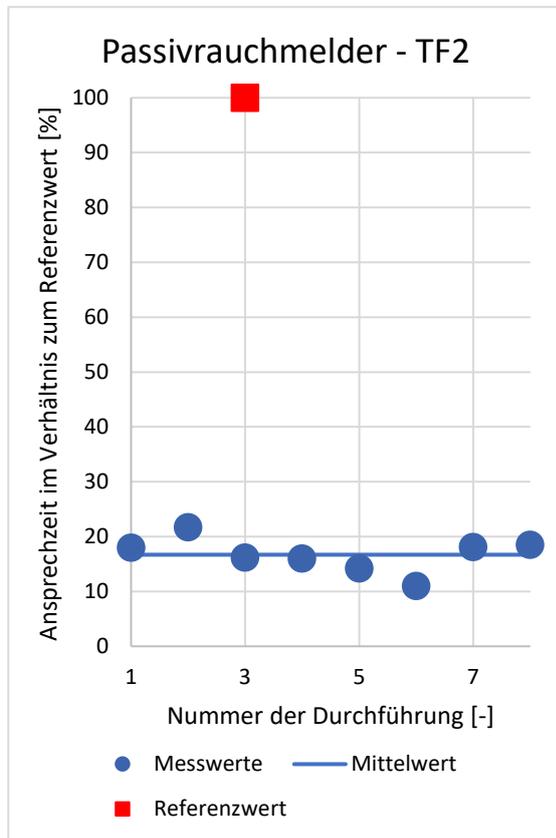


Diagramm 3. Relative Ansprechzeiten und Mittelwert für den Passivrauchmelder bei acht Pyrolyseschwelbränden (TF2).

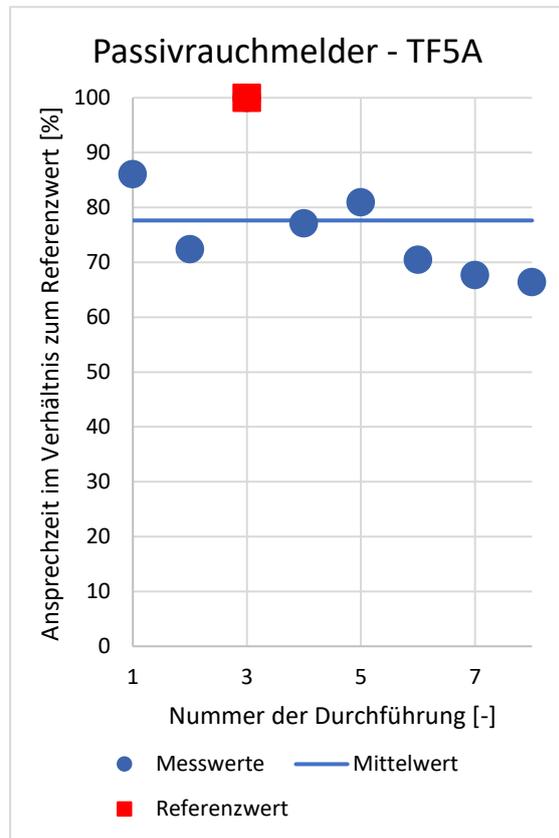


Diagramm 4. Relative Ansprechzeiten und Mittelwert für den Passivrauchmelder bei acht reduzierten offenen Flüssigkeitsbränden (TF5A).

Tabelle 12

Vergleich von Mittelwert und Standardabweichung der relativen Ansprechzeiten bei Pyrolyseschwelbrand und reduziertem offenen Flüssigkeitsbrand für den Passivrauchmelder

Testfeuer	Mittelwert [%]	Standardabweichung [%]
TF2	16,69	3,20
TF5A	77,63	11,26

4.1.3 Lüftungsrauchmelder

Das *Diagramm 5* zeigt die relativierten Ansprechzeiten des Lüftungsrauchmelders in Prozent für die acht Tests mit dem TF2 (Pyrolyseschwelbrand). Die relativen Ansprechzeiten des Pyrolyseschwelbrands weisen eine auffällig große Streuung um den Mittelwert auf. Es liegen keine Messwerte zu den Ansprechzeiten des Lüftungsrauchmelders für den reduzierten offenen Flüssigkeitsbrand vor, da das Brandmeldesystem auch nach vergleichsweise langem Abwarten den reduzierten offenen Flüssigkeitsbrand nicht detektieren konnte. Aus diesem Grund resultieren keine deskriptiven statistischen Größen für den reduzierten offenen Flüssigkeitsbrand. Die nicht vorhandene Detektion des reduzierten offenen Flüssigkeitsbrands bedeutet gleichzeitig, dass ein Pyrolyseschwelbrand vom Lüftungsrauchmelder schneller detektiert wird als ein reduzierter offener Flüssigkeitsbrand. Tabelle 13 zeigt den Mittelwert und die Standardabweichung der relativen Ansprechzeiten beim Pyrolyseschwelbrand.

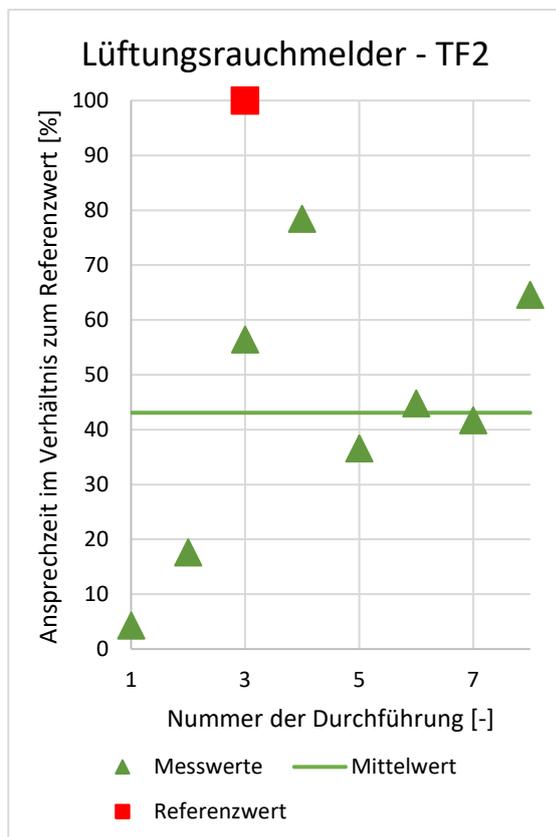


Diagramm 5. Relative Ansprechzeiten, Mittelwert und Trendlinie für den Lüftungsrauchmelder bei acht Pyrolyseschwelbränden (TF2).

Tabelle 13

Mittelwert und Standardabweichung der relativen Ansprechzeiten bei einem Pyrolyseschwelbrand für den Lüftungsrauchmelder

Testfeuer	Mittelwert [%]	Standardabweichung [%]
TF2	43,08	24,18
TF5A	-	-

4.1.4 Kamerabrandmelder

Im Folgenden wird das Videomaterial der im Testaufbau installierten Kamerabrandmelder ausgewertet.

4.1.4.1 TF2 - Pyrolyseschwelbrand

Für den Pyrolyseschwelbrand liegen keine Messwerte zu den Ansprechzeiten des Kamerabrandmelders oben vor. Er hat den Pyrolyseschwelbrand nicht detektieren können. Der Kamerabrandmelder unten hat in drei von acht Fällen keinen Pyrolyseschwelbrand detektiert. In den fünf weiteren Fällen hat der Kamerabrandmelder unten zwar einen Brand detektiert, jedoch stets viel zu früh, als sich ausschließlich eine Armbewegung im Bild befand und noch kein Buchenstab auf der Heizplatte lag.

Abbildung 22 und *Abbildung 23* sind Standbilder aus den Videos der platzierten Kamerabrandmelder und zeigen exemplarisch die Brandentwicklung eines Pyrolyseschwelbrands, wie er in den Tests durchgeführt wurde. Auf den Abbildungen des Kamerabrandmelders unten ist die Entwicklung des Brandherds über eine lichte Rauchsäule bis hin zu einer dichten Rauchsäule gut erkennbar. Auf den Abbildungen des Kamerabrandmelders oben ist ersichtlich, dass oben im Prüfvolumen keine Rauchsäule mehr erkennbar ist. Die Kamera nimmt nur eine allgemeine Trübung der Atmosphäre im Prüfvolumen (Umgebungsrauch) wahr.



a. Rauchfrei.



b. Lichter Rauch.



c. Starker Rauch.

Abbildung 22. Sichtfelder des Kamerabrandmelders oben beim Pyrolyseschwelbrand.



a. Rauchfrei.



b. Lichter Rauch.



c. Starker Rauch.

Abbildung 23. Sichtfelder des Kamerabrandmelders unten beim Pyrolyseschwelbrand.

4.1.4.2 TF5A - Reduzierter offener Flüssigkeitsbrand

Für den reduzierten offenen Flüssigkeitsbrand liegen keine Messwerte zu den Ansprechzeiten des Kamerabrandmelders oben vor. Er hat keinen der acht durchgeführten Flüssigkeitsbrände detektieren können. Auch für den Kamerabrandmelder unten liegen keine Ergebnisse vor. Für diesen Kamerabrandmelder kann keine Auswertung vorgenommen werden, da die Messwerte unvollständig sind. Die kleinere Stichprobe, bestehend aus fünf vorhandenen Ansprechzeiten, deutet jedoch auf eine im Vergleich mit den Ansprechzeiten der anderen Brandmeldesysteme sehr zügige Erkennung des Brands hin.

Abbildung 24 und *Abbildung 25* sind Standbilder aus den Videos der platzierten Kamerabrandmelder und zeigen exemplarisch die Brandentwicklung eines reduzierten offenen Flüssigkeitsbrands, wie er in den Tests durchgeführt wurde. Die entstandene Flamme war bis zu 50 cm hoch. Auf den Abbildungen ist zu erkennen, dass der Kamerabrandmelder oben bei diesem Testfeuer nur eine geringe Trübung der Atmosphäre beobachten kann. Dennoch ist die Stärke der Trübung am Ende des Testfeuers erkennbar größer als am Anfang. Die Abbildungen des Brandherds zeigen, dass bei dem Flüssigkeitsbrand keine dichte Rauchsäule aufsteigt. Der wenige vorhandene Rauch ist auf den Abbildungen als bläulich schimmernde Atmosphäre zu erkennen. Der Brandherd selber unterscheidet sich von *Abbildung 25 b* zu *Abbildung 25 c* nicht, da in beiden Fällen ausschließlich die Oberfläche des n-Heptans in der Stahlwanne brennt.



a. Rauchfrei.



b. Schwache Trübung.



c. Stärkere Trübung.

Abbildung 24. Sichtfelder des Kamerabrandmelders oben beim Flüssigkeitsbrand.



a. Rauchfrei.



b. Schwacher Rauch – Mitte des Brands



c. Schwacher Rauch - Ende des Brands

Abbildung 25. Sichtfelder des Kamerabrandmelders unten beim Flüssigkeitsbrand.

4.2 Vergleich der Ansprechzeiten der Brandmeldesysteme

Diagramm 6 zeigt die relativen Ansprechzeiten des Ansaugrauchmelders, des Passivrauchmelders und des Lüftungsrachmelders im Vergleich bei acht Versuchsdurchführungen des Pyrolyseschmelbrands. Während die Ansprechzeiten des Ansaugrauchmelders und des Passivrauchmelders sehr nah beieinander liegen, ist zu erkennen, dass der Lüftungsrachmelder bei nahezu allen Versuchsdurchführungen deutlich länger braucht den Pyrolyseschmelbrand zu detektieren.

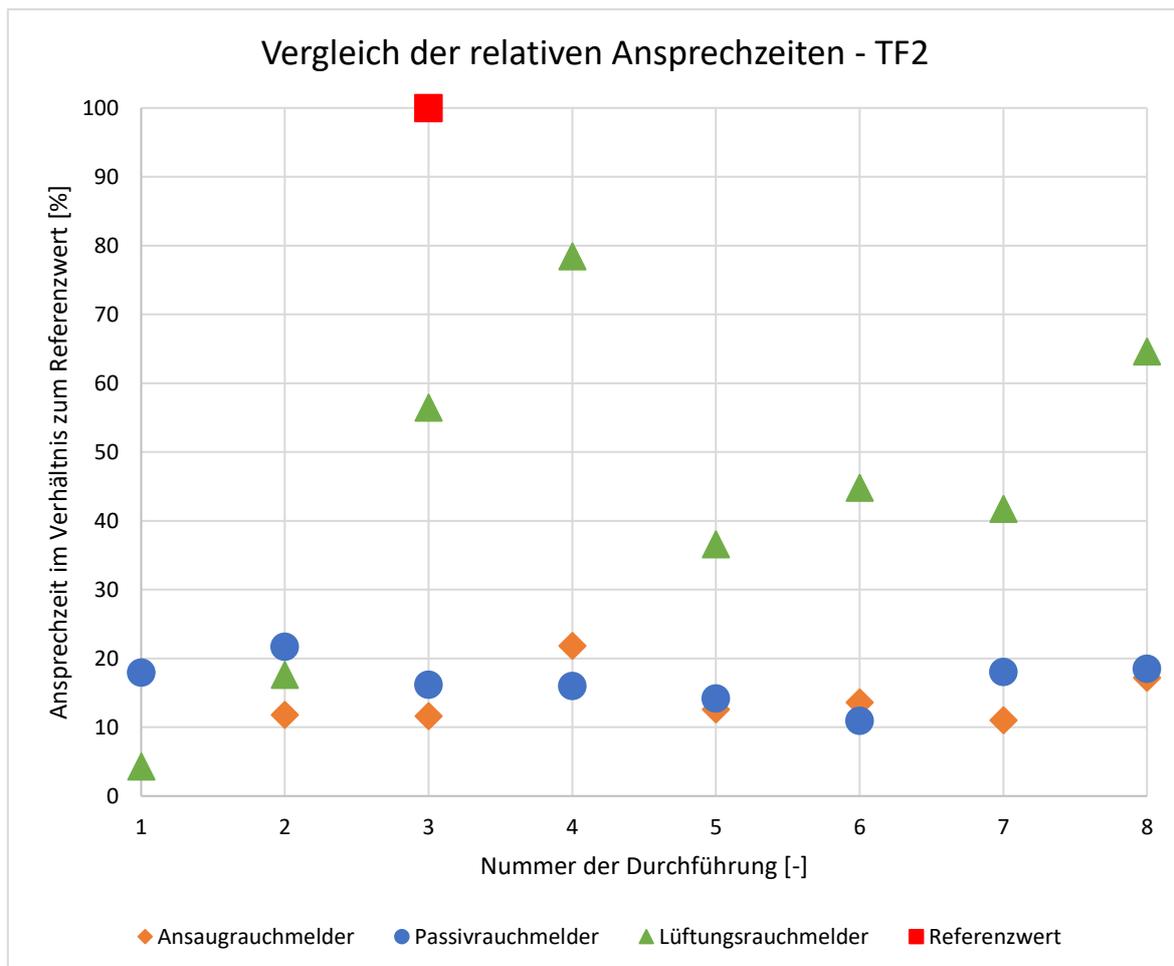


Diagramm 6. Vergleich der relativen Ansprechzeiten des Ansaugrauchmelders, des Passivrauchmelders und des Lüftungsrachmelders beim Pyrolyseschmelbrand.

Diagramm 7 zeigt die Ansprechzeiten des Ansaugrauchmelders und des Passivrauchmelders im Vergleich bei acht Versuchsdurchführungen des reduzierten offenen Flüssigkeitsbrands. Wie in Kapitel 2.4.3 bereits erwähnt, konnte der Lüftungsrachmelder den reduzierten offenen Flüssigkeitsbrand nicht detektieren. Weiterhin fällt auf, dass die Ansprechzeiten des Ansaugrauchmelders und des Passivrauchmelders während der ersten fünf Versuchsdurchführungen eine sehr ähnliche Entwicklung aufzeigen und gleichartig auf die sich von Versuch zu Versuch unterscheidenden Brände reagiert haben.

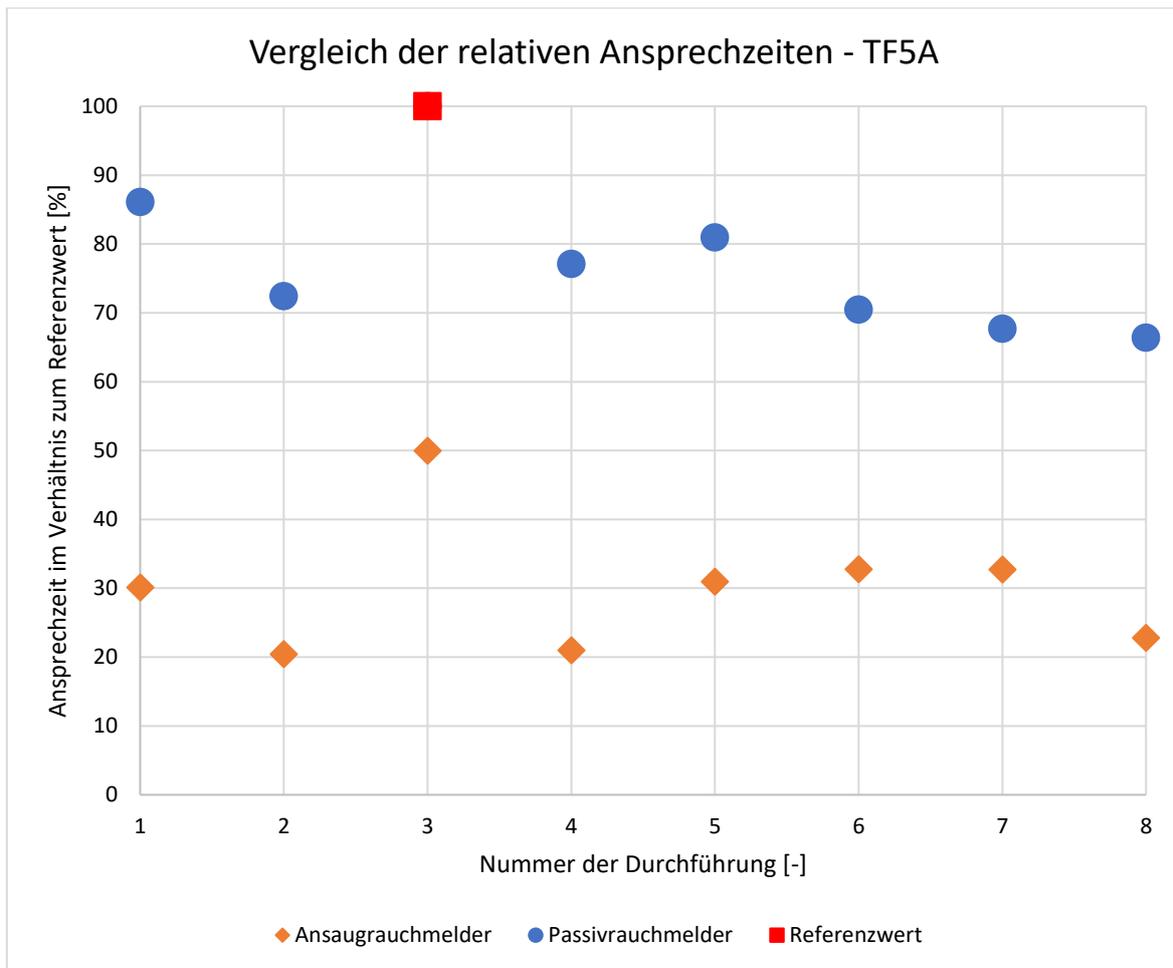


Diagramm 7. Vergleich der relativen Ansprechzeiten des Ansaugrauchmelders und des Passivrauchmelders beim reduzierten offenen Flüssigkeitsbrand.

Tabelle 14 zeigt die deskriptiven statistischen Größen Mittelwert und Standardabweichung der Ansprechzeiten des Ansaugrauchmelders, des Passivrauchmelders und des Lüftungsrachmelders für die Durchführung der Messreihen für den Pyrolyseschmelbrand und für den reduzierten offenen Flüssigkeitsbrand. Es ist zu erkennen, dass der Ansaugrauchmelder einen Pyrolyseschmelbrand im Mittel 12% schneller detektiert, als der bereits im Flugzeug verbaute Passivrauchmelder. Die Standardabweichung des Ansaugrauchmelders ist im Vergleich zum Passivrauchmelder vernachlässigbar größer. Der ebenfalls im Flugzeug verbaute Lüftungsrachmelder benötigt für die Detektion des Pyrolyseschmelbrands im Mittel 2,58 Mal so viel Zeit wie der Passivrauchmelder. Dabei weisen seine Ansprechzeiten eine sehr große Standardabweichung auf, die etwa 7,55 Mal der Standardabweichung des Passivrauchmelders entspricht. Aus den deskriptiven statistischen Größen für den reduzierten offenen Flüssigkeitsbrand ist ein deutlicher Vorteil des Ansaugrauchmelders gegenüber dem Passivrauchmelder zu erkennen. Der Ansaugrauchmelder detektiert einen reduzierten offenen Flüssigkeitsbrand im Mittel 61 % schneller als der Passivrauchmelder. Zusätzlich ist die Standardabweichung des Ansaugrauchmelders geringfügig kleiner als beim Passivrauchmelder. Der Lüftungsrachmelder hat den reduzierten offenen Flüssigkeitsbrand nicht detektieren können.

Tabelle 14

Vergleich von Mittelwert und Standardabweichung des Passivrauchmelders, des Ansaugrauchmelders und des Lüftungsrauchmelders bei Pyrolyseschwelbrand und reduziertem offenen Flüssigkeitsbrand

Brandmelde- systeme	Testfeuer 2 - Pyrolyseschwelbrand		Testfeuer 5A – Reduzierter offener Flüssigkeitsbrand	
	Mittelwert [%]	Standardab- weichung [%]	Mittelwert [%]	Standardab- weichung [%]
Referenz	100	-	-	-
Ansaug- rauchmelder	14,72	3,88	30,09	9,54
Passiv- rauchmelder	16,69	3,20	77,63	11,26
Lüftungs- rauchmelder	43,08	24,18	-	-

4.3 Vergleich der Ansprechzeiten mit den Anforderungen der CS 25.858 / FAR 25.858

Die vier wesentlichen Anforderungen an ein Brandmeldesystem im Frachtraum aus der CS 25.858 sind in Kapitel 2.2.1 dargestellt.

Die erste Anforderung gliedert sich in zwei wesentliche Punkte. Das Alarmsignal muss innerhalb einer Minute nach Beginn des Brands an die Flugbesatzung gesendet werden und das Alarmsignal muss ein visuelles Alarmsignal sein. Der zweite Punkt kann nicht bewertet werden, da die Ausführung des Alarmsignals als visuelles Signal für jedes einzubauende System bei der Integration umzusetzen ist. Ob die Systeme innerhalb von einer Minute nach Beginn des Brands einen Alarm melden, zeigen die gemessenen Ansprechzeiten aus dem Test, *Anhang C 2*. Beim Pyrolyseschwelbrand, einem Brand mit starker Rauchentwicklung, waren der Ansaugrauchmelder und der Passivrauchmelder bei jeder Versuchsdurchführung in der Lage, den Brand innerhalb von einer Minute zu erkennen. Der Lüftungsrauchmelder hingegen erfüllte diese Forderung ausschließlich in zwei von acht Versuchsdurchführungen. Beim reduzierten offenen Flüssigkeitsbrand, einem Brand mit sehr schwacher Rauchentwicklung, konnte hingegen die Anforderung weniger oft erfüllt werden. Der Ansaugrauchmelder erfüllte die Anforderung in drei von acht Versuchsdurchführungen, der Passivrauchmelder erfüllte die Anforderung in keiner Versuchsdurchführung.

Das Prüfen der Anforderung ID 2 war kein Bestandteil der durchgeführten Tests und kann aus diesem Grund nicht bewertet werden. Anforderungen ID 3 und ID 4 können ebenfalls nicht bewertet werden, da diese Anforderungen für jedes einzubauende System bei der Integration umzusetzen sind.

5 Bewertung

Die Ergebnisse aus Kapitel 4.1 lassen darauf schließen, dass Brände mit stärkerer Rauchentwicklung, wie der Pyrolyseschwelbrand, schneller erkannt werden, als Brände mit geringerer Rauchentwicklung. Bei einem reduzierten offenen Flüssigkeitsbrand ist die Rauchentwicklung in einem signifikanten Maß kleiner, sodass ein reduzierter offener Flüssigkeitsbrand tendenziell später erkannt wird als ein Pyrolyseschwelbrand. Dieser Aspekt macht sich am deutlichsten beim Passivrauchmelder und beim Lüftungsrauchmelder bemerkbar.

Der Vergleich der Ansprechzeiten der Brandmeldesysteme, Kapitel 0, lässt vermuten, dass der Passivrauchmelder und der Lüftungsrauchmelder eine geringere Detektionssensibilität aufweisen als der Ansaugrauchmelder in seiner Test-Konfiguration. Während beim Pyrolyseschwelbrand kaum ein Unterschied in den Ansprechzeiten zwischen Passivrauchmelder und Ansaugrauchmelder wahrnehmbar war, zeigt die Auswertung des reduzierten offenen Flüssigkeitsbrands, dass der Ansaugrauchmelder die geringe Rauchentwicklung trotz verdünnter Luftprobe schneller erkennt als der Passivrauchmelder. Der Passivrauchmelder, der dieselbe Technologie besitzt, wie der Lüftungsrauchmelder, war im Test mit hoher Wahrscheinlichkeit in der Lage, die Brände schneller zu erkennen als der Lüftungsrauchmelder, weil er nicht wie der Lüftungsrauchmelder eine verdünnte Rauchprobe erhielt, sondern seine komplette Messkammer mit 100 Prozent der Atmosphäre aus dem Prüfvolumen geflutet wurde. Der Fakt, dass der Lüftungsrauchmelder nicht in der Lage war den reduzierten offenen Flüssigkeitsbrand zu detektieren, weist darauf hin, dass der Lüftungsrauchmelder eine größere Menge an Rauchaerosolen in der Messkammer zur Detektion eines Brands benötigt, als die Menge, die ihm beim Test zugeführt wurde. Die durchgeführten Tests lassen keine Aussage darüber zu, ob die aktive Absaugung der Luft aus dem Prüfvolumen eine Verkürzung der Ansprechzeit begünstigt oder nicht, da die Ergebnisse einen deutlichen Unterschied in der Sensibilität der beiden Rauchansaugsysteme Ansaugrauchmelder und Lüftungsrauchmelder vermuten lassen. Der Unterschied in der Sensibilität lässt folglich ebenfalls keine Rückschlüsse auf den Leistungsvergleich der unterschiedlichen Detektionstechnologien zu.

Einen Pyrolyseschwelbrand, bzw. einen Brand mit großer Rauchentwicklung, entdecken der Ansaugrauchmelder und der Passivrauchmelder in nahezu der gleichen Zeit. Der Einsatz des Ansaugrauchmelders anstelle des Passivrauchmelders würde nur einen geringfügigen Vorteil bieten. Der Einsatz des Lüftungsrauchmelders zur Detektion eines Pyrolyseschwelbrands ist aufgrund der sehr großen Streuung der Ansprechzeiten nicht zu empfehlen. Im Fall des reduzierten offenen Flüssigkeitsbrands oder eines Brands mit geringer Rauchentwicklung, würde der Einsatz des Ansaugrauchmelders aufgrund seiner hohen Sensibilität deutliche Vorteile in der Detektionszeit bringen und ist gegenüber dem Einsatz des Passivrauchmelders und des Lüftungsrauchmelders zu empfehlen.

Ein Ansaugrauchmelder, wie der für die Tests verwendete, kann sowohl eine Anwendung im Lower-Deck-Frachtraum als auch eine Anwendung im Main-Deck-Frachtraum finden. Folgend wird ein

grobes Konzept zur Implementierung in beiden Frachträumen vorgestellt. Dabei sind durch Klimatisierung oder durch eine Temperaturverteilung hervorgerufene Strömungsverhältnisse nicht berücksichtigt. Auch wenn eine einzelne Detektionseinheit mit seiner maximal möglichen anschließbaren Rohrlänge die Länge von ca. 50 Metern des Main-Deck-Frachtraums abdecken könnte, lohnt es sich über eine Aufteilung der Frachträume in verschiedene Zonen nachzudenken, *Abbildung 26*. Dadurch könnte ein Brand im Frachraum genauer lokalisiert werden. Zum Beispiel ist eine Konfiguration von zwei Detektionseinheiten je Lower-Deck-Frachtraum und vier Detektionseinheiten im Main-Deck-Frachtraum vorstellbar. Die eingehenden Signale der jeweiligen Brandmeldesysteme geben dann Auskunft darüber, in welchem Frachraum und in welchem Bereich des Frachtraums ein Brand entstanden ist. Die Anzahl der Detektionseinheiten ist also mit der Anzahl der überwachten Zonen gleichzusetzen. Durch Abdeckung von Teilbereichen mit Rohren zweier Detektionseinheiten, können durch die Realisierung einer Zwei-Melder-Abhängigkeit die Zonen ohne die Einbringung einer weiteren Detektionseinheit weiter diskretisiert werden.

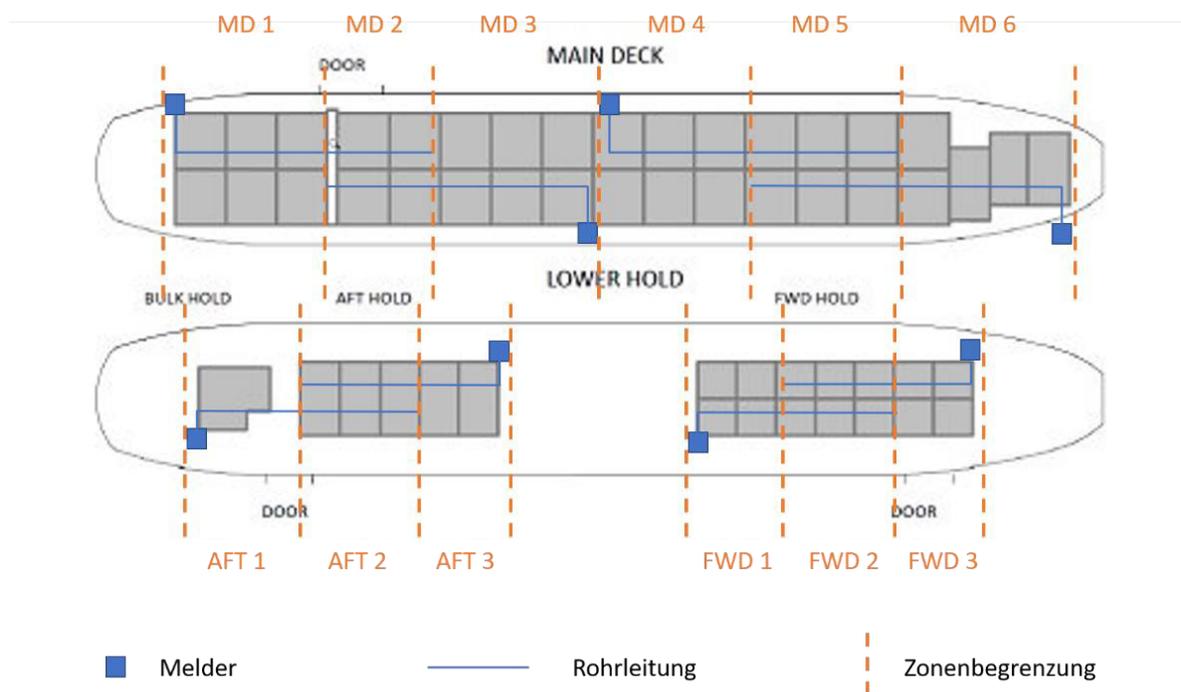


Abbildung 26. Integrationskonzept für Ansaugrauchmelder in MD- und LD- Frachträumen.

Anschließend ist die Anzahl der Öffnungen pro Rohrleitung zu definieren. Aus Gesprächen mit dem Hersteller ist die Empfehlung von einer Ansaugöffnung pro Meter [54] hervorgegangen. Es ist zu beachten, dass bei einer größeren Anzahl an Ansaugöffnungen ein größerer Volumenstrom durch die Detektionseinheit geschleust wird. Wenn nur eine Ansaugöffnung mit Rauch beaufschlagt wird, dann muss die Sensibilität der Detektionseinheit bei einer großen Anzahl an Ansaugöffnungen höher eingestellt sein, als bei einer kleinen Anzahl an Ansaugöffnungen. Eine Montage der Detektions-

einheiten und des Rohrnetzes vor der Frachtraumverkleidung ist aus Platzgründen nicht realisierbar. Eine Montage hinter der Frachtraumverkleidung ist realisierbar und schützt das System zusätzlich vor Beschädigungen, die zum Beispiel beim Be- oder Entladen des Frachtraums auftreten können. Es ist zu empfehlen, das Rohrnetz eher im Deckenbereich des Frachtraums anzubringen, als im Seitenbereich, da der Rauch bei einer großen Hitzeentwicklung durch den Brandherd mit hoher Wahrscheinlichkeit nach oben aufsteigt, vgl. Kapitel 2.1.2.

Der Kamerabrandmelder hatte vermutlich aufgrund der Sichtfeldeinschränkungen und der Positionierung direkt unter der Decke keine Möglichkeit, den Pyrolyseschmelbrand oder den reduzierten offenen Flüssigkeitsbrand zu detektieren. Der simulierte Bereich von fünf Zentimetern zwischen Frachtcontainer und Frachtraumdecke ist möglicherweise zu klein für den Kamerabrandmelder, um eine vertikale oder horizontale Bewegung der Rauchsäule wahrzunehmen. Außerdem liegt die Vermutung nahe, dass die Erfassung des Bereichs sehr nah an der Decke dazu führte, dass lediglich eine Trübung der Atmosphäre (Umgebungsrauch) wahrgenommen wurde, Kapitel 2.1.2. Das kann u. a. daran liegen, dass sich der Rauch zusätzlich in Richtung des Kameraobjektivs bewegt. Eine solche Bewegung kann von dem Kamerabrandmelder nicht erfasst werden. Einen weiteren Einfluss auf das Detektionsvermögen des Kamerabrandmelders hatte vermutlich die Farbgebung der Prüfvolumenflächen im Test. Der Kamerabrandmelder ist auf einen hinreichenden Kontrast des Hintergrunds zu der Farbe des Rauchs angewiesen. Durch den weißen Hintergrund, der an die Farbgebung im Frachtraum angelehnt ist, Kapitel 2.4.2, war dieser Kontrast mutmaßlich nicht ausreichend und der Rauch für die Kamera nicht zu erkennen. Die Flackerfrequenz, die auf den Videos des Kamerabrandmelders oben deutlich wahrzunehmen ist, gilt im Algorithmus als Merkmal für einen Brand. Jedoch ist sie zur Detektion einer offenen Flamme nicht ausreichend. Für eine Flammendetektion wird eine direkte Sicht auf die Flamme benötigt.

Da für den Kamerabrandmelder unten keinerlei Maßnahmen zur Anpassung an die Eigenschaften im Frachtraum getroffen wurden, können für ihn keine Aussagen zum Verhalten im Frachtraum getroffen werden. Dass beim Pyrolyseschmelbrand in allen Versuchsdurchführungen ein Alarm bereits gemeldet wurde, wenn sich nur eine Armbewegung im Bild befand, ist eventuell auf eine zu hohe Sensibilität des Detektionsalgorithmus zurückzuführen. Beim reduzierten offenen Flüssigkeitsbrand wurden die Alarme erst bei Vorhandensein einer Flamme ausgegeben. Die kleinere Stichprobe, bestehend aus fünf vorhandenen Ansprechzeiten für den reduzierten offenen Flüssigkeitsbrand, deutet dabei auf eine im Vergleich mit den Ansprechzeiten der anderen Brandmeldesysteme sehr zügige Erkennung des Brands hin. Unter den gegebenen Bedingungen im Frachtraum, ist der Einsatz des Kameramelders nicht zu empfehlen.

Die Branderkennung des Kamerabrandmelders bei direkter Sicht auf den Brandherd funktioniert zügiger, als die Branddetektion aller anderen getesteten Brandmeldesysteme, jedoch ist dieser Anwendungsfall in einem Flugzeugfrachtraum nahezu ausgeschlossen. Generell müsste für den Betrieb der Kamera eine Lichtquelle in den Frachtraum eingebracht werden, die den Frachtraum mit

einer Beleuchtungsstärke von mindestens sieben Lux ausleuchtet. Eine Anwendung im Lower-Deck-Frachtraum ist nicht realisierbar, da das Sichtfeld der Kamera durch die Begrenzung von Frachtraumdecke und Frachtcontainer auf eine Höhe von ca. fünf Zentimeter eingeschränkt ist. Da im Main-Deck-Frachtraum ein höherer Abstand zwischen Frachtraumdecke und Frachtcontainer zu Verfügung stehen kann, ist der Einsatz eines Kamerabrandmelders denkbar.

Die dokumentierten Ansprechzeiten aus den Tests lassen schlussfolgern, dass eine Detektion des Brands innerhalb von einer Minute, vgl. Kapitel 4.3, nur möglich ist, wenn innerhalb der ersten Minute eine ausreichende Rauchentwicklung stattfindet. Die Größe ausreichende Rauchentwicklung ist für jedes Brandmeldesystem unterschiedlich zu definieren und korreliert mit der Größe geeignete Sensibilität des Brandmeldesystems. Je sensibler ein Brandmeldesystem ist, desto geringer ist die Menge an Rauch, die es zur Detektion benötigt. Da die Rauchentwicklung kein Parameter ist, der beeinflusst werden kann und auch nicht beeinflusst werden soll, ist es notwendig für eine ausreichende Sensibilität des Brandmeldesystems im Frachtraum zu sorgen. Dabei ist zu beachten, dass die zu verwendende Sensibilität z. B. durch die Positionierung der Detektionseinheiten im zu überwachenden Bereiche beeinflusst werden kann, weil sich eine definierte Rauchkonzentration nicht mit der gleichen Wahrscheinlichkeit an jeder Stelle im zu überwachenden Bereich aufhält. Weiterhin ist zu berücksichtigen, dass der Testaufbau kleinere Maße aufwies, als ein Flugzeugfrachtraum, vgl. Kapitel 2.4.1. Demnach ist es denkbar, dass das Kriterium der Branddetektion innerhalb einer Minute nach Beginn des Brands in der realen Frachtraumumgebung mit größeren Dimensionen nicht erfüllt wird. Zusätzlich war der Brandherd im Test nicht abgeschirmt. Da die Brandmeldesysteme die Regel der Detektion innerhalb einer Minute nach Beginn des Brands nur knapp einhalten, *Anhang C 2*, liegt die Vermutung nahe, dass bei einer Abschirmung des Brandherds im Test, wie z. B. durch einen Frachtcontainer, die Regel selbst bei starker Rauchentwicklung nicht eingehalten worden wäre. Dieses Ergebnis deckt sich mit den Erkenntnissen aus [1].

6 Zusammenfassung

Diese empirische Arbeit versucht nachzuweisen, ob noch nicht luftfahrtzugelassene Brandmeldesysteme mit Technologien, die sich noch nicht im Flugzeug befinden, schneller auf Brände ansprechen, als bisher im Flugzeug verbaute Brandmeldesysteme. Zu diesem Zweck wurden repräsentative Tests zur Ermittlung der Ansprechzeiten von vier untersuchten Brandmeldesystemen auf zwei unterschiedliche Testfeuer erarbeitet und durchgeführt.

Zur Spezifikation der Tests, Kapitel 3, wurden die zu untersuchenden Brandmeldesysteme ausgewählt, Kapitel 3.1, ein Testaufbau entwickelt, Kapitel 3.2, und eine Testprozedur erarbeitet, Kapitel 3.3.

Basierend auf einer Anforderungsanalyse von luftrechtlichen Bauvorschriften der EASA und der FAA, von Frachtraumcharakteristika zweier Flugzeugmuster und von den erhaltenen Anforderungen durch eine Frachtfluggesellschaft wurden folgende Brandmeldesysteme ausgewählt und getestet. Zwei Systeme, ein Passivrauchmelder und ein Lüftungsrauchmelder, werden bereits im Flugzeug verwendet und wurden aus diesem Grund als Vergleichsobjekte in die Tests aufgenommen. Weiterhin wurde ein Ansaugrauchmelder ausgewählt, da eine aktive Absaugung der Luft aus einem Überwachungsbereich eine schnelle Detektion erwarten lässt. Zusätzlich wurde ein Kamerabrandmelder ausgewählt, da seine Detektionsmethode eine Branderkennung aus der Distanz erlaubt und somit ebenfalls eine schnelle Branddetektion erwarten lässt. Die Technologien Flammenmelder und Wärmemelder sind nicht mit der Forderung nach einer flugzeugbasierten Lösung vereinbar und wurden deshalb ausgeschlossen. Bei der Verwendung eines Durchlichtrauchmelders ist davon auszugehen, dass operative Aspekte zu einer Beschädigung des Brandmeldesystems oder einem Ausfallen seiner Funktion führen können. Dieser Grund führte zum Ausschluss.

Die Entwicklung des Testaufbaus beinhaltete die Anpassung der Testfeuer, Kapitel 3.2.1, die Konstruktion eines Prüfvolumens, Kapitel 3.2.2, die Positionierung der Brandmeldesysteme im Prüfvolumen, Kapitel 3.2.3, die Konfiguration der Brandmeldesysteme, Kapitel 3.2.4, sowie den elektrischen Aufbau und die Datenerfassung, Kapitel 3.2.5.

Als Testfeuer wurden ein Pyrolyseschmelbrand und ein reduzierter offener Flüssigkeitsbrand verwendet. Aus einer Funktionenanalyse ging hervor, dass die Brandmeldesysteme in einem abgeschlossenen, einsehbar und begehbaren Prüfvolumen getestet werden, in dem relevante Gegebenheiten eines Frachtraums für die Brandmeldesysteme abgebildet werden, sodass die Tests als repräsentativ gelten. Für den Ansaugrauchmelder und den Kamerabrandmelder waren Einstellungen zur Detektionssensibilität vorzunehmen. Die Datenerfassung wurde über ein Datenerfassungsmodul sichergestellt, das die Alarmsignale als diskrete Pegel erfassen kann. Die zugehörige Software visualisierte die diskreten Pegel auf einem Laptop sodass sie über ein Bildschirmaufnahmeprogramm mitgeschnitten werden konnten.

Die Testprozedur wurde auf Basis einer Systems-Engineering-Analyse erstellt. Es wurde ein Dokument erarbeitet, das eine Anleitung zur Durchführung der Rauchmeldertests beinhaltet. Darin wurden relevante Informationen, wie u. a. verwendete Messgeräte und während des Tests gemessene Kennwerte, dokumentiert.

Die Auswertung der repräsentativen Tests, Kapitel 4, umfasste die Darstellung, Kapitel 4.1 und den Vergleich, Kapitel 0, der Ansprechzeiten der Brandmeldesysteme, sowie einen Vergleich mit der luftrechtlichen Bauvorschrift CS 25.858, Kapitel 4.3.

Aus den ermittelten Ansprechzeiten des Ansaugrauchmelders, des Passivrauchmelders und des Lüftungsrauchmelders ging hervor, dass ein Pyrolyseschmelbrand deutlich schneller erkannt wird, als ein reduzierter offener Flüssigkeitsbrand. Der Ansaugrauchmelder und der Passivrauchmelder erkannten den Pyrolyseschmelbrand in einer ähnlichen Zeit. Der Lüftungsrauchmelder hat den Pyrolyseschmelbrand später erkannt. Der Kamerabrandmelder oben detektierte den Pyrolyseschmelbrand nicht. Beim reduzierten offenen Flüssigkeitsbrand detektierte der Ansaugrauchmelder deutlich früher als der Passivrauchmelder, was auf eine höhere Detektionssensibilität des Ansaugrauchmelders schließen lässt. Der Lüftungsrauchmelder war nicht in der Lage, den reduzierten offenen Flüssigkeitsbrand zu erkennen. Der Kamerabrandmelder oben detektierte den reduzierten offenen Flüssigkeitsbrand nicht. Der Einsatz des Lüftungsrauchmelders zur Detektion eines Pyrolyseschmelbrands ist aufgrund der sehr großen Streuung der Ansprechzeiten nicht zu empfehlen. Der Ansaugrauchmelder ist sowohl für den Einsatz bei Bränden mit geringer Rauchentwicklung als auch bei Bränden mit hoher Rauchentwicklung zu empfehlen und gegenüber den Systemen Passivrauchmelder und Lüftungsrauchmelder zu bevorzugen. Die Einbringung eines Kamerabrandmelders in den Frachtraum ist zum heutigen Stand der Technik nicht zu empfehlen.

Der Vergleich der Ansprechzeiten mit den Anforderungen aus der luftrechtlichen Bauvorschrift CS 25.858 zeigte, dass der Passivrauchmelder und der Ansaugrauchmelder die Forderung nach der Detektion innerhalb einer Minute nur beim Pyrolyseschmelbrand einhalten konnten. Der Lüftungsrauchmelder erfüllte die Forderung nur in zwei von acht Durchführungen. Den reduzierten offenen Flüssigkeitsbrand konnte ausschließlich der Ansaugrauchmelder in drei von acht Versuchsdurchführungen detektieren.

Anschließend wurden Handlungsempfehlungen, für den Anwendungsfall eines Kamerabrandmelders und eines Ansaugrauchmelders im Frachtraum, abgeleitet, Kapitel 5.

7 Ausblick

Anhand der vorliegenden Ergebnisse aus der Durchführung repräsentativer Tests zum Vergleich der Ansprechzeiten von Brandmeldesystemen im Frachtraum haben sich mehrere Forschungsfragen eröffnet, die als Grundlage für weitere Untersuchungen dienen können.

In Bezug auf die Tatsache, dass aus den vorliegenden Ergebnissen nicht hervorgeht, ob Rauchansaugsysteme die Ansprechzeit auf einen Brand gegenüber passiven Systemen positiv beeinflussen, sind weiterführende Tests mit demselben Testaufbau denkbar, in denen Rauchansaugsysteme mit passiven Systemen derselben Sensibilität verglichen werden.

Da nicht aus der Luftfahrt stammende Rauchansaugsysteme sehr hohe Sensibilitäten erreichen und dadurch Brände sehr früh detektieren können, lohnt es sich, über ein Integrations- und Zulassungskonzept für Ansaugrauchmelder im Frachtraum nachzudenken. Für die Erarbeitung eines Integrationskonzepts sollten die Strömungsverhältnisse im Frachtraum analysiert werden. Zur Platzierung eines Ansaugrohrnetzes muss klar beschrieben sein, in welche Teile des Frachtraums der Rauch aufgrund von Strömung gelangt und in welchen Teilen er sich mit großer Wahrscheinlichkeit nicht aufhält.

Ein weiterer zu betrachtender Punkt, der für jedes Brandmeldesystem einzeln zu prüfen ist, ist die Empfindlichkeit gegenüber Störgrößen, z. B. Sand oder Tierstreu im Frachtraum. Zur Realisierung einer optimalen Funktionalität des Brandmeldesystems sollte das Brandmeldesystem zwischen Rauchaerosolen und häufig auftretenden Störgrößen differenzieren können. Gleichzeitig sollte es eine sehr hohe Empfindlichkeit gegenüber Rauchaerosolen aufweisen. Der optimale Kompromiss aus beiden Variablen ist zu ermitteln.

Ein weiteres Forschungsfeld stellt der potentielle Einsatz von Kamerabrandmeldern im Main-Deck-Frachtraum dar, der nicht gänzlich ausgeschlossen wurde. Im Anschluss an diese Arbeit kann in praktischen Tests der Einsatz von Kamerabrandmeldern im Main-Deck-Frachtraum evaluiert werden. Dabei sollten die andersartigen Sichtfeldeinschränkungen, die in der Main-Deck-Frachtraumumgebung gelten, u. a. ein größerer Bereich zwischen Frachtcontainer und Decke und die konkave Form der Frachtraumdecke, abgebildet werden. Außerdem sind Untersuchungen zu einer geeigneten Farbgebung des Frachtraums notwendig, da diese einen großen Einfluss auf das Detektionsvermögen des Kamerabrandmelders ausüben kann. Es sollte eine Farbgebung ermittelt werden, die einen hinreichenden Kontrast für eine Rauchdetektion bietet. Dabei muss berücksichtigt werden, dass das Verbrennen verschiedener Substanzen zu unterschiedlichen Rauchfarben führt. Eine für Rauchdetektion optimierte Frachtraumfarbgebung sollte demnach für ein großes und das am häufigsten auftretende Spektrum von Rauchfarben einsetzbar sein.

Nicht unbeachtet bleiben sollte der Fakt, dass vermutlich keines der Brandmeldesysteme einen Brand innerhalb von einer Minute im Frachtraum detektieren kann, so wie es in der luftrechtlichen Bauvorschrift CS 25.858 gefordert ist. In einer anschließenden Studie könnte erforscht werden, anhand

welcher Parameter die Detektionszeit auf unter eine Minute verkürzt werden kann und in welchem Maße jeder Parameter einen Beitrag dazu leisten kann.

Abschließend ist festzuhalten, dass die vorliegende Arbeit die anfängliche Fragestellung nach schnelleren Brandmeldesystemen, als bereits in Flugzeugen installierte Brandmeldesysteme, beantwortet hat. Zusätzlich wurden weiterführende offene Fragestellungen zu dem Thema formuliert. Damit kann diese Arbeit eine Grundlage für weitere Forschungen zu einer optimierten Raucherkennung im Frachtraum von Flugzeugen darstellen.

IX Literaturverzeichnis

- [1] IATA: *Three Accidents Involving Lithium Batteries - 1st Edition*. 1st Edition
- [2] MATT THURBER: *Cargo Carriage of Lithium Batteries Suspected in Some Accidents*. 05.07.2018. URL <https://www.ainonline.com/aviation-news/aviation-international-news/2012-02-01/cargo-carriage-lithium-batteries-suspected-some-accidents> – Überprüfungsdatum 2018-07-05
- [3] KUNKELMANN, Jürgen: *Brandschutz-Forschung der Bundesländer : Untersuchung des Brandverhaltens von Lithium-Ionen und Lithium-Metall-Batterien in verschiedenen Anwendungen und Ableitung einsatztaktischer Empfehlungen*. URL <https://www.ffb.kit.edu/download/IMK%20Ber.%20Nr.%20192%20Kunkelmann%20Lithium-Ionen-%20und%20Lithium-Metall-Batterien%20Brandbekaempfung.pdf> – Überprüfungsdatum 2018-04-21
- [4] BUSER, Michael: *Lithium Batterien : Brandgefahren und Sicherheitsrisiken - Effektive Schadenverhütung und wirksame Brandbekämpfung*. URL <https://www.riskexperts.at/ueber-uns/wissenswertes-downloads/lithiumbatterien/> – Überprüfungsdatum 2018-04-21
- [5] MCCAUSLAND, Richard ; IATA: *Lithium Battery Guidance Document : Transport of Lithium Metal and Lithium Ion Batteries*. URL <https://www.iata.org/whatwedo/cargo/dgr/Pages/lithium-batteries.aspx>. – Aktualisierungsdatum: 2016-01-07 – Überprüfungsdatum 2018-03-11
- [6] VEREINTE NATIONEN: *UN Model Regulations - UN Recommendations on Transport of Dangerous Goods - Model Regulations : Eighteens revised edition*. URL http://www.unece.org/trans/danger/publi/unrec/rev18/18files_e.html – Überprüfungsdatum 2018-05-02
- [7] ICAO/ICCAIA: *Cargo Compartment Fire Containment Characteristics : ICAO Multidisciplinary Cargo Safety Group*. URL <https://www.icao.int/safety/cargosafety/Pages/default.aspx?RootFolder=%2Fsafety%2Fcargosafety%2FMCSG%20Meetings%2FMeeting%202%20%28Paris%2C%2019%20to%2021%20July%202017%29&FolderCTID=0x0120001CDF7F3A5A0EA1479CA7F3E9A1F01E20&View=%7BDBA4794E%2D217A%2D47B0%2DB78D%2DF04B6E1062D4%7D> – Überprüfungsdatum 2018-07-05
- [8] LMcGUIGAN ; ICAO: *International Multidisciplinary Lithium Battery Transport Coordination Meeting : First Meeting*. URL <https://www.icao.int/safety/DangerousGoods/Pages/Multidisciplinary.aspx>. – Aktualisierungsdatum: 2014-02-04 – Überprüfungsdatum 2018-05-05
- [9] XCHEN ; ICAO: *International Multidisciplinary Lithium Battery Transport Coordination Meeting : Second Meeting*. URL <https://www.icao.int/safety/DangerousGoods/Pages/Multidisciplinary.aspx>. – Aktualisierungsdatum: 2014-09-09 – Überprüfungsdatum 2018-05-05
- [10] XCHEN ; ICAO: *International Multidisciplinary Lithium Battery Transport Coordination Meeting : Third Meeting*. URL

- <https://www.icao.int/safety/DangerousGoods/Pages/Multidisciplinary.aspx>. – Aktualisierungsdatum: 2015-08-05 – Überprüfungsdatum 2018-03-11
- [11] ADG-1 ; FAA: *SAFO 10017: Risks in Transporting Lithium Batteries in Cargo by Aircraft*. URL https://www.faa.gov/news/press_releases/media/safo10017.pdf. – Aktualisierungsdatum: 08.10.10 – Überprüfungsdatum 2018-03-11
- [12] RHA ; EASA: *Safety Information Bulletin : Transport of Lithium Batteries as Cargo by Air*. URL <https://ad.easa.europa.eu/ad/2015-19>. – Aktualisierungsdatum: 2015-10-05 – Überprüfungsdatum 2018-03-11
- [13] CTPC08 ; IATA: *Lithium Batteries : Risk Mitigation Guidance for Operators*. Montréal, Genf
- [14] TRÄNKLER, Hans-Rolf (Hrsg.); REINDL, Leonhard M. (Hrsg.): *Sensortechnik : Handbuch für Praxis und Wissenschaft*. 2., völlig neu bearb. Aufl. Berlin : Springer Vieweg, 2014 (VDI-Buch)
- [15] BROCKHAUS: *Rauch*. URL <https://brockhaus.de/ecs/enzy/article/rauch> – Überprüfungsdatum 2018-04-29
- [16] BROCKHAUS: *Aerosol*. URL <https://brockhaus.de/ecs/enzy/article/aerosol> – Überprüfungsdatum 2018-04-29
- [17] GOERTZ, Roland ; GREGEL, Rüdiger: *Untersuchungen zur Charakterisierung von Brandrauch*. In: *Umweltwissenschaften und Schadstoff-Forschung* 9 (1997), Nr. 6, S. 361–368
- [18] BROCKHAUS: *Rauchgase*. URL <https://brockhaus.de/ecs/enzy/article/rauchgase> – Überprüfungsdatum 2018-04-29
- [19] BROCKHAUS: *Asche*. URL <https://brockhaus.de/ecs/enzy/article/asche-20> – Überprüfungsdatum 2018-04-29
- [20] BROCKHAUS: *Ruß*. URL <https://brockhaus.de/ecs/enzy/article/russ-20> – Überprüfungsdatum 2018-04-29
- [21] RODEWALD, Gisbert: *Brandlehre*. 6., überarb. Aufl. Stuttgart : Kohlhammer, 2007
- [22] HERSTELLER DES KAMERABRANDMELDERS 5: *Kamerabrandmelder 5*. Produktdatenblatt. 2018-03-10. Larissa Rohlfs (Adressat)
- [23] DIN-Norm. 2011-03-01. *DIN EN 54-1 - Brandmeldeanlagen - Teil 1: Einleitung*
- [24] VERTRIEBSMITARBEITER FÜR DIE KAMERABRANDMELDER 3 UND 4: *Rauchdetektionsalgorithmus der Kamerabrandmelder*. Telefongespräch. 2018-03-23. Larissa Rohlfs (Adressat)
- [25] VERTRIEBSMITARBEITER FÜR DEN KAMERABRANDMELDER 5: *Algorithmus des Kamerabrandmelders 5*. Telefongespräch. 2018-05-24. Larissa Rohlfs (Adressat)
- [26] DIN-Norm. *DIN EN 54-20 - Brandmeldeanlagen - Teil 20: Ansaugrauchmelder*

- [27] WAGNER: *EN 54-20 Klassifizierung: Erstmals Transparenz für Rauchansaugsysteme*. URL http://www.wagner-russia.com/uploads/tx_wdownload/WAGNER_EN_54-20_D_01.pdf – Überprüfungsdatum 2018-07-04
- [28] EASA: *The Agency: Facts and figures*. URL <https://www.easa.europa.eu/the-agency/the-agency> – Überprüfungsdatum 2018-05-01
- [29] EASA: *Certification Specifications and Acceptable Means of Compliance for Large Aeroplanes* (idF v. 21) (2018). URL <https://www.easa.europa.eu/document-library/certification-specifications/cs-25-amendment-21> – Überprüfungsdatum 2018-05-01
- [30] EASA: *CS 25.858: Ausschnitt aus CS-25 Amendment 21*. URL https://www.easa.europa.eu/sites/default/files/dfu/CS-25_Amdt%203_19.09.07_Consolidated%20version.pdf – Überprüfungsdatum 2018-05-01
- [31] FAA: *Federal Aviation Administration*. URL <https://www.faa.gov/> – Überprüfungsdatum 2018-05-01
- [32] FAA: *Standard Airworthiness Certification: Regulations*. URL https://www.faa.gov/aircraft/air_cert/airworthiness_certification/std_awcert/std_awcert_regs/regs/ – Überprüfungsdatum 2018-05-01
- [33] FAA: *Cargo or baggage compartment smoke or fire detection systems*. URL <https://www.gpo.gov/fdsys/pkg/CFR-2012-title14-vol1/pdf/CFR-2012-title14-vol1-sec25-858.pdf> – Überprüfungsdatum 2018-05-01
- [34] SAE INTERNATIONAL: *About SAE International*. URL <https://www.sae.org/about/> – Überprüfungsdatum 2018-05-01
- [35] AS8036. Dezember 2013. *Aerospace Standard*
- [36] BOEING: *777 - Baggage Cargo Loading Manual*. Internes Dokument
- [37] BOEING COMMERCIAL AIRPLANES: *777-200/300: Airplane Characteristics for Airport Planning*. URL http://www.rinconcete.com/files/volando_77723_caracteristicas.pdf – Überprüfungsdatum 2018-07-07
- [38] BOEING COMMERCIAL AIRPLANES: *MD-11 - Cargo Loading Manual: Lufthansa Cargo AG*. Internes Dokument
- [39] BOEING COMMERCIAL AIRPLANES: *MD-11: Airplane Characteristics for Airport Planning*. URL <http://www.boeing.com/resources/boeingdotcom/commercial/airports/acaps/md11.pdf> – Überprüfungsdatum 2018-07-07
- [40] LUFTHANSA CARGO AG: *Paletten, Container und Flotte*. URL https://lufthansa-cargo.com/documents/20184/27422/lhc13026_lademittelbroschuere_20140402_nicht_druckbar.pdf/65d54532-5bcc-4315-9e0f-4840cb239953 – Überprüfungsdatum 2018-07-08
- [41] LUFTHANSA CARGO: *B777F / Lufthansa Cargo*. URL https://lufthansa-cargo.com/de_DE/fleet-ulds/fleet/b777f?QUERY – Überprüfungsdatum 2018-07-07

- [42] HERSTELLER DES PASSIVRAUCHMELDERS: *Passivrauchmelder*. Produktdatenblatt. 2018-03-10. Larissa Rohlfs (Adressat)
- [43] AIRBUS S.A.S: 26-16-15 - Detector - Smoke : Internes Dokument. In: *Airbus Illustrated Parts Catalogue*.
- [44] HERSTELLER DES LÜFTUNGSGRAUCHMELDERS: *Lüftungsrauchmelder*. Produktdatenblatt. Larissa Rohlfs (Adressat)
- [45] AIRBUS S.A.S: 26-15-15 - Detector - Smoke, Duct : Internes Dokument. In: *Airbus Illustrated Parts Catalogue*.
- [46] PAPULA, Lothar: *Mathematische Formelsammlung : Für Ingenieure und Naturwissenschaftler*. 10., überarbeitete und erweiterte Auflage. Wiesbaden : Vieweg+Teubner, 2009
- [47] POHL, Klaus ; RUPP, Chris: *Basiswissen Requirements Engineering : Aus- und Weiterbildung nach IREB-Standard zum Certified Professional for Requirements Engineering : foundation level nach IREB-Standard*. 4., überarbeitete Auflage. Heidelberg : dpunkt, 2015
- [48] HERSTELLER DER ANSAUGRAUCHMELDER 1 BIS 4: *Ansaugrauchmelder 2*. Produktdatenblatt. 2018-03-10. Larissa Rohlfs (Adressat)
- [49] HERSTELLER DES KAMERABRANDMELDERS 1: *Kamerabrandmelder 1*. Produktdatenblatt. 2018-03-11. Larissa Rohlfs (Adressat)
- [50] VDI-Norm VDI 2803. Dezember 2017. *Funktionenanalyse*
- [51] DIN-Norm. *DIN EN 54-7 - Brandmeldeanlagen - Teil 7: Rauchmelder - Punktförmige Melder nach dem Streulicht-, Durchlicht- oder Ionisationsprinzip*
- [52] DIN. Mai 1998. *Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen*
- [53] INDUCTIVELOAD: *File:Cylindrical Coordinates.svg - Wikimedia Commons*. URL <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=3841800>. – Aktualisierungsdatum: 2018-07-14 – Überprüfungsdatum 2018-07-28
- [54] VERTRIEBSMITARBEITER FÜR DEN ANSAUGRAUCHMELDER 2: *Projektierung von Ansaugrauchmeldern*. Persönliches Treffen. 2018-04-16. Larissa Rohlfs (Adressat)
- [55] -: *Überwachungssoftware des Ansaugrauchmelders 2 : Projektierung von Ansaugrohrsystemen* : Hersteller des Ansaugrauchmelders 2
- [56] VERTRIEBSMITARBEITER DES KAMERABRANDMELDERS 5: *Konfiguration des Kamerabrandmelders 5*. Gespräch. 2018-06-05. Larissa Rohlfs (Adressat)
- [57] NGINIVITY LIMITED, AVIONICS & ELECTRONICS: *Bus Inspector Professional Edition : User Guide*. 2. Aufl. 12.08.2014
- [58] NGINIVITY LIMITED, AVIONICS & ELECTRONICS: *Bus Inspector Pro*. URL <http://www.nginuity.com/>

- [59] JIM. DEVELOPMENT: *OBS Studio : Open Broadcaster Software* : OBS Studio. URL <https://obsproject.com/>
- [60] WEILKIENS, Tim ; SOLEY, Richard Mark: *Systems Engineering mit SysML/UML : Anforderungen, Analyse, Architektur*. 3., überarb. und aktualisierte Aufl. Heidelberg : dpunkt.verl., 2014
- [61] LHT INTRANET: *Cargo Surveillance Market Research*. Internes Dokument. 2017. Larissa Rohlfs (Adressat)
- [62] RADIO TECHNICAL COMMISSION FOR AERONAUTICS: *Environmental Conditions and Test Procedures for Airborne Equipment* (in Kraft getr. am 6. 9. 2014) (2014-09-06)
- [63] HERSTELLER DER ANSAUGRAUCHMELDER 1 BIS 4: *Ansaugrauchmelder 1*. Produktdatenblatt. 2018-03-10. Larissa Rohlfs (Adressat)
- [64] HERSTELLER DER ANSAUGRAUCHMELDER 1 BIS 4: *Ansaugrauchmelder 3*. Produktdatenblatt. 2018-03-10. Larissa Rohlfs (Adressat)
- [65] HERSTELLER DER ANSAUGRAUCHMELDER 1 BIS 4: *Ansaugrauchmelder 4*. Produktdatenblatt. 2018-03-10. Larissa Rohlfs (Adressat)
- [66] HERSTELLER DES ANSAUGRAUCHMELDERS 5: *Ansaugrauchmelder 5*. Produktdatenblatt. 2018-03-10. Larissa Rohlfs (Adressat)
- [67] HERSTELLER DER ANSAUGRAUCHMELDER 6 UND 7: *Ansaugrauchmelder 6*. Produktdatenblatt. 2018-03-10. Larissa Rohlfs (Adressat)
- [68] HERSTELLER DER ANSAUGRAUCHMELDER 6 UND 7: *Ansaugrauchmelder 7*. Produktdatenblatt. 2018-03-10. Larissa Rohlfs (Adressat)
- [69] HERSTELLER DER ANSAUGRAUCHMELDER 8 BIS 10: *Ansaugrauchmelder 8 und 9*. Produktdatenblatt. 2018-03-10. Larissa Rohlfs (Adressat)
- [70] HERSTELLER DES ANSAUGRAUCHMELDERS 11: *Ansaugrauchmelder 11*. Produktdatenblatt. 2018-03-10. Larissa Rohlfs (Adressat)
- [71] HERSTELLER DES KAMERABRANDMELDERS 2: *Kamerabrandmelder 2*. Produktdatenblatt. 2018-03-11. Larissa Rohlfs (Adressat)
- [72] HERSTELLER DER KAMERABRANDMELDER 3 UND 4: *Kamerabrandmelder 3*. Produktdatenblatt. 2018-03-10. Larissa Rohlfs (Adressat)
- [73] HERSTELLER DER KAMERABRANDMELDER 3 UND 4: *Rauchdetektionssoftware*. Produktdatenblatt. 2018-03-10. Larissa Rohlfs (Adressat)
- [74] HERSTELLER DER KAMERABRANDMELDER 3 UND 4: *Kamerabrandmelder 4*. Produktdatenblatt. 2018-03-10. Larissa Rohlfs (Adressat)
- [75] *Flammenrauchmelder*. Produktdatenblatt. 2018-03-11. Larissa Rohlfs (Adressat)

X Anhang A: Auswahl der Brandmeldesysteme

<i>Anhang A 1.</i> Anforderungen einer Frachtfluggesellschaft an ein zusätzliches Brandmeldesystem.....	82
<i>Anhang A 2.</i> Anforderungen an ein Brandmeldesystem im Frachtraum.	86
<i>Anhang A 3.</i> Bewertungsmatrix zur Auswahl eines Ansaugrauchmelders.....	92
<i>Anhang A 4.</i> Bewertungsmatrix zur Auswahl eines Kamerabrandmelders.....	94

Anhang A 1. Anforderungen einer Frachtfluggesellschaft an ein zusätzliches Brandmeldesystem

Eigene Darstellung und teilweise Übersetzung nach [61].

Problem	Überlegungen und Lösungen	Relevante Fragestellungen
Lithium-Batterien überwachen	<p>Auf Palette oder in Container?</p> <p>System muss Feuer IN Containern erkennen (unten/oben)</p> <p>Keine Feuerdetektion: sieht man zu spät</p> <p>Temperatur/Wärme: Kamera IR, IR Sensoren</p> <ul style="list-style-type: none"> - Rauch über Kamerabild: Licht nötig - Für Brand unten im Container. Rauch am schnellsten - Integration über Software - Optimale Lösung: IR für Wärme + Rauch 	<p>Reichen Pixel/Videoqualität aus um über eine Software Temperatur zu detektieren?</p> <p>Software um Rauch & Wärme zu detektieren existiert: WER? WIE TEUER?</p>
Wie kann das System in einer Flotte von Boeing 777 und MD11 Flugzeugen installiert werden?	<p>Max. Frachthöhe</p> <p>B777: 160cm/315cm (Main/lower)</p> <p>MD11: max. 160cm/240cm</p> <p>Rundumlinse</p> <p>Positionierung: Seite/Decke? Abstand zu Decke? Winkel und Anzahl der Kameras?</p> <p>Kameras in Decke integrieren (Linings müssen dicht sein!)</p>	<p>Installation ohne Primärstruktur zu verändern möglich?</p> <p>Optimale Positionierung? (Anzahl, Position seitlich/mittig, 360°)</p>
Neues ultrasensitives Überwachungssystem: Verkürzen der Zeit zwischen einem thermischen Durchgehen von Lithium-Batterien/potentielltem Feuer und dem Moment in dem der Alarm gemeldet wird. (Ein Standard-Rauchmeldesystem existiert bereits)	<p>Temperaturschwelle (z.B. > 80 Grad)</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> Tests durchführen</p> <p>kontinuierliche Überwachung</p>	<p>Ist die Idee schneller als Standardrauchmelder/andere Systeme? (TESTS s.u.)</p>

Problem	Überlegungen und Lösungen	Relevante Fragestellungen
Warnung an die Cockpitbesatzung	Information für Flight Crew: Reicht Bild auf EFB aus oder Licht oder akustisches Signal erwünscht? Kostentreiber, daher kein extra Signal, evtl. Verfärbung Bildschirm, Rahmen, nur Bild (zunächst Annahme: Bild reicht)	
Zuverlässigkeit (täglicher Betrieb, abhängig von der Definition der Temperaturschwellen des Melders)	Positionierung der Kameras, Rundumlinse? Temperaturschwellen: Wo setzt man die Schwelle? Fehlerquote vs. frühzeitige Erkennung Fehllarm z.B. Schmutzpartikel, warme Luft bei Lebendfracht etc.	TESTS
Anwendungsfall: Verpackung enthält Lithium-Batterien/individuelle Batteriezellen (vielleicht in einem Container, alle Größen, mit oder ohne Ausrüstung) Überwachungsgebiet (Hauptdeck/Unterdeck, vorne/hinten, Bulk)	Rauch, Temperatur und Feuer? Erkennen im Alarm, was detektiert wurde Lokalisierung: Bereich identifizieren (z.B. Kamera 4 = Bereich hinteres Hauptdeck) Ganzen Frachtraum überwachen (keine Kenntnis über Position)	Utensilien für Tests: Leihen? Kaufen?
Detektion von Temperatur, Gas oder Rauch eines Brands (Temperaturbereich) Daten sollen aufgezeichnet werden können. → Auswertungen	Gas: Co2- Sensor in Container → Aufwand sehr hoch! Daher flugzeugbasierte Lösung. Zeit für Speicherung? 1 Flug (Feuer) machbar (EFB), für Diebstahl (Monate Data storage unit nötig ☒ zunächst nice – to have Welche Daten? Diebstahl („Eh-da“)	
Minimales Gewicht	Aerosight < 0,3 kg, 81x44x57mm, 28 V (Volt, max. 300 mA) ☒ Kameras leicht, Zubehör	

Problem	Überlegungen und Lösungen	Relevante Fragestellungen
Benötigte Hardware	Unser EFB (evtl. Als Panel) nötig oder anderer Control Panels möglich?	WO läuft Software ab? Welche Software? Auf iPad oder Kamera?
Branddetektionseinheit (Installation ohne Modifikation der Primärstruktur)	Integration in andere Systeme?	
Evtl. robuste Sensoreinheiten (im Frachtraum verteilt)	Keine Sensoreinheiten in Ladeeinheiten: Aufwand	
Evtl. Flugzeugschnittstelleneinheit (Schnittstellen mit der existierenden Flugzeugumgebung)	Aerosight: keine zusätzliche Hardware außer ein paar Kameras (EFB= Bildschirm zur Hinweisanzeige = Server), bei 10 Kameras mit Echtzeitverarbeitung ist eine zusätzliche Servereinheit notwendig (oder 12 EFB, 8 Kameras als Paket, 2x Paket?) Cargo hat AID schon	
Installationsmaterial: Testkonfiguration Qualifikation (EASA-, FAA-Validierung) Qualifikations-Level = Dasselbe wie ähnliche Systeme, die bereits im Flugzeug installiert sind (Zulassungslevel)	DAL-Level E (niedrigstes, günstigstes) für Soft- und Hardware (Integration)	
Wartung: Dieselbe wie bei ähnlichen Systemen, die bereits im Flugzeug installiert sind → standardisiertes Systemtests sollten verfügbar sein	BITE: Warnhinweis, dass Kamera kaputt ist Je mehr Kameras/Sensoren, desto mehr Maintenance-Aufwand! robuste aerosight, bekannte Technologien: Aufwand gering	
Marktgröße/-anteil	Sehr gute Chancen, da Markt stark wachsend ist (s. Marktanalyse/8-hours-sprint)	
Kosten zu hoch (Vergangenheit)	Kosten von Software? Rauch-Erkennung, IR Bild, Warnhinweise Kosten von Tests ☒ Einfache Lösung ohne großen Entwicklungsaufwand (intelligentes System), aerosight (VP 2500-3200€ Kalk. 2018, HK 1.250€ Produktionskosten)	Kosten von System (Hard- und Software): Spezifikation nach den Tests

Problem	Überlegungen und Lösungen	Relevante Fragestellungen
Wettbewerb	Flotte +70%, modulare Systeme aber unterschiedlich s. Extra – Blatt	Was fehlt bei Wettbewerb? Kosten zu hoch? Systeme zu komplex?
Patente/ Beschränkungen	Viele patentierte Technologien	

Anhang A 2. Anforderungen an ein Brandmeldesystem im Frachtraum.

Kategorie	ID	Ebene 1	ID	Ebene 2	ID	Ebene 3	Bewertbarkeit [ja/nein] und Ausschlussgrund
	Geometrie und technische Eigenschaften (A)	A1	Das Rauchmeldesystem muss an Stellen installiert werden, an denen regulär keine Payload (Container und Paletten) vorhanden ist.	A1.1	Die maximale Ladungshöhe von 160 cm im MD der B777 muss weiterhin verwendet werden. (Kunde) (R)		
			A1.2	Die maximale Ladungshöhe von 315 cm im LD der B777 muss weiterhin verwendet werden. (Kunde) (R)			Nein, da System zwangsweise so eingebaut wird, dass die bestehende Ladungshöhe verwendet werden kann.
			A1.3	Die maximale Ladungshöhe von 160 cm im MD der MD11 muss weiterhin verwendet werden. (Kunde) (R)			Nein, da System zwangsweise so eingebaut wird, dass die bestehende Ladungshöhe verwendet werden kann.
			A1.4	Die maximale Ladungshöhe von 240 cm im LD der B777 muss weiterhin verwendet werden. (Kunde) (R)			Nein, da System zwangsweise so eingebaut wird, dass die bestehende Ladungshöhe verwendet werden kann.
A2		Das System soll weniger wiegen als 40 kg. (Q)					Ja.
Integration (B)	B1	Das System muss eine flugzeugbasierte Lösung sein. (Kunde) (Q)					Ja.
	B2	Die Primärstruktur muss unverändert bleiben. (Kunde) (Q)					Nein, da Muss-Anforderung.
	B3	Nach Integration muss die Dichtigkeit der Seitenwand- und Deckenverkleidungen gewährleistet sein. (Kunde) (Q)					Nein, da jedes System so eingebaut werden muss, dass alle Verkleidungen dicht sind.

Kategorie		ID	Ebene 1	ID	Ebene 2	ID	Ebene 3	Bewertbarkeit [ja/nein] und Ausschlussgrund	
Systemfunktion (C)	B4		Das System soll innerhalb eines C-Checks nachrüstbar sein. (Q)					Ja, grob abschätzbar.	
	B5		Das Rauchmeldesystem soll mit einer Gleichspannung von 28 V gespeist werden. (Q)					Ja.	
	C1		Das Rauchmeldesystem muss einen Brand in den Frachtcontainern (ohne Sicht auf den Brandherd) innerhalb von einer Minute nach seiner Entstehung detektieren. (Standard: CS 25.858) (F)	C1.1	Das Rauchmeldesystem kann eine Temperaturänderung detektieren. (F)	C1.1.1	Das Rauchmeldesystem kann einen signifikanten Temperaturanstieg (bedarf weiterer Spezifikation) innerhalb eines Zeitraums von einer Minute in einem Frachtcontainer detektieren. (F)	Ja.	
						C1.1.2	Das Rauchmeldesystem kann die Überschreitung einer definierten Maximaltemperatur (bedarf weiterer Spezifikation) in einem Frachtcontainer innerhalb von einer Minute detektieren. (F)	Ja.	
				C1.2	Das Rauchmeldesystem muss eine signifikante Aerosolkonzentration (bedarf weiterer Spezifikation) in einem Frachtcontainer innerhalb von einer Minute detektieren. (Kunde) (F)				Ja.

Kategorie	ID	Ebene 1	ID	Ebene 2	ID	Ebene 3	Bewertbarkeit [ja/nein] und Ausschlussgrund
C2	Das Rauchmelde- system soll zuverlässig gegen Fehlalarme sein.		C1.3	Das Rauchmelde- system kann eine signifikante CO- Konzentration (bedarf weiterer Spezifikation) innerhalb von einer Minute detektieren. (F)			Ja.
			C1.4	Das Rauchmelde- system kann Flammen (bedarf weiterer Spezifika- tion) innerhalb von einer Minute detektieren. (Kunde) (F)			Ja.
			C2.1	Das Rauchmelde- system muss Fremdkörper (Verschmutzung) von Aerosol unter- scheiden können. (F)			Nein, nur in Tests bewertbar.
			C2.2	Das Rauchmelde- system muss Brandkenngrößen (z. B. Temperatur), die sich anders als bei einem Brand entwickeln, nicht falsch interpretieren. (F)			Nein, nur in Tests bewertbar.
C3	Das Rauchmelde- system muss durch eine Software überwacht werden.		C3.1	Eine Visualisierung der Funktion und Überwachung des Rauchmelde- systems muss für die Flightcrew bereitgestellt werden. (Kunde) (F)			Nein, da bei jedem System entsprechende Daten abgegriffen werden können.
			C3.2	Eine Lokation des Brandereignisses im Frachtraum soll möglich sein. (Kunde) (F)			Ja.

Kategorie	ID	Ebene 1	ID	Ebene 2	ID	Ebene 3	Bewertbarkeit [ja/nein] und Ausschlussgrund	
C4	Bei einem Brandereignis muss ein Alarm für die Flightcrew vorhanden sein.		C4.1	Ein visuelles Alarmsignal muss im Cockpit vorhanden sein. (Kunde) (F)			Nein, da bei jedem System entsprechende Daten abgegriffen werden können.	
			C4.2	Es kann ein akustisches Alarmsignal vorhanden sein. (F)			Nein, da bei jedem System entsprechende Daten abgegriffen werden können.	
			C4.3	Es soll mehr als eine Alarmstufe programmierbar sein. (F)			Ja.	
			C4.4	Die Schwellen der Alarme sollen frei wählbar sein. (F)	C4.4.1	Die Schwelle des Voralarms soll frei wählbar sein. (F)		Ja.
					C4.4.2	Die Schwelle des Hauptalarms soll frei wählbar sein. (F)		Ja.
		C4.5	Bei Detektion mehrerer Brandkenngrößen soll das Alarmsignal einen Hinweis auf die Art der Brandkenngröße geben. (Kunde) (F)			Ja.		
C5		Das Rauchmelde-system muss die spezifizierten Bereiche kontinuierlich (Power on bis Power off) überwachen. (F)				Nein, da das System so integriert wird, dass es das macht.		

Kategorie	ID	Ebene 1	ID	Ebene 2	ID	Ebene 3	Bewertbarkeit [ja/nein] und Ausschlussgrund
	Umgebungsbedingungen (D)	C6	Die Daten von > 100 Ereignissen (Brand, Fehlalarm) sollen gespeichert werden. (F)				
C7		Es soll Schnittstellen vorhanden sein. (F)					Ja.
C8		Das System soll seine Funktionalität ständig überprüfen und bei einer Störung diese der Flugbesatzung melden. (BITE) (Kunde) (F)					Ja.
D1		Das Rauchmeldesystem muss in einem Temperaturbereich von -40 °C bis +70 °C betrieben werden. (DO 160G, Kat. A1[62]) (R)					Nein, da Muss-Anforderung. System kann für die Integration ins Flugzeug angepasst werden.
D2		Das Rauchmeldesystem muss in einem Temperaturbereich von -55 °C bis 86 °C gelagert werden. (DO 160G, Kat. A1[62]) (R)					Nein, da Muss-Anforderung. System kann für die Integration ins Flugzeug angepasst werden.
D3		Das Rauchmeldesystem soll bei einer relativen Luftfeuchte von bis zu 95 % betrieben werden können. (R)					Nein, da Muss-Anforderung. System kann für die Integration ins Flugzeug angepasst werden.

Kategorie	ID	Ebene 1	ID	Ebene 2	ID	Ebene 3	Bewertbarkeit [ja/nein] und Ausschlussgrund
Zuverlässigkeit (E)	E1	Das Rauchmelde-system muss weniger als eine definierte Anzahl (bedarf weiterer Spezifikation) Fehlalarme pro 10000 Flugstunde „flight hour“ (FH) aufweisen. (Q)					Nein. Keine Informationen.
	E2	Die Lebensdauer des Rauchmelde-systems muss größer sein als eine definierte Anzahl FH (bedarf weiterer Spezifikation). (Q)					Nein, keine Informationen.
	E3	Die MTBF muss größer sein als eine definierte Anzahl (bedarf weiterer Spezifikation) Stunden. (Q)					Nein. Keine Informationen.
Zulassung (F)	F1	Das System muss von der FAA zugelassen sein. (Q)					Nein. Noch nicht zugelassene Systeme werden bewusst mit in die Bewertung einbezogen.
	F2	Das System muss von der EASA zugelassen sein. (Q)					Nein. Noch nicht zugelassene Systeme werden bewusst mit in die Bewertung einbezogen.
	F3	Das System soll als „Design Assurance Level“ (DAL) E qualifiziert sein. (Q)					Nein. Noch nicht zugelassene Systeme werden bewusst mit in die Bewertung einbezogen.
Wirtschaftlichkeit (G)	G1	Die Kosten für die Systemprojektierung, Systemzulassung und Systemintegration müssen sich nach einer Zeit von 2 Jahren amortisiert haben. (Q)					Nein. Wirtschaftlichkeit wird an dieser Stelle nicht betrachtet.

Anmerkung. Verwendete Anforderungen in fettem Schriftbild.

Anhang A 3. Bewertungsmatrix zur Auswahl eines Ansaugrauchmelders

Ansaugrauchmelder [Nr.]	Art [Passiv, Aktiv]	Erfassungsbereich [m]	Funktionsprinzip [Optisch, Ionisation, Brandgas, Kamera]	Sensibilität [% l/d/m]	rel. Luftfeuchte [%]	Betriebsspannung [V]	Gewicht [kg]	Built-In-Test [Ja, Nein]	Speicherung von Ereignissen [Ja, Nein]	Lokalisation möglich [Ja, Nein]	Anzahl programmierbarer Alarmschwellen [-]	Schnittstellen [Discrete, Ethernet, USB, CAN]	Notizen	Gründe für den Ausschluss
Soll	Aktiv	Min. 50 m	Optisch, Ionisation	Großer Wertebereich	bis 95 %	17 V bis 32.2 V	< 40 kg	Ja	>100	Ja	3	Discrete, Ethernet, CAN		
1[63]	Aktiv	Einzel: 160 2 Kanäle x 2 Leitungen = 640	Optisch (Streulicht)	ab 0,07	10 bis 93	18,5 bis 31,5	6,5 pro Melder	Ja	Ja, 2244	n/a	n/a	Discrete, USB	4 Rohranschlüsse (2 pro Kanal)	Erfassbare Überwachungsfläche für den Anwendungsfall im Flugzeug überdimensioniert.
2 [48]	Aktiv	Netz: 170	Optisch (Streulicht)	0,00095 bis 20,5	10 bis 95	18 bis 30	3,74 kg pro Melder	Ja	Ja, 18000	n/a	3	Discrete, Ethernet, USB	Luftfahrtzugelassene Filter vorhanden, 1 Rohranschluss, Telefonat: Je Melder 100 m Rohr mit 20 Öffnungen	
3[64]	Aktiv	Einzel: 120 Netz: 320	Optisch (Streulicht)	0,00095 bis 20,5	10 bis 95	18 bis 30	5,26 pro Melder	Ja	n/a	n/a	5	Discrete, Ethernet, USB	luftfahrtzugelassene Filter vorhanden, 1 Rohranschluss	Erfassbare Überwachungsfläche für den Anwendungsfall im Flugzeug überdimensioniert.
4[65]	Aktiv	Netz: 480	Optisch (Streulicht)	0,00095 bis 20,5	10 bis 95	18 bis 30	3,74 pro Melder	Ja	Ja, 18000	n/a	5	Discrete, Ethernet, USB	luftfahrtzugelassene Filter vorhanden, 4 Rohranschlüsse, relativ neu (Q3 2017 → Kinderkrankheiten?)	Erfassbare Überwachungsfläche für den Anwendungsfall im Flugzeug überdimensioniert.
5 [66]	Aktiv	Bis zu 2 x 180	n/a	bis 0,005	10 bis 95	14 bis 30	1,35 pro Melder	Ja	Ja, bis zu 3 Tage	n/a	1	Laptop anschließbar.	Eine Sensibilitätsschwelle pro Melder einstellbar.	Kleiner Sensibilitätswertebereich. Keine Angabe zum Funktionsprinzip.
6 [67]	Aktiv	n/a	n/a	0,002 bis 10	n/a	10,5 bis 30	n/a	n/a	n/a	n/a	4	n/a		Kleiner Sensibilitätswertebereich. Zu wenig Daten. Keine Angabe zum Funktionsprinzip.
7 [68]	Aktiv	Einzel: 50 Netz: 100	Optisch, Ionisation, Brandgas	n/a	n/a	18 bis 30	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a		Keine Angabe über die Sensibilität. Zu wenig Daten.
8 [69]	Aktiv	400 pro Sensor	Optisch (Streulicht)	0,002 bis 10	n/a	n/a	n/a	n/a	Ja	n/a	5	Ethernet	Sensibilität kann für jede Zone individuell angepasst werden. Ein- oder Zweikanalgerät (unabhängige Auswertung)	Erfassbare Überwachungsfläche für den Anwendungsfall im Flugzeug überdimensioniert. Zu wenig Daten.

Ansaugrauchmelder [Nr.]	Art [Passiv, Aktiv]	Erfassungsbereich [m]	Funktionsprinzip [Optisch, Ionisation, Brandgas, Kamera]	Sensibilität [% l/d/m]	rel. Luftfeuchte [%]	Betriebsspannung [V]	Gewicht [kg]	Built-In-Test [Ja, Nein]	Speicherung von Ereignissen [Ja, Nein]	Lokalisation möglich [Ja, Nein]	Anzahl programmier- barer Alarmschwellen [-]	Schnittstellen [Discrete, Ethernet, USB, CAN]	Notizen	Gründe für den Ausschluss
Soll	Aktiv	Min. 50 m	Optisch, Ionisation	Großer Wertebereich	bis 95 %	17 V bis 32.2 V	< 40 kg	Ja	>100	Ja	3	Discrete, Ethernet, CAN		
9 [69]	Aktiv	120 pro Sensor	Optisch (Streulicht)	0,002 bis 10	n/a	n/a	n/a	n/a	Ja	n/a	5	Ethernet	Einkanalgerät	Kleiner Sensibilitätswertebereich. Zu wenig Daten.
10 [70]	Aktiv	Einzel: 120 Netz: 360 (bis 4 Rohre)	n/a	0,005 bis 20	10 bis 95	18 bis 30	6,035 pro Melder	Ja	Ja, 18000	n/a	4	Ethernet		Erfassbare Überwachungsfläche für den Anwendungsfall im Flugzeug überdimensioniert. Für extreme Bedingungen (z. B. Baumwollfabrik) entworfen.

Anhang A 4. Bewertungsmatrix zur Auswahl eines Kamerabrandmelders

Kamerabrandmelder [Nr.]	Art [Passiv, Aktiv]	Erfassungsbereich [m]	Funktionsprinzip [Algorithmus]	Sensibilität einstellbar [Ja, Nein]	rel. Luftfeuchte [%]	Betriebsspannung [V]	Gewicht [kg]	Built-In-Test [Ja, Nein]	Aufnahmespeicher vorhanden [Ja, Nein]	Lokalisation möglich [Ja, Nein]	Anzahl programmier- barer Alarmschwellen [-]	Schnittstellen [Discrete, Ethernet, USB, CAN]	Notizen	Gründe für den Ausschluss
Soll	Passiv	n/a	Algorith- mus		bis 95 %	17 V bis 32.2 V	< 40 kg	Ja	>100	Ja	3	Discrete Ethernet, CAN		
1 [49]	Passiv	n/a	Algorith- mus	Nein	n/a	28 V	0,65 kg pro Kamera	x	Ja, 32 h Video	n/a	n/a	n/a	Keine programmierbare Software verfügbar.	Keine programmierbare Software verfügbar.
2 [71]	Passiv	n/a	Algorith- mus	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a		Zu wenig Daten.
3 [72, 73]	Passiv	n/a	Algorith- mus	Nein	bis 95	28 V	0.4 kg pro Kamera	Ja	Ja	n/a	3	Ethernet, ARINC 429	Sensibilität kann für jede Zone individuell angepasst werden. Plus 1,2 kg Video Transmission Unit. Hardware Alarme werden in Database gespeichert.	Nicht verfügbar.
4 [73, 74]	Passiv	n/a	Algorith- mus	nein	bis 95	28V	0,06 kg pro Kamera	Ja	Ja	n/a	3	Ethernet, ARINC 429	Sensibilität kann für jede Zone individuell angepasst werden. Plus 1,2 kg Video Transmission Unit. Hardware Alarme werden in Database gespeichert.	Nicht verfügbar.
5 [75]	Passiv	n/a	Algorith- mus	Ja	bis 95	12 V	n/a	Ja	n/a	Ja	1	Discrete, Ethernet		

XI Anhang B: Entwicklung des Testaufbaus

<i>Anhang B 1.</i> Funktionenbaum zur Funktion „Rauchmeldertests realisieren“	96
<i>Anhang B 2.</i> Lösungsmöglichkeiten zu den Elementarfunktionen des Funktionenbaums „Rauchmeldertests realisieren“	98
<i>Anhang B 3.</i> D1-MT-LR – ZSB Testaufbau.	101
<i>Anhang B 4.</i> D2-MT-LR – ZSB Front.....	102
<i>Anhang B 5.</i> D3-MT-LR – ZSB Rückwand.	103
<i>Anhang B 6.</i> D4-MT-LR – ZSB Wand rechts.	104
<i>Anhang B 7.</i> D5-MT-LR – ZSB Wand links 1.	105
<i>Anhang B 8.</i> D6-MT-LR – ZSB Wand links 2.	106
<i>Anhang B 9.</i> D7-MT-LR – ZSB Ansaugrohr Lüftungsrauchmelder.	107
<i>Anhang B 10.</i> D8-MT-LR – ZSB Ansaugrohr Ansaugrauchmelder.	108
<i>Anhang B 11.</i> D9-MT-LR – ZSB Decke.	109
<i>Anhang B 12.</i> T1-MT-LR – Übersicht Platten.....	110
<i>Anhang B 13.</i> T2-MT-LR – Frontplatte mit Tür (1;2).....	111
<i>Anhang B 14.</i> T3-MT-LR - Tür (2)	112
<i>Anhang B 15.</i> T4-MT-LR - Deckenplatte (3)	113
<i>Anhang B 16.</i> T5-MT-LR – Lukenplatte (4).....	114
<i>Anhang B 17.</i> T6-MT-LR - Rückwand (5)	115
<i>Anhang B 18.</i> T7-MT-LR - Seitenwand (6)	116
<i>Anhang B 19.</i> T8-MT-LR - Verschnitt (7)	117
<i>Anhang B 20.</i> T9-MT-LR - Stückliste Tischler.....	118

Anhang B 1. Funktionenbaum zur Funktion „Rauchmeldertests realisieren“.

ID	Hauptfunktion	ID	Teilfunktion	ID	Folgefunktion	ID	Folgefunktion
0	Rauchmelder testen	01	Rauchmelder auswählen	01.1	Anforderungen festlegen		
				01.2	Rauchmelder vergleichen		
				01.3	Rauchmelder bewerten		
		02	Testumgebung definieren	02.1	Testort auswählen	02.1.1	Testorte auffinden
						02.1.2	Umgebungsbedingungen vergleichen
				02.2	Testumgebung schützen	02.2.1	Personen schützen
						02.2.2	Umgebung schützen
						02.2.3	Interessenvertreter schützen
				02.3	Prüfvolumen definieren	02.3.1	Prüfvolumengröße definieren
						02.3.2	Prüfvolumen einschließen
						02.3.3	Prüfvolumeneinschluss stabilisieren
						02.3.4	Luftbewegung beruhigen (abdichten ist schon zu konkret)
						02.3.5	Feuer einschließen (Materialauswahl)
						02.3.6	Prüfvolumeninhalt benutzen
						02.3.7	Prüfvolumen einsehen
						02.3.8	Prüfvolumeneinzelteile transportieren
				02.4	Prüfgeräte installieren	02.4.1	Melderpositionierung festlegen
						02.4.2	Spannungsquellen positionieren
						02.4.3	Mechanische Bauteile positionieren
						02.4.4	Melder elektrisch anbinden
						02.4.5	Melder mechanisch anbinden
						02.4.6	Spannungsquelle elektrisch anbinden
		03	Rauch erzeugen	03.1	Brandgut bereitstellen		
				03.2	Brandgut aufnehmen	03.2.1	Buchenstäbe aufnehmen
						03.2.2	Heptan aufnehmen

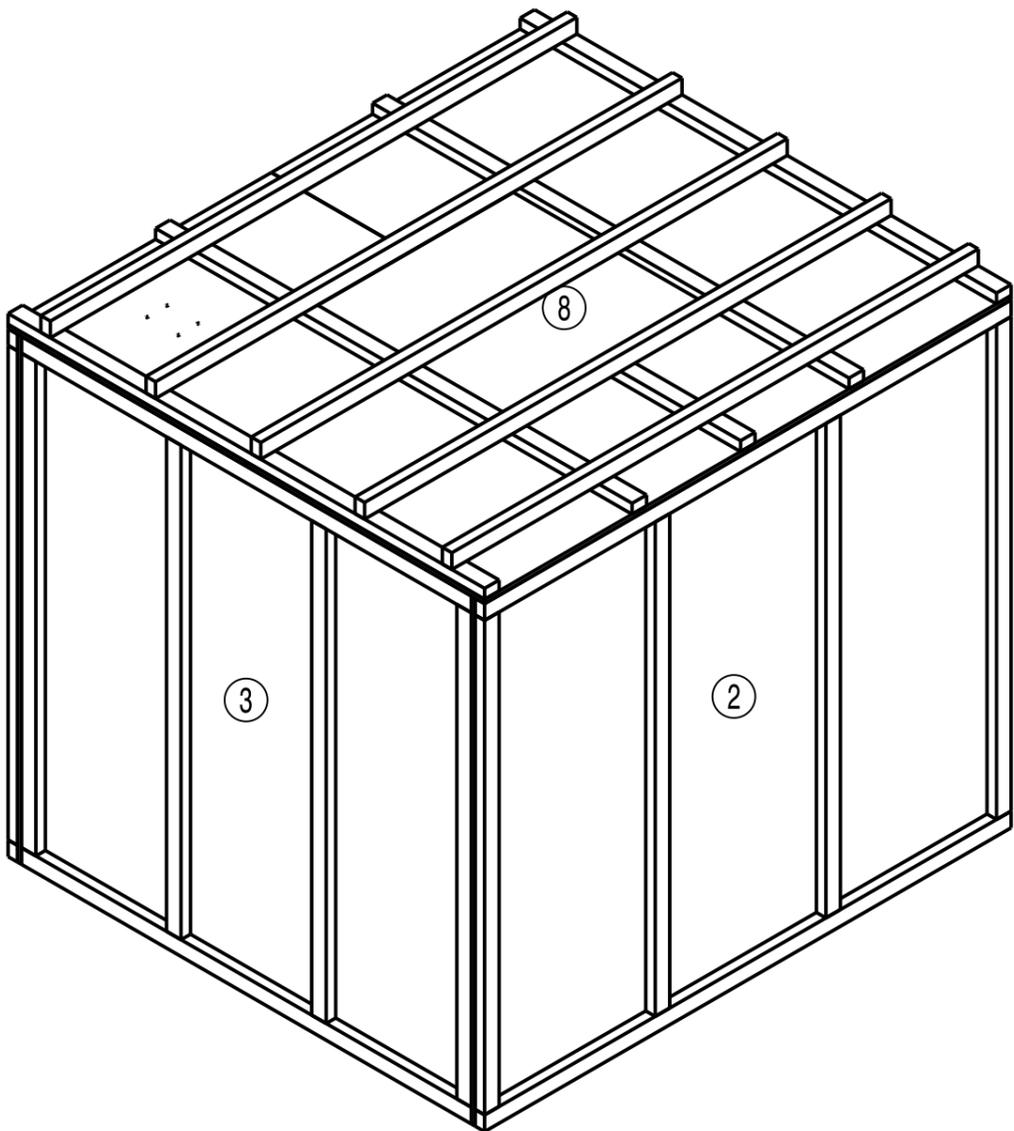
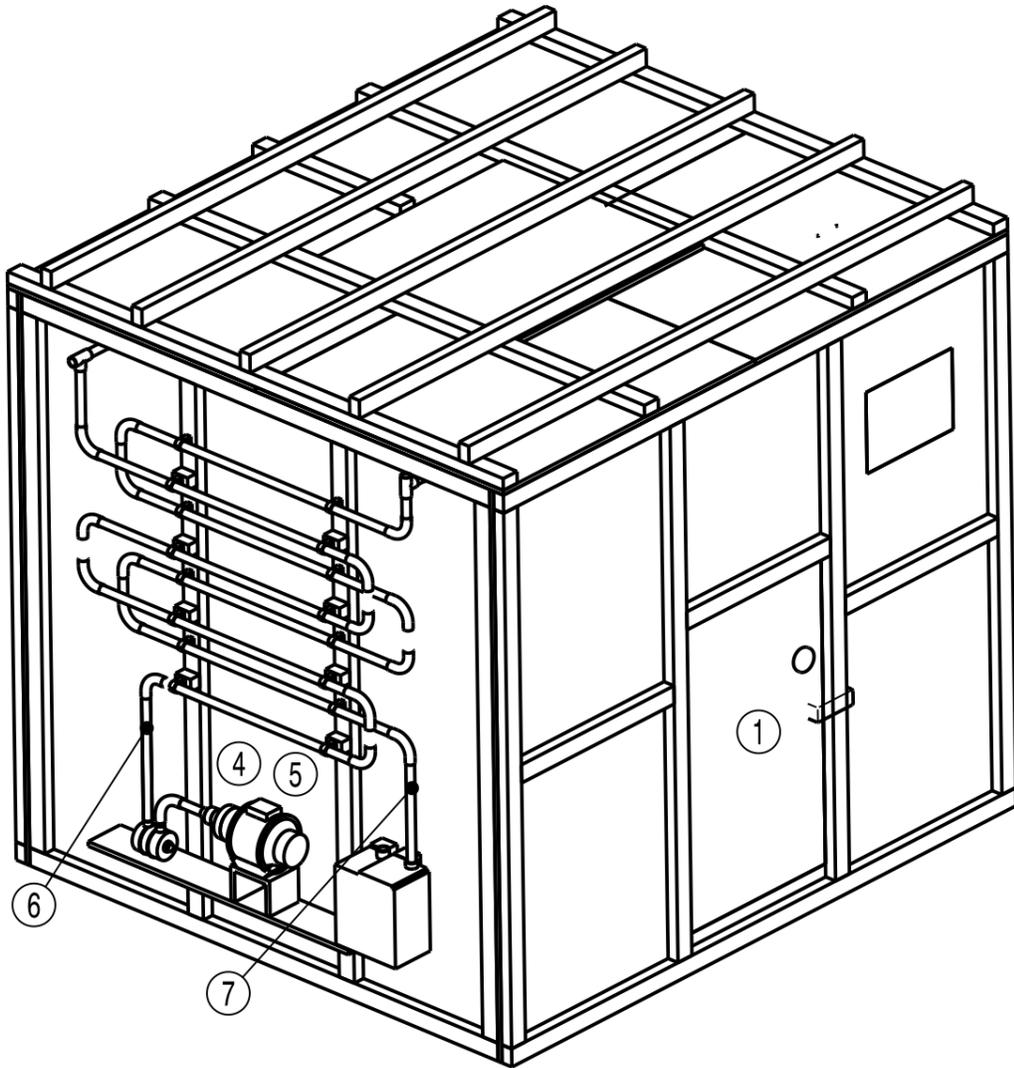
ID	Hauptfunktion	ID	Teilfunktion	ID	Folgefunktion	ID	Folgefunktion
				03.3	Brandherd beinhalten		
				03.4	Brandgut entzünden	03.4.1	Brenngutqualität prüfen (Restfeuchte, Gemisch...)
						03.4.2	Schwelbrand entzünden
						03.4.3	Flüssigkeitsbrand entzünden
				03.5	Rauch auslassen		
		04	Rauch entfernen	04.1	Brandgut löschen	04.1.1	Schwelbrand löschen
						04.1.2	Flüssigkeitsbrand löschen
				04.2	Rauch evakuieren		
		05	Messdaten erfassen	05.1	Daten aufnehmen		
				05.2	Daten verarbeiten		
				05.3	Daten aufbereiten		
				05.4	Daten sichern		
		06	Vergleichbarkeit sicherstellen				
		07	Wiederholbarkeit sicherstellen				

Anhang B 2. Lösungsmöglichkeiten zu den Elementarfunktionen des Funktionenbaums „Rauchmeldertests realisieren“.

ID	Elementar-funktion	Lösung 1	Lösung 2	Lösung 3	Lösung 4	Lösung 5	Lösung 6	Lösung 7	Lösung 8	Lösung 9
01.1	Anforderungen festlegen	Cargo Surveillance Market Research	eigene Anforderungen ergänzen	Anforderungen aus DO 160G	Frachtraumcharakteristika recherchieren					
01.2	Rauchmelder vergleichen	Internetrecherche	Datenblätter	Artikel	Hersteller kontaktieren					
01.3	Rauchmelder bewerten	Vergleichsmatrix	Erfüllungsgrad der Anforderungen	Bibliotheken						
02.1.1	Testorte auffinden	Im Werk erkundigen	Bei Feuerwehren erkundigen	In der Industrie erkundigen						
02.1.2	Umgebungsbedingungen vergleichen	Anforderungen aufstellen	Pro und Contra Liste							
02.2.1	Personen schützen	Feuerfeste Handschuhe	Kittel	Schutzbrille	Mundschutz					
02.2.2	Umgebung schützen	Feuerlöscher	Löschdecke	Abzug einschalten	Feuerschutzmaterial verwenden					
02.2.3	Interessenhalter schützen	Feueralarm in BMZ deaktivieren	mit Arbeitssicherheit absprechen							
02.3.1	Prüfvolumengröße definieren	Testort ausmessen	Normen sichten	Testfeuergröße einbeziehen						
02.3.2	Prüfvolumen einschließen	Kiste	Wände	Rumpf-sektion	Schiffscontainer	Raum				
02.3.3	Prüfvolumeneinschluss stabilisieren	Winkel	Schrauben	Rahmenkonstruktion	Kleben	Schweißen	Säulen	An Decke aufhängen	Lochplatten	
02.3.4	Luftbewegung beruhigen	Dauerplastische Dichtungsmasse	Kreppband	Silikon	Dichtung für Öfen	Aluklebeband	Türdichtung	Bauschaum		
02.3.5	Feuer einschließen	Perlucor	PH10	Jelmo® Ship Light	FireRay	Jena Glas	Stahl	Aluminium	Wassernebelwand	Sperrholz
02.3.6	Prüfvolumeninhalt benutzen	Tür zum Begehen	von außen fernsteuerbare Roboter-arme	Fenster-scheibe						
02.3.7	Prüfvolumen einsehen	Loch		Kamera innen, Monitor außen						
02.3.8	Prüfvolumeneinzelteile transportieren	Lieferung	Gabelstapler	Rollbrett	Lasten-aufzug	Tragen				
02.4.1	Melderpositionierung festlegen	Schlimmster Fall als Auslegungspunkt	So nah wie möglich an der Realität im Frachtraum	bester Fall als Auslegungspunkt						
02.4.2	Spannungsquellen positionieren	Steckdosen sichten	Kabellängen definieren							

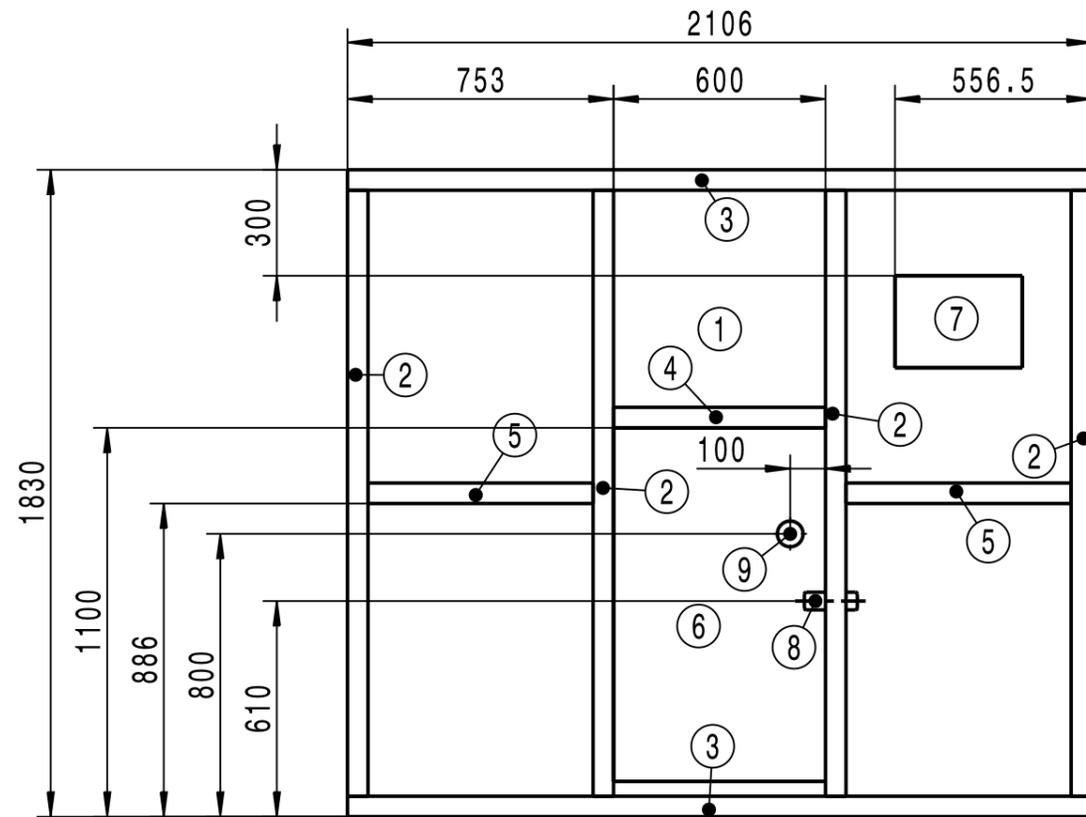
ID	Elementar-funktion	Lösung 1	Lösung 2	Lösung 3	Lösung 4	Lösung 5	Lösung 6	Lösung 7	Lösung 8	Lösung 9
02.4.3	Mechanische Bauteile positionieren	Schlimmster Fall als Auslegungspunkt	So nah wie möglich an der Realität im Fracht-raum	Testort ausmessen						
02.4.4	Melder elektrisch anbinden	Kabel	Spannungsquelle	Steckdose						
02.4.5	Melder mechanisch anbinden	Rohre	Montageplatten	Schellen	Schrauben					
02.4.6	Spannungsquelle elektrisch anbinden	Steckdose	Generator							
03.1	Brandgut bereitstellen	Buchenstäbe (TF2)	Heptan (TF5A)	Heptan + Toluol (TF5A)						
03.2.1	Buchenstäbe aufnehmen	Heizplatte								
03.2.2	Heptan aufnehmen	Pfanne	Metallwanne	Keramikbehältnis						
03.3	Brandherd beinhalten	Wanne	Kiste	Box	Karton					
03.4.1	Brenngutqualität prüfen	Holzfeuchtemessgerät								
03.4.2	Schwelbrand entzünden	Heizplatte von außen anschalten	Heizplatte von innen anschalten							
03.4.3	Flüssigkeitsbrand entzünden	Brennendes Holzstück	Brennendes Streichholz	Funke	Entzündungstemperatur	langes Feuerzeug				
03.5	Rauch auslassen	große Öffnung	Mehrere kleine Öffnungen	Durchlässiges Tuch						
04.1.1	Schwelbrand löschen	Stäbe in Wasser tunken	Stäbe auspusten	mit Löschdecke ersticken	mit Wasser übergießen	CO ₂ -Feuerlöscher				
04.1.2	Flüssigkeitsbrand löschen	mit Löschdecke ersticken	mit Metallplatte ersticken	mit entsprechendem Feuerlöscher löschen	abbrennen lassen					
04.2	Rauch evakuieren	Ventilator	Absaugesse	Öffnen des Volumens durch Tür	Öffnen des Volumens durch Luke	aktives Herauswedeln der Luft				
05.1	Daten aufnehmen	ARINC Tester	Fluke-Scope-Meter	USB Messmodul						
05.2	Daten verarbeiten	Referenzbildung zu 0 V oder -28 V								
05.3	Daten aufbereiten	Excel	Visualisierung auf Laptop							
05.4	Daten sichern	Text-Datei	Excel-Datei	Bildschirmaufnahme						

ID	Elementar- funktion	Lösung 1	Lösung 2	Lösung 3	Lösung 4	Lösung 5	Lösung 6	Lösung 7	Lösung 8	Lösung 9
06	Vergleich- barkeit (der Melder) sicherstellen	Vereinheitlich- ung des Abstands Brandherd - Melder	Nur eine Ansaugöffnung pro Melder mit Rauch beaufschlagen	Dieselben Volumenströme	Gleiche Rohrgestaltung					
07	Wiederhol- barkeit sicherstellen	Testprozedur dokumentieren	Checklisten erarbeiten	Videodoku- mentation						



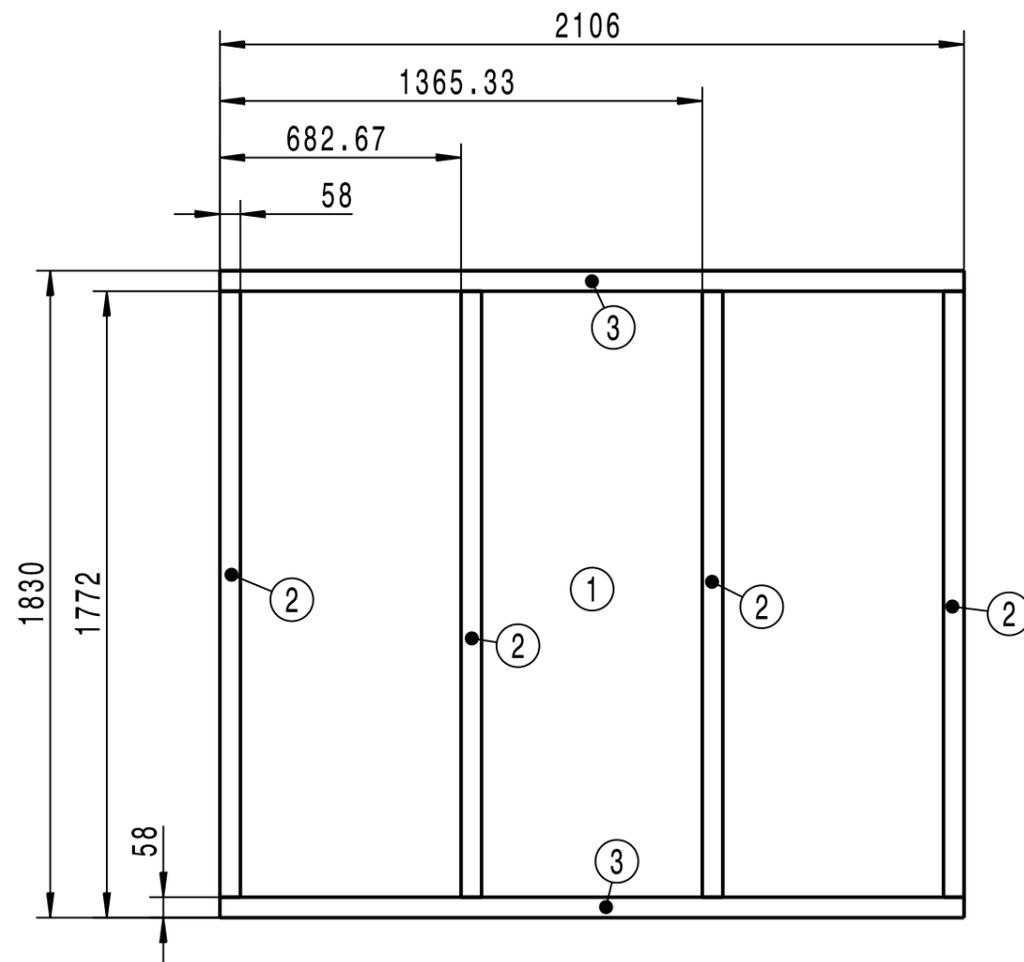
Position	Benennung	Zeichnungsnummer
1	ZSB_Front	D2-MT-LR
2	ZSB Rückwand	D3-MT-LR
3	ZSB Wand rechts	D4-MT-LR
4	ZSB Wand links 1	D5-MT-LR
5	ZSB Wand links 2	D6-MT-LR
6	ZSB Ansaugrohr Lüftungsrauch- melder	D7-MT-LR
7	ZSB Ansaugrohr Ansaugrauchmelder	D8-MT-LR
8	ZSB Decke	D9-MT-LR

	Allgemeintoleranz DIN ISO 2768-mk	Maßstab 1:20	Blattformat A3	Werkstoff Verschiedene	Gewicht XXX
Verantwortl. Abt. T/BS34	Techn. Referenz XXX	Erstellt durch / Matrikelnummer Larissa R./2132713		Genehmigt von Prof. Wiegmann	
 Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg <i>Hamburg University of Applied Sciences</i>		Dokumentenart Zusammenbauzeichnung		Dokumentenstatus freigegeben	
		Titel, Zusätzlicher Titel ZSB Testaufbau		Zeichnungsnummer D1-MT-LR	
		Änd. A	Ausgabedatum 27.05.2018	Spr. de	Blatt 1/9



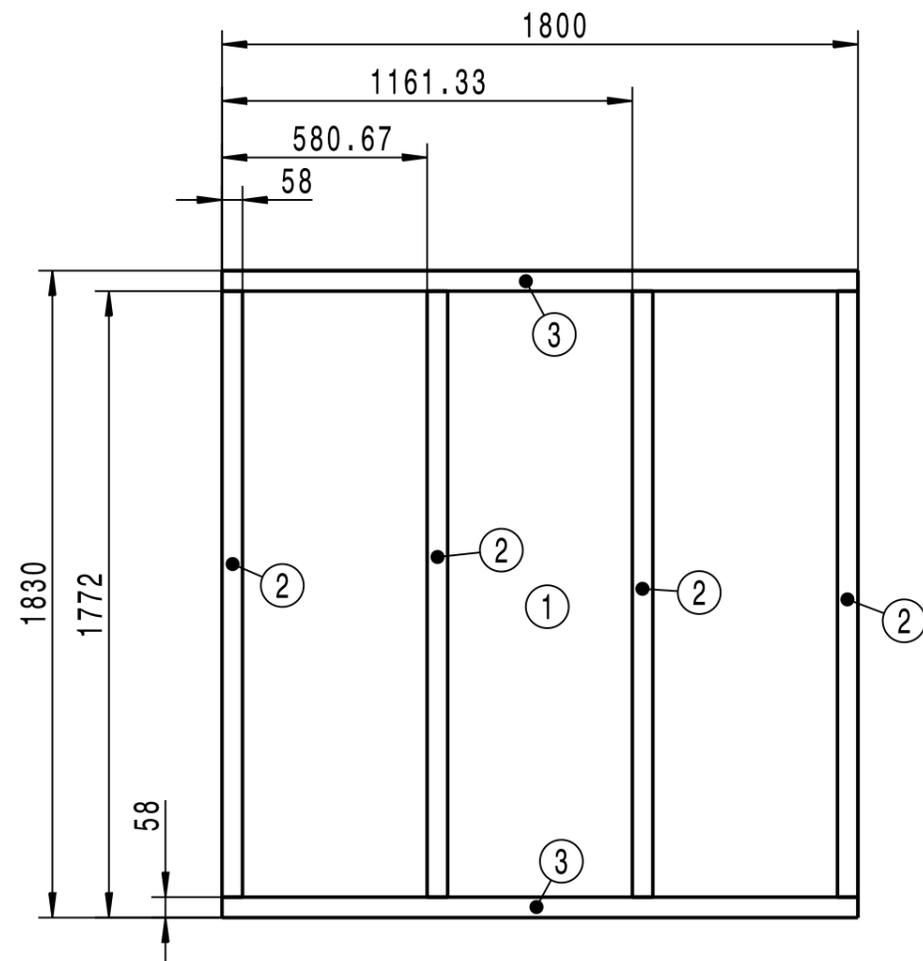
Position	Benennung	Artikelnr.	Zeichnungsnummer	Anzahl
1	Frontplatte		T2-MT-LR	1
2	Balken V1	3858B1714		4
3	Balken H1	3858B2106		2
4	Balken H2	3858B600		1
5	Balken H3	3858B637		2
6	Tür		T3-MT-LR	1
7	Fenster			1
8	Riegel			1
9	Knauf			1

	Allgemeintoleranz DIN ISO 2768-mk	Maßstab 1:20	Blattformat A3	Werkstoff Verschiedene	Gewicht XXX
Verantwortl. Abt. T/BS34	Techn. Referenz XXX	Erstellt durch / Matrikelnummer Larissa R./2132713		Genehmigt von Prof. Wiegmann	
 Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg Hamburg University of Applied Sciences		Dokumentenart Zusammenbauzeichnung		Dokumentenstatus freigegeben	
		Titel, Zusätzlicher Titel ZSB Front		Zeichnungsnummer D2-MT-LR	
Änd. A	Ausgabedatum 27.05.2018	Spr. de	Blatt 2/9		

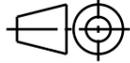


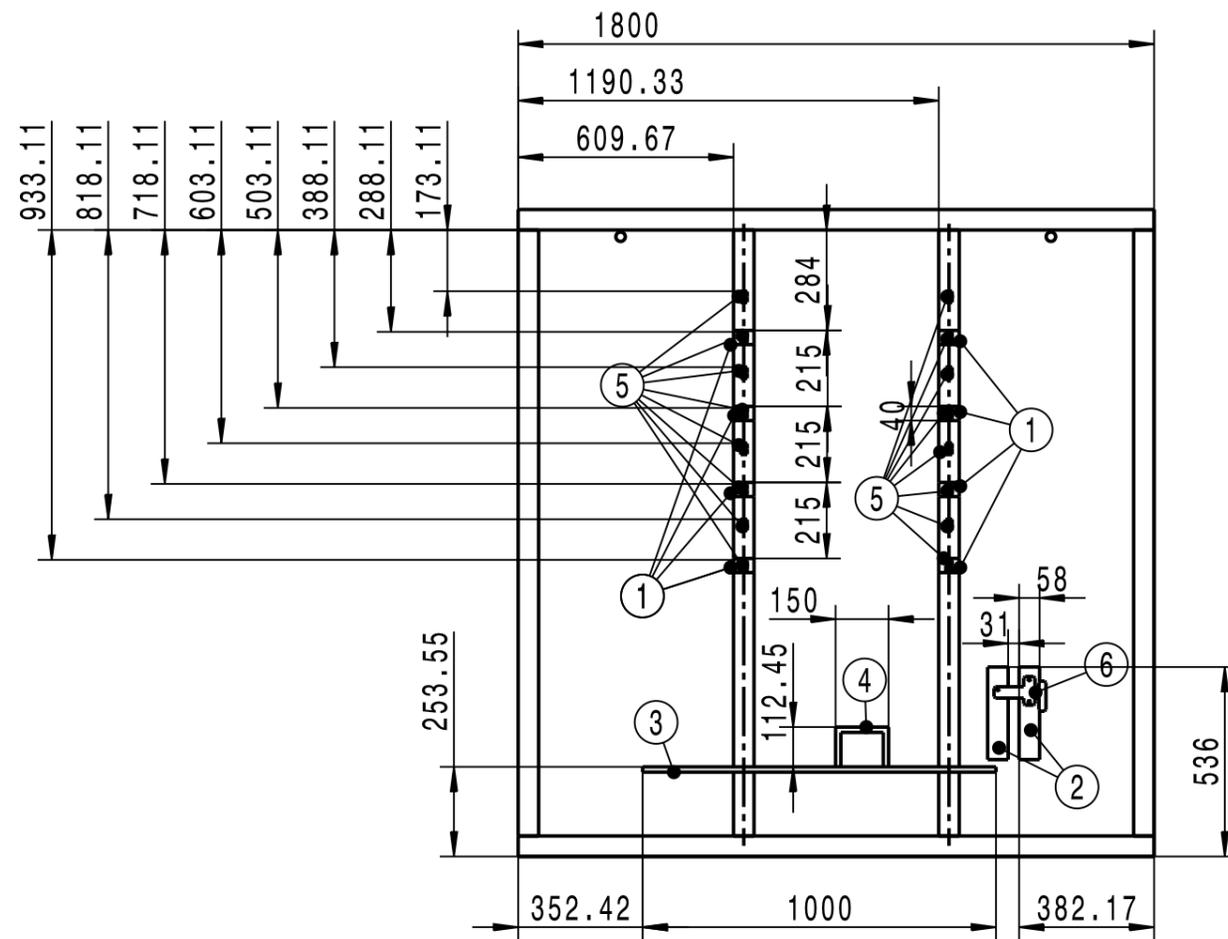
Position	Benennung	Artikelnr.	Zeichnungsnummer	Anzahl
1	Rückwand		T6-MT-LR	1
2	Balken V1	3858B1714		4
3	Balken H1	3858B2106		2

	Allgemeintoleranz DIN ISO 2768-mk	Maßstab 1:20	Blattformat A3	Werkstoff Verschiedene	Gewicht XXX
Verantwortl. Abt. T/BS34	Techn. Referenz XXX	Erstellt durch / Matrikelnummer Larissa R./2132713		Genehmigt von Prof. Wiegmann	
 Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg <i>Hamburg University of Applied Sciences</i>		Dokumentenart Zusammenbauzeichnung		Dokumentenstatus freigegeben	
		Titel, Zusätzlicher Titel ZSB Rückwand		Zeichnungsnummer D3-MT-LR	
Änd. A	Ausgabedatum 27.05.2018	Spr. de	Blatt 3/9		



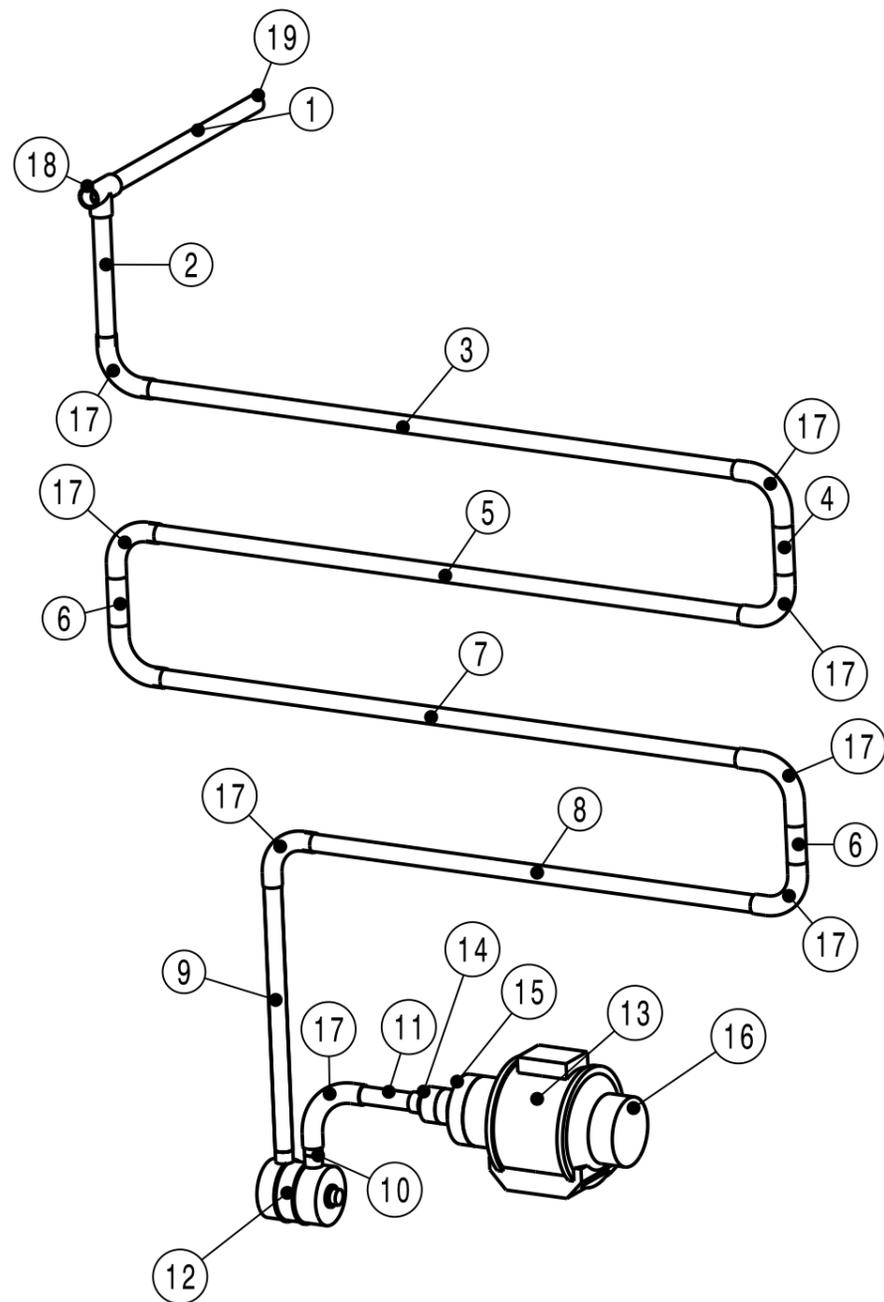
Position	Benennung	Artikelnr.	Zeichnungsnummer	Anzahl
1	Seitenwand links		T7-MT-LR	1
2	Balken V1	3858B1714		4
3	Balken H1	3858B1800		2

	Allgemeintoleranz DIN ISO 2768-mk	Maßstab 1:20	Blattformat A3	Werkstoff Verschiedene	Gewicht XXX
Verantwortl. Abt. T/BS34	Techn. Referenz XXX	Erstellt durch / Matrikelnummer Larissa R./2132713		Genehmigt von Prof. Wiegmann	
		Dokumentenart Zusammenbauzeichnung		Dokumentenstatus freigegeben	
		Titel, Zusätzlicher Titel ZSB Wand rechts		Zeichnungsnummer D4-MT-LR	
Änd. A	Ausgabedatum 27.05.2018	Spr. de	Blatt 4/9		



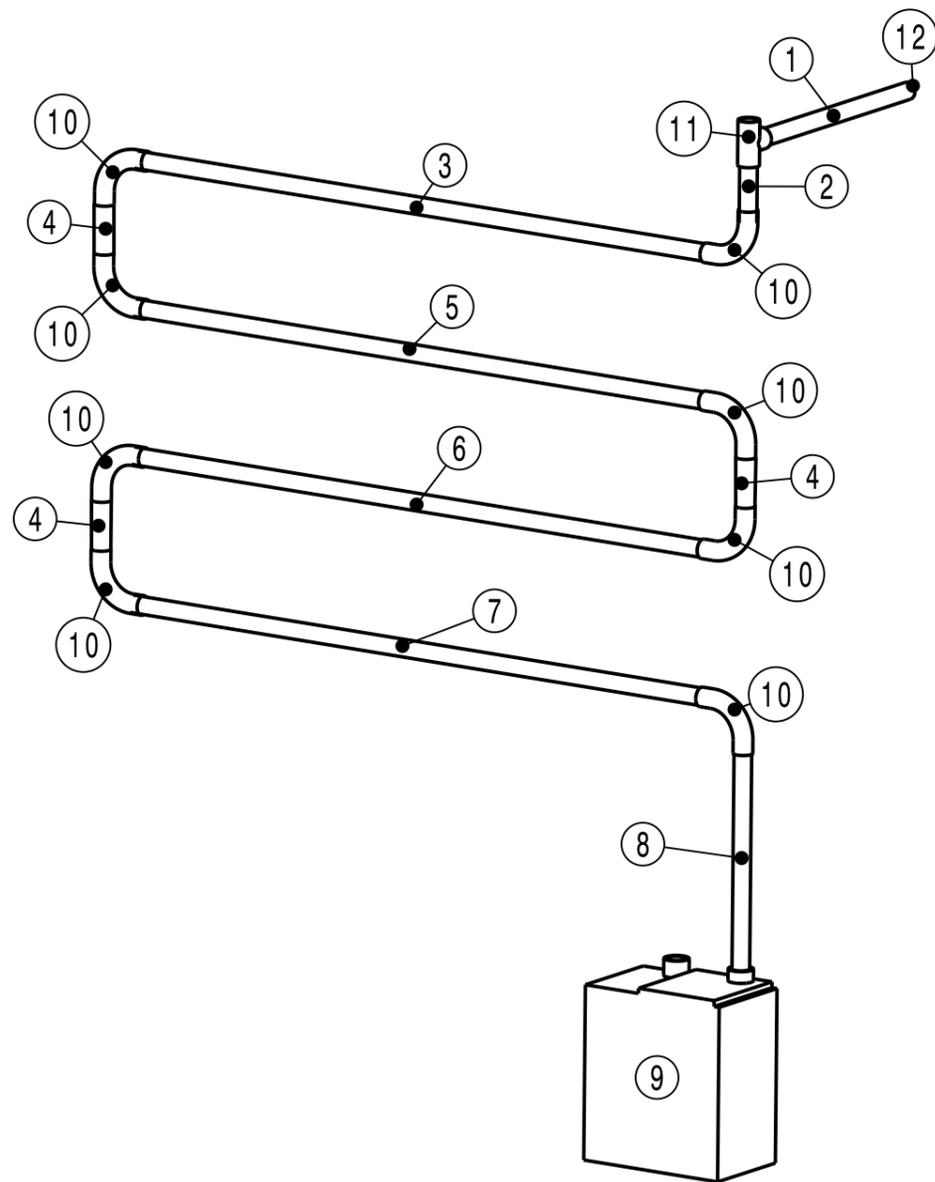
Position	Benennung	Artikelnr.	Anzahl
1	Balken V1	3858B40	8
2	Balken V2	5050B262	2
3	Ablage Lüftungsrauchmelder/ Lüfter		1
4	Podest Lüfter		1
5	Schellen		16
6	Montageplatte Ansaugrauchmelder		1

	Allgemeintoleranz DIN ISO 2768-mk	Maßstab 1:20	Blattformat A3	Werkstoff Verschiedene	Gewicht XXX
Verantwortl. Abt. T/BS34	Techn. Referenz XXX	Erstellt durch / Matrikelnummer Larissa R./2132713		Genehmigt von Prof. Wiegmann	
 Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg Hamburg University of Applied Sciences		Dokumentenart Zusammenbauzeichnung		Dokumentenstatus freigegeben	
		Titel, Zusätzlicher Titel ZSB Wand links 2		Zeichnungsnummer D6-MT-LR	
Änd. A	Ausgabedatum 27.05.2018	Spr. de	Blatt 6/9		



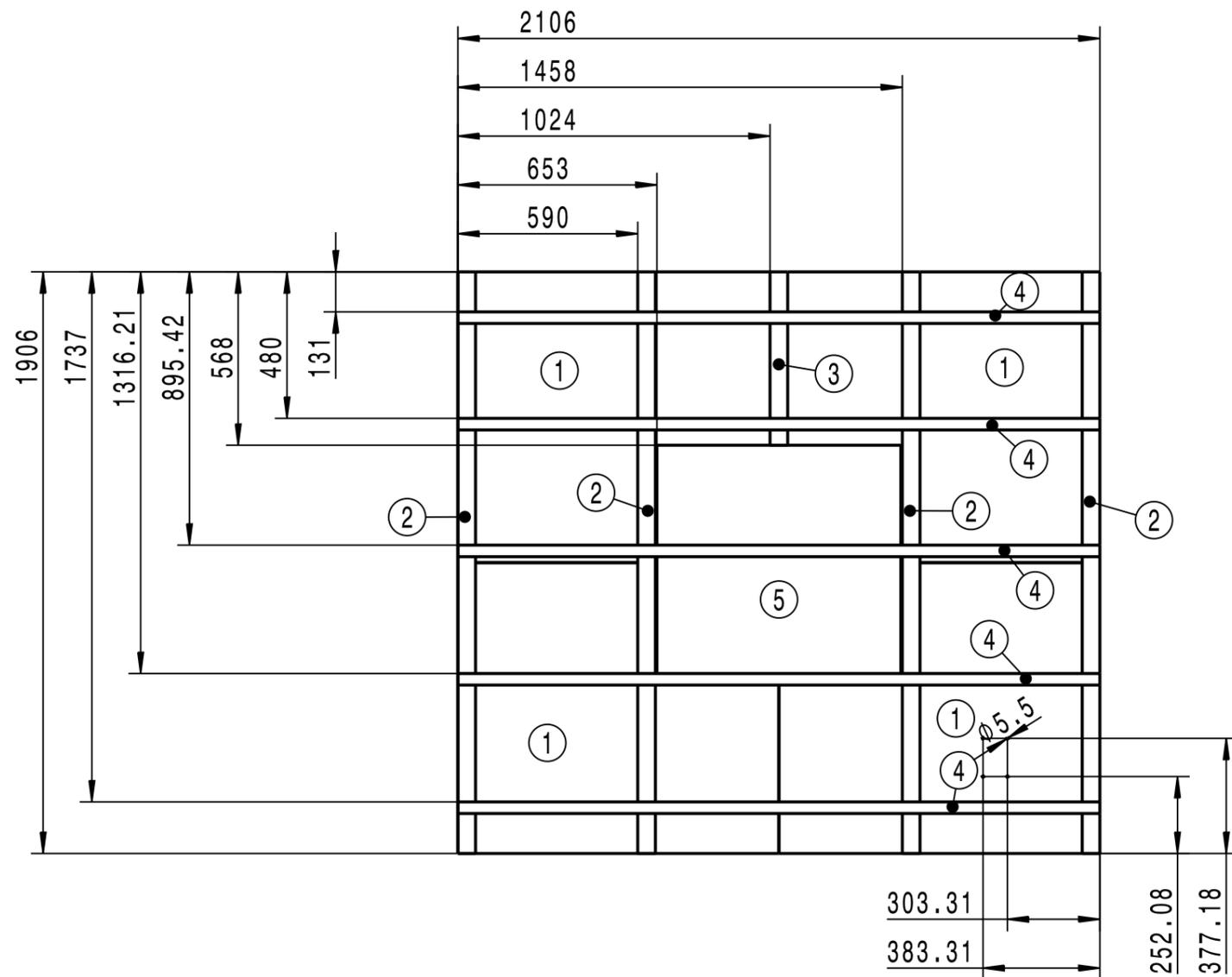
Position	Benennung	Länge	Position Ansaugöffnung	Anzahl
1	R424,5	424,5		1
2	R222	222		1
3	R994_1	994	202 (von links)	1
4	R114_1	114	42 (von unten)	1
5	R994	994	172 (von links)	1
6	R114	114		2
7	R994_2	994	442 (von links)	1
8	R764	764	62 (von rechts)	1
9	R412	412		1
10	R30	30		1
11	R119	119		1
12	Lüftungsrauchmelder			1
13	Lüfter			1
14	Reduziermuffe 1			1
15	Reduziermuffe 2			1
16	Endkappe mit Öffnung			1
17	90°-Bogen			9
18	T-Stück			1
19	Endkappe		mittig	1

	Allgemeintoleranz DIN ISO 2768-mk	Maßstab 1:10	Blattformat A3	Werkstoff Verschiedene	Gewicht XXX
Verantwortl. Abt. T/BS34	Techn. Referenz XXX	Erstellt durch / Matrikelnummer Larissa R./2132713		Genehmigt von Prof. Wiegmann	
 Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg Hamburg University of Applied Sciences		Dokumentenart Zusammenbauzeichnung		Dokumentenstatus freigegeben	
		Titel, Zusätzlicher Titel ZSB Ansaugrohr Lüftungsrauchmelder		Zeichnungsnummer D7-MT-LR	
Änd. A	Ausgabedatum 27.05.2018	Spr. de	Blatt 7/9		



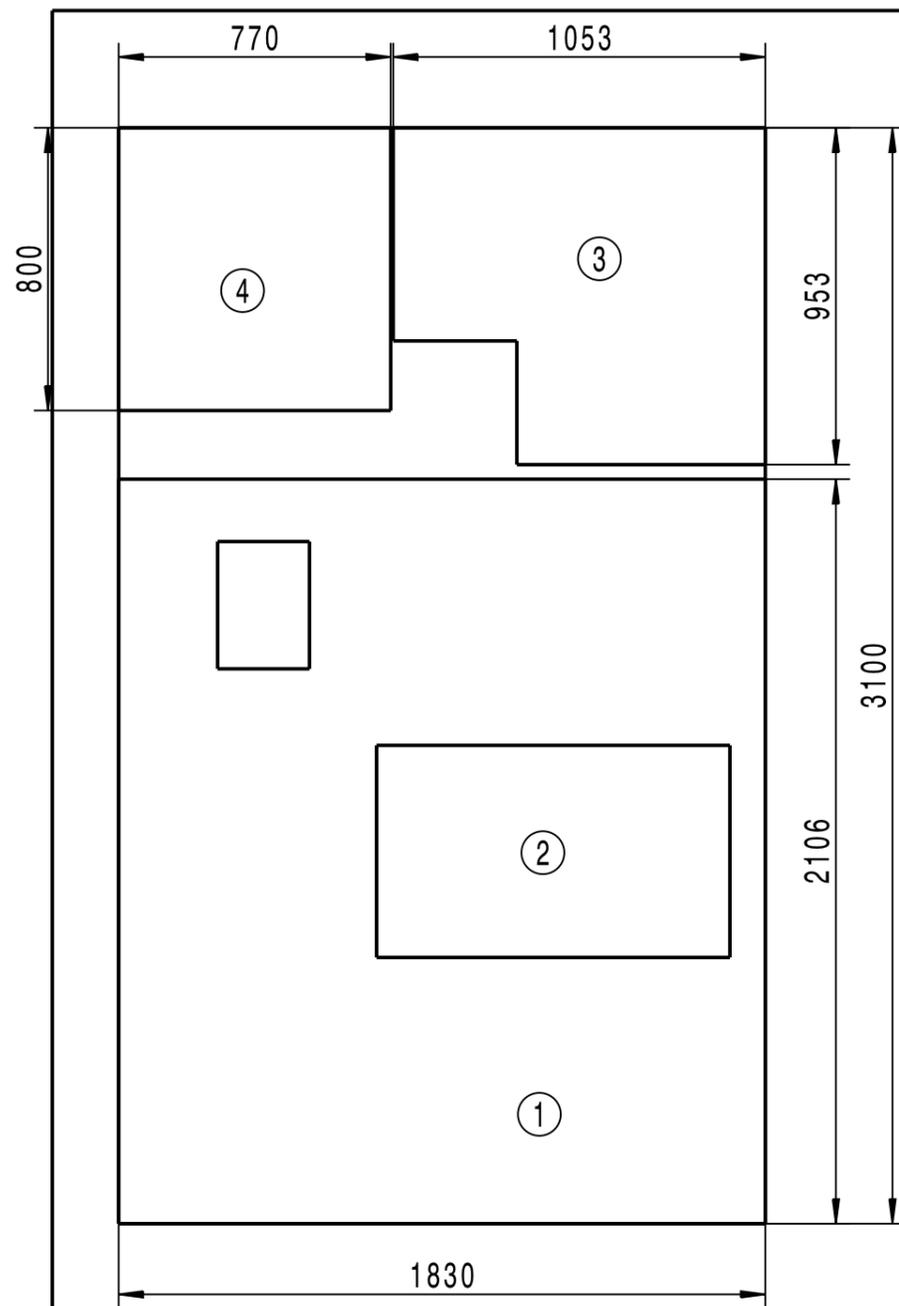
Position	Benennung	Länge	Position Ansaugöffnung	Anzahl
1	R384,5	384,5		1
2	R102	102		1
3	R994_1	994	362 (von rechts)	1
4	R114	114		3
5	R994_2	994	12 (von rechts) Bogen links: 37 vom Bogenende; Bogen rechts: 7 vom Bogenende	1
6	R994_3	994	392 (von links)	1
7	R994_4	994	222 (von links)	1
8	R332	332		1
9	Ansaugrauchmelder			
10	90° -Bogen			8
11	T-Stück			1
12	Endkappe		mittig	1

	Allgemeintoleranz DIN ISO 2768-mk	Maßstab 1:10	Blattformat A3	Werkstoff Verschiedene	Gewicht XXX
Verantwortl. Abt. T/BS34	Techn. Referenz XXX	Erstellt durch / Matrikelnummer Larissa R./2132713		Genehmigt von Prof. Wiegmann	
 Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg Hamburg University of Applied Sciences		Dokumentenart Zusammenbauzeichnung		Dokumentenstatus freigegeben	
		Titel, Zusätzlicher Titel ZSB Ansaugrohr Ansaugrauchmelder		Zeichnungsnummer D8-MT-LR	
Änd. A	Ausgabedatum 27.05.2018	Spr. de	Blatt 8/9		

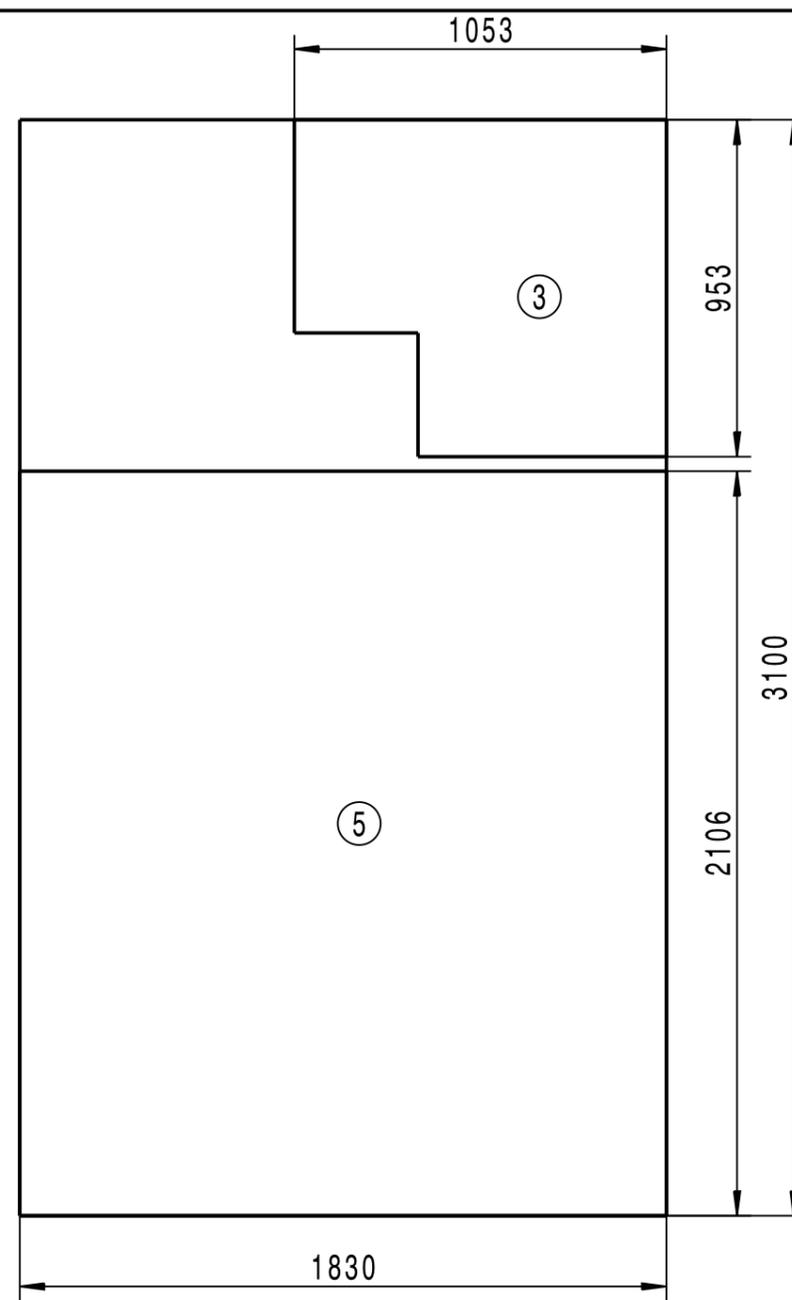


Position	Benennung	Artikelnr.	Zeichnungsnummer	Anzahl
1	Deckenplatte		T4-MT-LR	4
2	Balken V1	3858B1906		4
3	Balken V2	3858B568		1
4	Balken H1	3858B2106		5
5	Lukenplatte		T5-MT-LR	1

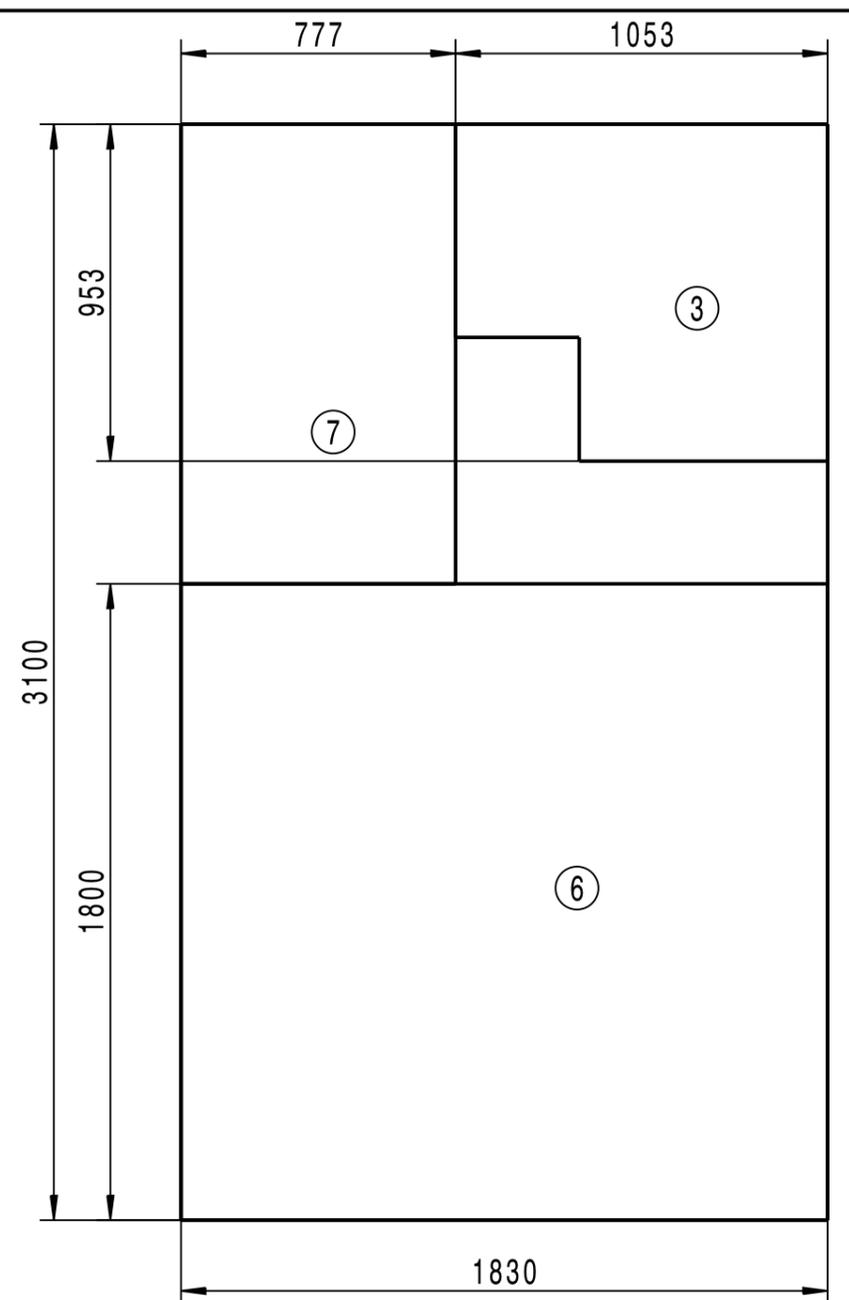
	Allgemeintoleranz DIN ISO 2768-mk	Maßstab 1:20	Blattformat A3	Werkstoff Verschiedenes	Gewicht XXX
Verantwortl. Abt. T/BS34	Techn. Referenz XXX	Erstellt durch / Matrikelnummer Larissa R./2132713		Genehmigt von Prof. Wiegmann	
 Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg Hamburg University of Applied Sciences		Dokumentenart Zusammenbauzeichnung		Dokumentenstatus freigegeben	
		Titel, Zusätzlicher Titel ZSB Decke		Zeichnungsnummer D9-MT-LR	
Änd. A	Ausgabedatum 27.05.2018	Spr. de	Blatt 9/9		



Platte 1



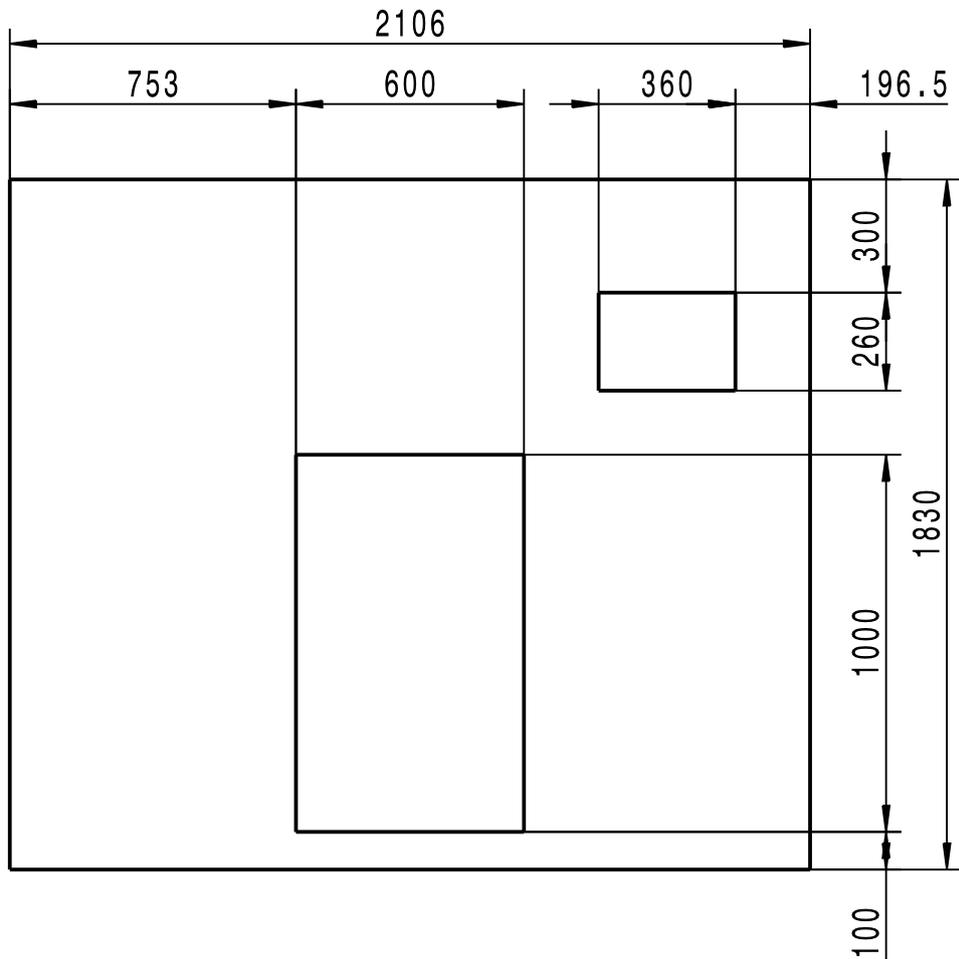
Platte 2



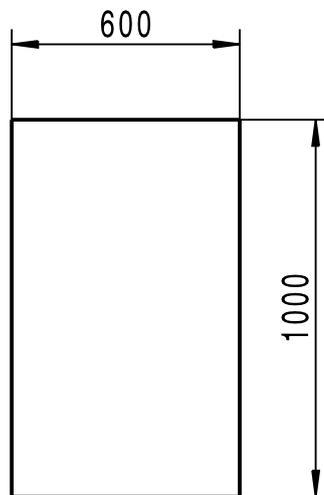
Platten 3 und 4

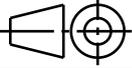
	Positionen						
	1	2	3	4	5	6	7
Platte 1	X	X	X	X			
Platte 2			X		X		
Platte 3			X			X	X
Platte 4			X			X	X

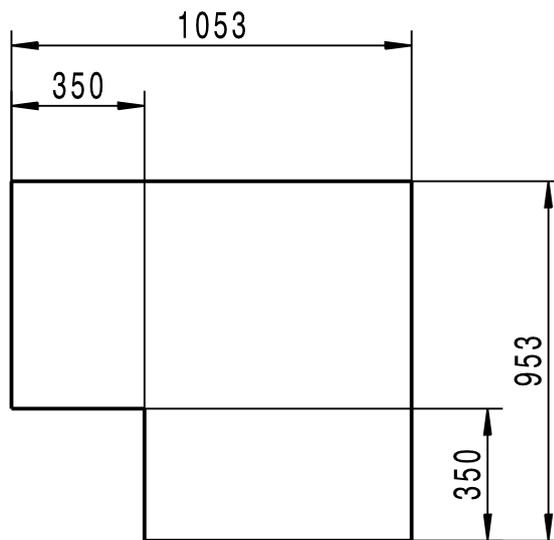
	Allgemeintoleranz DIN ISO 2768-mk	Maßstab 1:20	Blattformat A3	Werkstoff Jelmo Ship Light	Gewicht XXX
Verantwortl. Abt. T/BS34	Techn. Referenz XXX	Erstellt durch / Matrikelnummer Larissa R./2132713		Genehmigt von Prof. Wiegmann	
 Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg <i>Hamburg University of Applied Sciences</i>			Dokumentenart Übersicht		Dokumentenstatus freigegeben
			Titel, Zusätzlicher Titel Übersicht Platten		Zeichnungsnummer T1-MT-LR
Änd. A	Ausgabedatum 22.05.2018	Spr. de	Blatt 1/9		

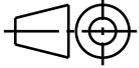


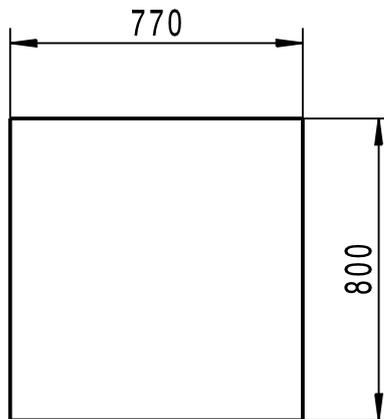
	Allgemeintoleranz DIN ISO 2768-mk	Maßstab 1:20	Blattformat A4	Werkstoff Jelmo Ship Light	Gewicht XXX
Verantwortl. Abt. T/BS34	Techn. Referenz XXX	Erstellt durch / Matrikelnummer Larissa R./2132713		Genehmigt von Prof. Wiegmann	
 Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg Hamburg University of Applied Sciences		Dokumentenart Einzelteilzeichnung	Dokumentenstatus freigegeben		
		Titel, Zusätzlicher Titel Frontplatte mit Tür (1;2)		Zeichnungsnummer T2-MT-LR	
		Änd. A	Ausgabedatum 22.05.2018	Spr. de	Blatt 2/9



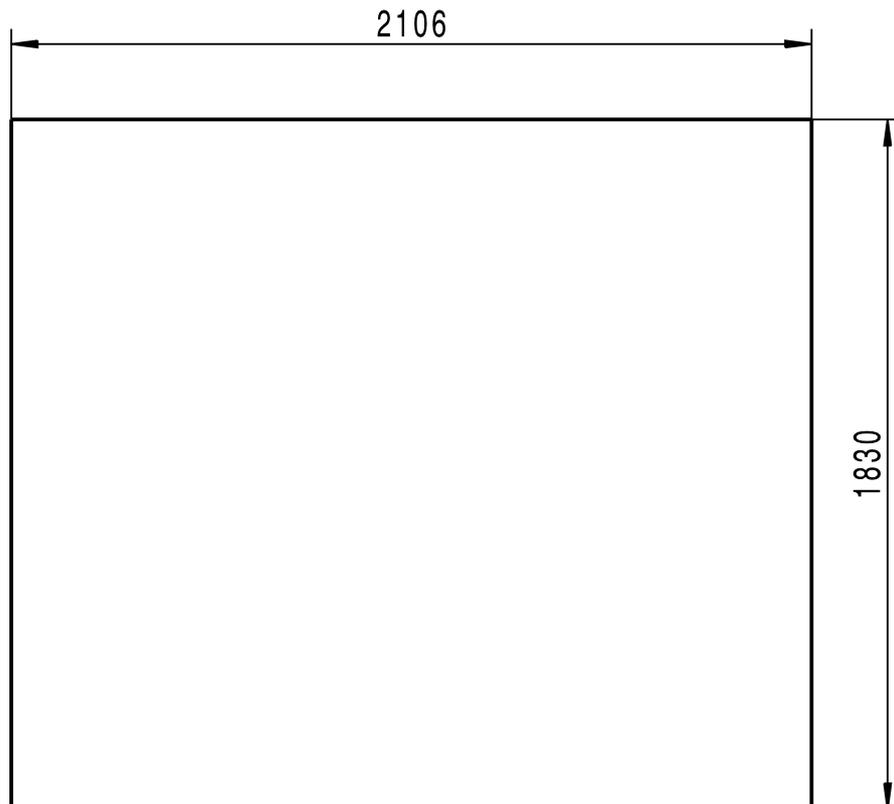
	Allgemeintoleranz DIN ISO 2768-mk	Maßstab 1:20	Blattformat A4	Werkstoff Jelmo Ship Light	Gewicht XXX
Verantwortl. Abt. T/BS34	Techn. Referenz XXX	Erstellt durch / Matrikelnummer Larissa R./2132713		Genehmigt von Prof. Wiegmann	
 Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg <i>Hamburg University of Applied Sciences</i>		Dokumentenart Einzelteilzeichnung		Dokumentenstatus freigegeben	
		Titel, Zusätzlicher Titel Tür (2)		Zeichnungsnummer T3-MT-LR	
		Änd. A	Ausgabedatum 22.05.2018	Spr. de	Blatt 3/9



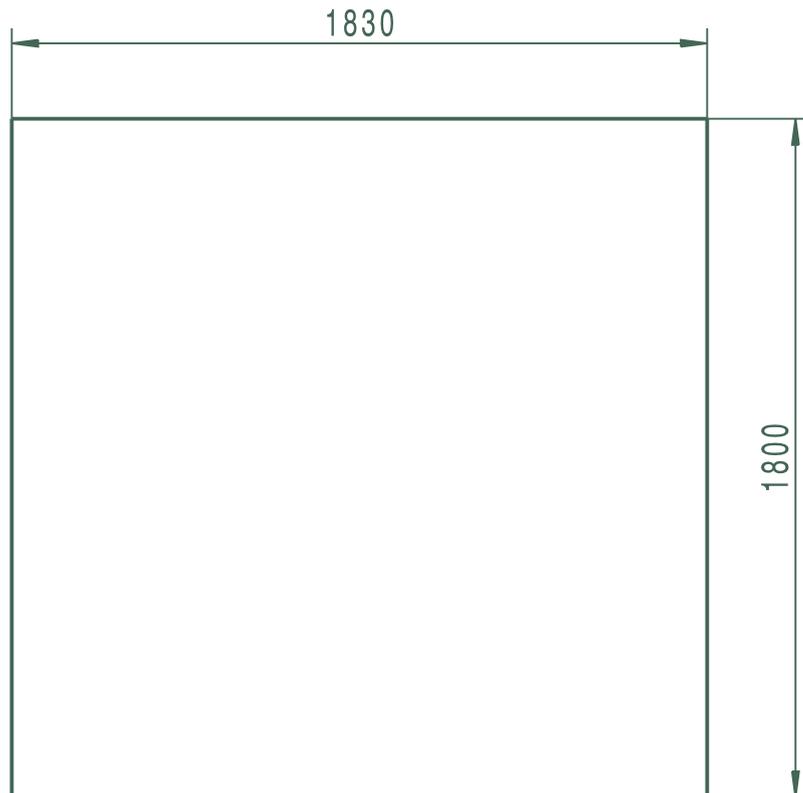
	Allgemeintoleranz DIN ISO 2768-mk	Maßstab 1:20	Blattformat A4	Werkstoff Jelmo Ship Light	Gewicht XXX
Verantwortl. Abt. T/BS34	Techn. Referenz XXX	Erstellt durch / Matrikelnummer Larissa R./2132713		Genehmigt von Prof. Wiegmann	
 Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg <i>Hamburg University of Applied Sciences</i>		Dokumentenart Einzelteilzeichnung		Dokumentenstatus in Arbeit	
		Titel, Zusätzlicher Titel Deckenplatte (3)		Zeichnungsnummer T4-MT-LR	
		Änd. A	Ausgabedatum 22.05.2018	Spr. de	Blatt 4/9



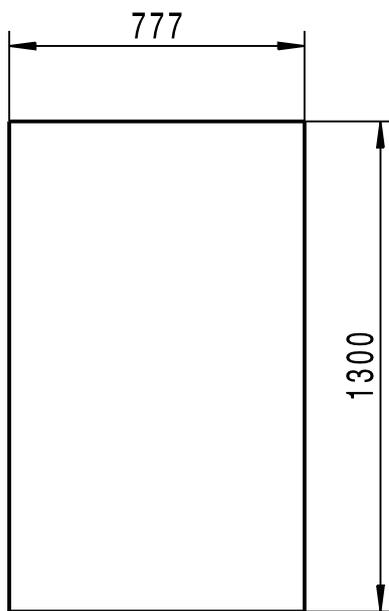
	Allgemeintoleranz DIN ISO 2768-mk	Maßstab 1:20	Blattformat A4	Werkstoff Jelmo Ship Light	Gewicht XXX
Verantwortl. Abt. T/BS34	Techn. Referenz XXX	Erstellt durch / Matrikelnummer Larissa R./2132713		Genehmigt von Prof. Wiegmann	
 Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg <i>Hamburg University of Applied Sciences</i>		Dokumentenart Einzelteilzeichnung		Dokumentenstatus freigegeben	
		Titel, Zusätzlicher Titel Lukenplatte (4)		Zeichnungsnummer T5-MT-LR	
		Änd. A	Ausgabedatum 22.05.2018	Spr. de	Blatt 5/9



	Allgemeintoleranz DIN ISO 2768-mk	Maßstab 1:20	Blattformat A4	Werkstoff Jelmo Ship Light	Gewicht XXX
Verantwortl. Abt. T/BS34	Techn. Referenz XXX	Erstellt durch / Matrikelnummer Larissa R./2132713		Genehmigt von Prof. Wiegmann	
 Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg <i>Hamburg University of Applied Sciences</i>		Dokumentenart Einzelteilzeichnung		Dokumentenstatus freigegeben	
		Titel, Zusätzlicher Titel Rückwand (5)		Zeichnungsnummer T6-MT-LR	
		Änd. A	Ausgabedatum 22.05.2018	Spr. de	Blatt 6/9



	Allgemeintoleranz DIN ISO 2768-mk	Maßstab 1:20	Blattformat A4	Werkstoff Jelmo Ship Light	Gewicht XXX
Verantwortl. Abt. T/BS34	Techn. Referenz XXX	Erstellt durch / Matrikelnummer Larissa R./2132713		Genehmigt von Prof. Wiegmann	
 Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg <i>Hamburg University of Applied Sciences</i>		Dokumentenart Einzelteilzeichnung	Dokumentenstatus freigegeben		
		Titel, Zusätzlicher Titel Seitenwand (6)	Zeichnungsnummer T7-MT-LR		
		Änd. A	Ausgabedatum 22.05.2018	Spr. de	Blatt 7/9



	Allgemeintoleranz DIN ISO 2768-mk	Maßstab 1:20	Blattformat A4	Werkstoff Jelmo Ship Light	Gewicht XXX
Verantwortl. Abt. T/BS34	Techn. Referenz XXX	Erstellt durch / Matrikelnummer Larissa R./2132713		Genehmigt von Prof. Wiegmann	
 Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg <i>Hamburg University of Applied Sciences</i>		Dokumentenart Einzelteilzeichnung		Dokumentenstatus freigegeben	
		Titel, Zusätzlicher Titel Verschnitt (7)		Zeichnungsnummer T8-MT-LR	
		Änd. A	Ausgabedatum 22.05.2018	Spr. de	Blatt 8/9

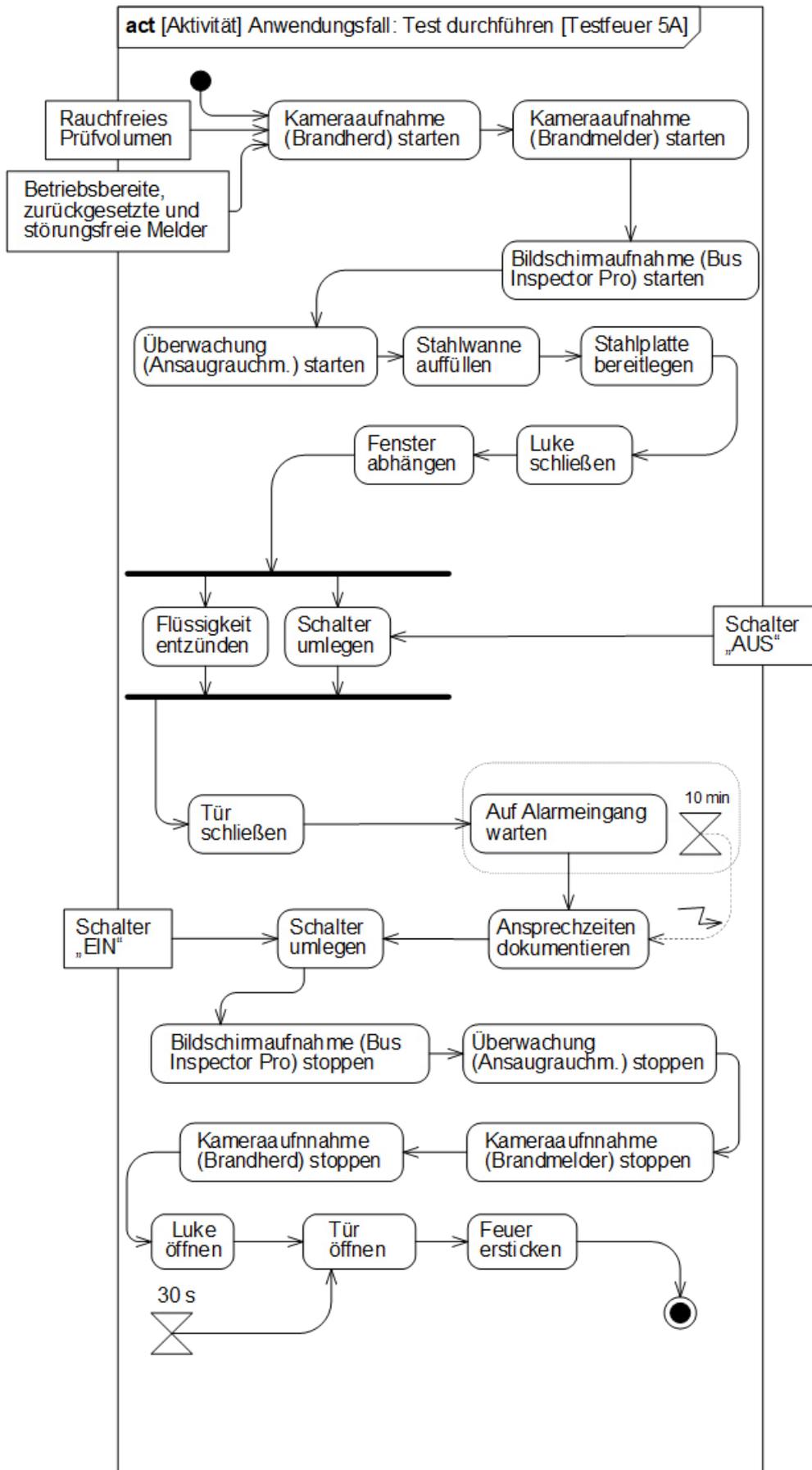
Positionsnummer	Bezeichnung	Anzahl
1	Front	1
2	Tür	1
3	Deckenplatte	4
4	Lukenplatte	1
5	Rückwand	1
6	Seitenwand	2
7	Verschnitt	2

	Allgemeintoleranz DIN ISO 2768-mk	Maßstab 1:20	Blattformat A4	Werkstoff Jelmo Ship Light	Gewicht XXX
Verantwortl. Abt. T/BS34	Techn. Referenz XXX	Erstellt durch / Matrikelnummer Larissa R./2132713		Genehmigt von Prof. Wiegmann	
 Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg Hamburg University of Applied Sciences		Dokumentenart Stückliste		Dokumentenstatus freigegeben	
		Titel, Zusätzlicher Titel Stückliste Tischler		Zeichnungsnummer T9-MT-LR	
		Änd. A	Ausgabedatum 22.05.2018	Spr. de	Blatt 9/9

XII Anhang C: Entwicklung der Testprozedur

<i>Anhang C 1.</i> Aktivitätsdiagramm zur Aktivität „Testfeuer 5A durchführen“	120
<i>Anhang C 2.</i> Labortest-Report – Rauchmeldertests	121

Anhang C 1. Aktivitätsdiagramm zur Aktivität „Testfeuer 5A durchführen“.



Labortest-Report – Rauchmeldertests

1. Einführung

Es sollen unterschiedliche Rauchmeldesysteme hinsichtlich ihrer Ansprechzeit auf einen Brand miteinander verglichen werden. Dazu werden vier unterschiedliche Rauchmeldesysteme in einem definierten Prüfvolumen installiert und mit 2 unterschiedlichen Testfeuern nach AS8036 (R2) (TF2 und TF5A nach DIN EN 54) getestet. Die Ansprechzeitpunkte der Rauchmelder werden mithilfe eines Datenerfassungs-moduls auf einem Bildschirm visualisiert und mit einem Bildschirmaufnahme-programm protokolliert.

1.1 Referenz-Dokumente

Tabelle 1

Referenz-Dokumente

ID	Bezeichnung
R1	DIN EN 54
R2	AS8036 Rev. A
R3	Component Maintenance Manual with Illustrated Parts List – Smoke Detector [REDACTED], [REDACTED], [REDACTED]
R4	Open-air Multicriteria Detector [REDACTED]
R5	Duct Multicriteria Detector [REDACTED]
R6	Ansaugrauchmelder [REDACTED] – Artikel-Nr. [REDACTED]
R7	[REDACTED]
R8	[REDACTED] - Betriebsanleitung

1.2 Design-Dokumente

Tabelle 2
Design-Dokumente

ID	Bezeichnung
D1-MT-LR	Zeichnung: ZSB Testaufbau, Blatt 1 von 9
D2-MT-LR	Zeichnung: ZSB Front, Blatt 2 von 9
D3-MT-LR	Zeichnung: ZSB Rückwand, Blatt 3 von 9
D4-MT-LR	Zeichnung: ZSB Wand rechts, Blatt 4 von 9
D5-MT-LR	Zeichnung: ZSB Wand links 1, Blatt 5 von 9
D6-MT-LR	Zeichnung: ZSB Wand links 2, Blatt 6 von 9
D7-MT-LR	Zeichnung: ZSB Ansaugrohr [REDACTED], Blatt 7 von 9
D8-MT-LR	Zeichnung: ZSB Ansaugrohr [REDACTED], Blatt 8 von 9
D9-MT-LR	Zeichnung: ZSB Decke, Blatt 9 von 9

1.3 Testkontext

Die Durchführung dieser Tests zeigt welche Zeit jedes der getesteten Rauchmeldesysteme benötigt um einen Pyrolyseschmelbrand (TF2) und einen reduzierten offenen Flüssigkeitsbrand (TF5A) zu detektieren. Es handelt sich um einen grundlegenden und flugzeugunabhängigen Test. Er dient ausschließlich zum Vergleich der Ansprechzeiten der ausgewählten Rauchmeldesysteme.

1.4 Testausrüstung

Tabelle 3
Allgemeine Testausrüstung

ID	Bezeichnung
1.1	CO ₂ - Feuerlöscher
1.2	Datenerfassungsmodul, min 6. low-aktiv Discrete-Eingänge Hier: ARINC Tester von ngnuity ltd mit sechs High-Aktiv-Eingängen und 6 Low-Aktiv-Eingängen sowie zwei Eingänge für Referenzspannungen. Software: Bus Inspector Pro Rev. 4.07
1.3	Eine Videokamera für Videoaufnahmen von min. 10 Minuten Länge
1.4	Hitzdrahtanemometer zur Messung von Strömungsgeschwindigkeiten, Messbereich: min. 0 m/s – 20 m/s Hier: Testo 425
1.5	Laptop mit zwei USB Schnittstellen
1.6	Luxmeter, Messbereich: min. 0 Lux – 10 Lux

ID	Bezeichnung
1.7	Software Bus Inspector Pro Rev. 4.07
1.8	Software OBS Studio 21.1.2
1.8	Software [REDACTED]
1.9	Spannungsversorgung 28 V, min. 3 A Hier: LAMBDA Modell LLS8040, Output 0 – 40 V
1.10	Zange, ca. 30 cm lang

Tabelle 4
Rauchmelder und zugehörige Elemente

ID	Bezeichnung	Hersteller	Art	Brandkenn- größen	Referenz- dokument
2.1	[REDACTED]	[REDACTED]	Passivrauch- melder	Rauchaerosol	R3, R4
2.2	[REDACTED]	[REDACTED]	Lüftungsrauch- melder	Raucherol	R3, R5
2.2.1	Einbauluftventila- tor, ca. 145 m ³ /h bis 187 m ³ /h				
2.2.2	Rohrsystem, ID: 21 mm				
2.3	[REDACTED]	[REDACTED]	Ansaugrauch- melder	Rauchaerosol	R6, R7
2.3.1	Rohrsystem, ID: 21 mm				
2.4	[REDACTED]	[REDACTED]	Kamerarauch- melder	Bildanalyse (Bewegung des Rauchaerosols, Flackerfrequenz, Flammen)	R8
2.4.1	Lichtquelle, min. 7 Lux				
2.4.2	Blende (1740 mm x 953 mm)				
2.4.3	Mattweißer Farblack				

Tabelle 5

Ausrüstung für das Testfeuer 2 - Pyrolyseschmelbrand

ID	Bezeichnung
3.1	100 Buchenstäbe, 25 mm x 20 mm x 75 mm, Restfeuchte \leq 5 %
3.2	Heizplatte, min. 2 kW Leistung, min. 600 °C Temperatur
3.3	Holzfeuchtemessgerät, Messbereich 0 % - 70 %
3.4	Wanne, mit Wasser gefüllt

Tabelle 6

Ausrüstung für das Testfeuer 5A – Reduzierter offener Flüssigkeitsbrand

ID	Bezeichnung
4.1	Stahlwanne (330 mm x 330 mm x 50 mm)
4.2	Stahlwanne (100 mm x 100 mm x 90 mm)
4.3	n-Heptan, 1600 g
4.4	Stahlplatte (150 mm x 150 mm)
4.5	Packung Streichhölzer

2. Testaufbau

2.1 Prüfvolumen

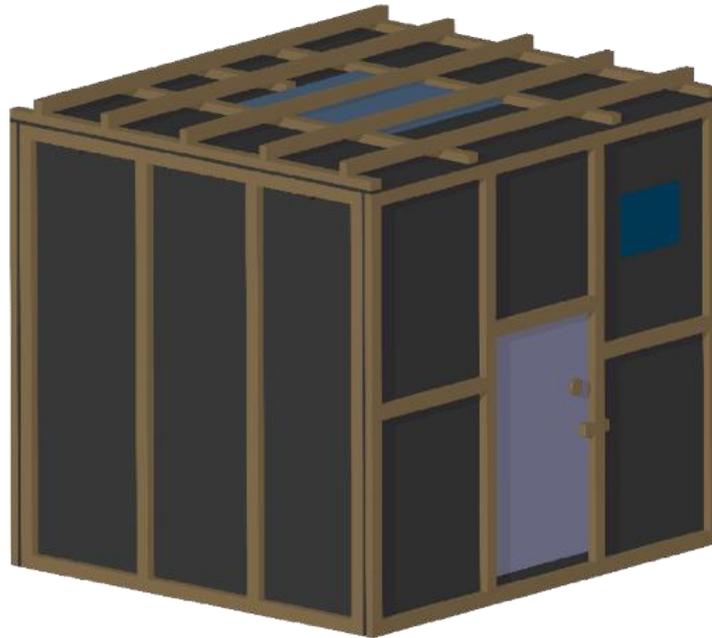


Abbildung 1. Prüfvolumen

Das Prüfvolumen, Abbildung 1, ist ein Quader aus dem Material Jelmo® Ship Light (schwer entflammbares Sperrholz), D1-MT-LR bis D9-MT-LR. Die Innenmaße betragen in der Höhe 1830 mm, in der Breite 2000 mm und in der Tiefe 1800 mm. Die Wandstärke beträgt 15 mm. Es ist keine Bodenplatte vorhanden. In der Frontplatte befinden sich eine Tür zum Begehen und ein Fenster zum Einsehen des Prüfvolumens. Um keine Fremdlichteinwirkung auf das Bild des Kamerabrandmelders auszuüben wird das Fenster während der Tests mit einem blickdichten Tuch abgehängt. In der Deckenplatte ist eine Luke, die durch das Nachvorneziehen einer größeren aufliegenden Platte geöffnet werden kann. Die Stabilität des Quaders wird durch eine Rahmenkonstruktion an den Außenwänden realisiert.

2.2 Positionierung der Testelemente

2.2.1 Positionierung des Brandherds

Die Brandherde der beiden Testfeuer, Heizplatte (TF2) oder Stahlwanne (TF5A) (R1 und R2), werden exakt mittig auf dem Boden im Prüfvolumen platziert. Somit stehen sie mit ihrem Mittelpunkt 1000 mm von der Seitenwand rechts entfernt und 900 mm von der Front. In Abbildung 2 sind exemplarisch die Maße zur Platzierung der 330 mm x 330 mm Stahlwanne eingezeichnet, in die der kleinere Stahlwürfel für den reduzierten offenen Flüssigkeitsbrand mittig platziert wird.

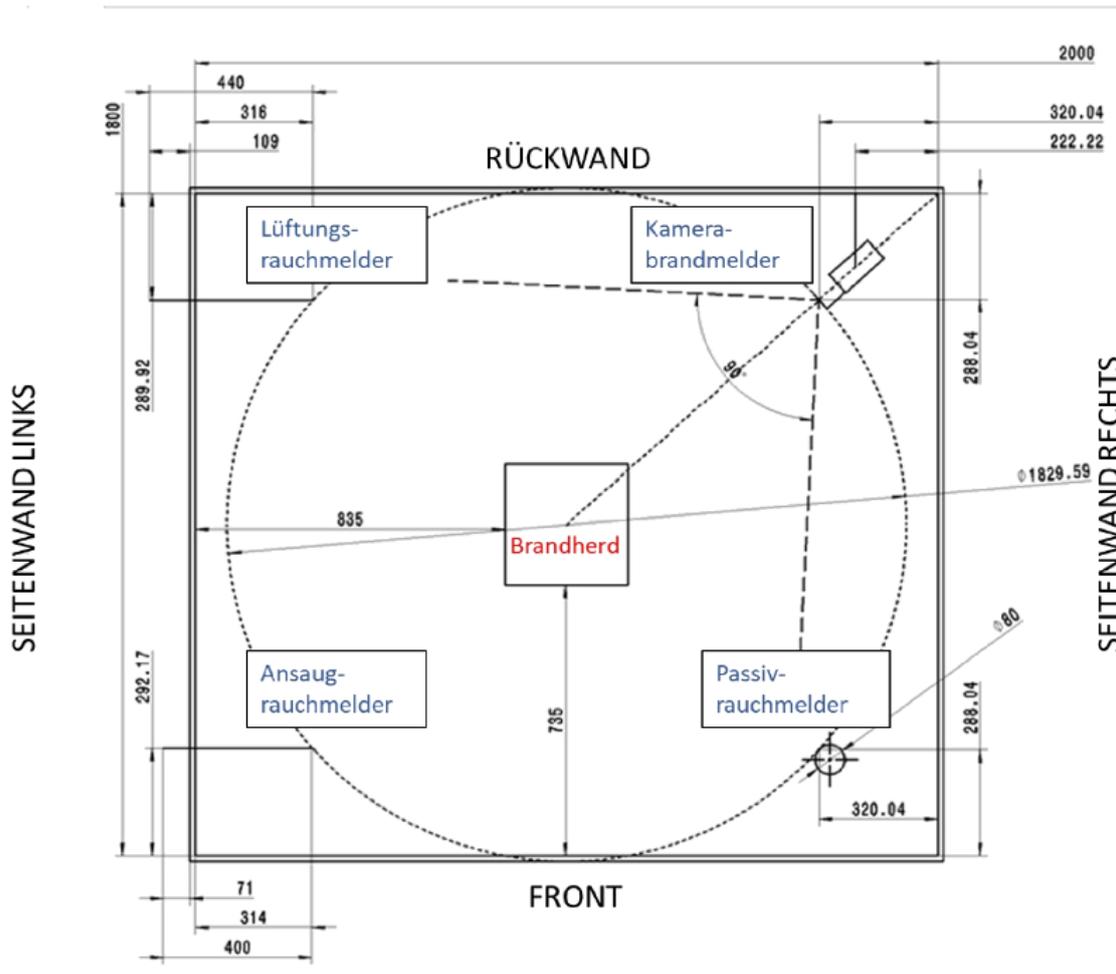


Abbildung 2. Positionierung des Brandherds (rot) (exemplarisch Stahlwanne) und der Brandmeldesysteme (blau)

2.2.2 Positionierung der Brandmeldesysteme

Alle Brandmeldesysteme werden auf einem Messkreis um den Brand positioniert. Der Messkreis befindet sich auf einer Höhe von 1778 mm über dem Boden und hat einen Radius von ca. 915 mm. Der Passivrauchmelder tangiert mit seiner Raucheintrittsöffnung den Messkreis. Genauso tangieren die Ansaugöffnungen in der Endkappe der Ansaugrohre des Ansaugrauchmelders und des Lüftungrauchmelders den Messkreis. Die Kamera tangiert mit dem Mittelpunkt ihres Objektivs den Messkreis.

2.2.2.1 Passivrauchmelder [REDACTED]

Der Passivrauchmelder wird mit seiner Montageplatte direkt an der Deckenplatte montiert. Die Position der vier Montagepunkte ist auf Zeichnung D9-MT-LR zu finden. Der Passivrauchmelder ist mit dem Stecker zur Front hin ausgerichtet.

2.2.2.2 Kamerabrandmelder

Das Stativ der Kamera wird mit dem Mittelpunkt der Montageplatte auf einer Höhe von 1739 mm an der Innenseite der Rückwand angebracht, mit 222 mm Abstand zur Seitenwand links, Abbildung 2. Nach Aufsetzen der Kamera auf das Stativ wird ihre Sichtlinie horizontal in Richtung des Brandherdes ausgerichtet. Die Sichtlinie ist nicht Richtung Boden geneigt. In einem Abstand von 30 cm vor dem Kameraobjektiv wird eine Blende mit einer Höhe von 1740 mm und einer Breite von 953 mm aufgestellt, exemplarisch in Abbildung 3. Die Blende besteht ebenfalls aus einem schwer entflammaren Material, wie z.B. Jelmo® Ship light.

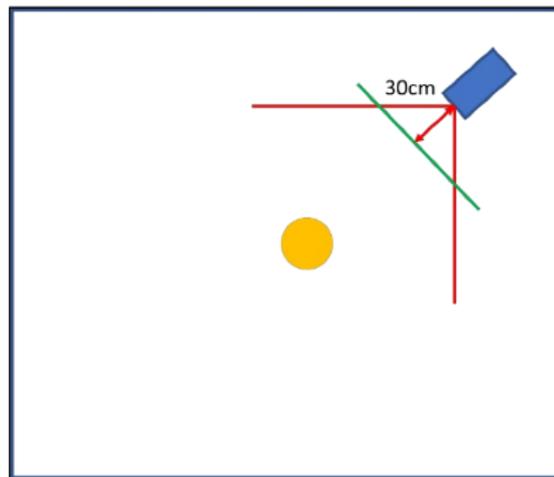


Abbildung 3. Positionierung der Blende (grün) vor dem Kameraobjektiv (blau) (Draufsicht auf das Prüfvolumen)

Alle sich im Kamerabild befindende Flächen werden mit einem mattweißen Farblack gestrichen. Dazu zählen die sichtbaren Teile der Seitenwände, die komplette Decke mit der darauf liegenden Platte sowie der sichtbare Teil der Blende. Um die für den Betrieb der Kamera notwendige Beleuchtungsstärke von mindestens 7 Lux zu realisieren wird eine handelsübliche Schreibtischleuchte in der gegenüberliegenden Ecke von der Kamera platziert im Prüfvolumen platziert. Sie befindet sich direkt unter dem Ende des Ansaugrohres des [REDACTED], Abbildung 2. Die Beleuchtungsstärke wird später an dem Punkt gemessen, der sich 450 mm von der Rückwand und 470 mm von der Seitenwand links entfernt im Prüfvolumen befindet.

2.2.2.3 Rauchansaugsysteme [REDACTED] und Lüftungsrauchmelder [REDACTED]

Die Detektionseinheiten des Ansaugrauchmelders [REDACTED] und des Lüftungsrauchmelders [REDACTED] sowie der größte Teil der Ansaugrohre werden außerhalb des Prüfvolumens montiert, Abbildung 4. Die Ansaugrohre werden in horizontal verlaufenden Schlangelinien vom unten an der Wand angebrachtem Melder bis hoch zur Messkreisebene geführt, Zeichnung D6-MT-LR. Dort werden die Enden der Ansaugrohre mit jeweils einer Ansaugöffnung in der Endkappe in das Prüfvolumen geführt. Beide Ansaugrohre sind je 6 m lang, besitzen acht 90°-Bögen, ein T-Stück, eine Endkappe und haben 6 Ansaugöffnungen, Zeichnungen D7-MT-LR und D8-MT-LR.

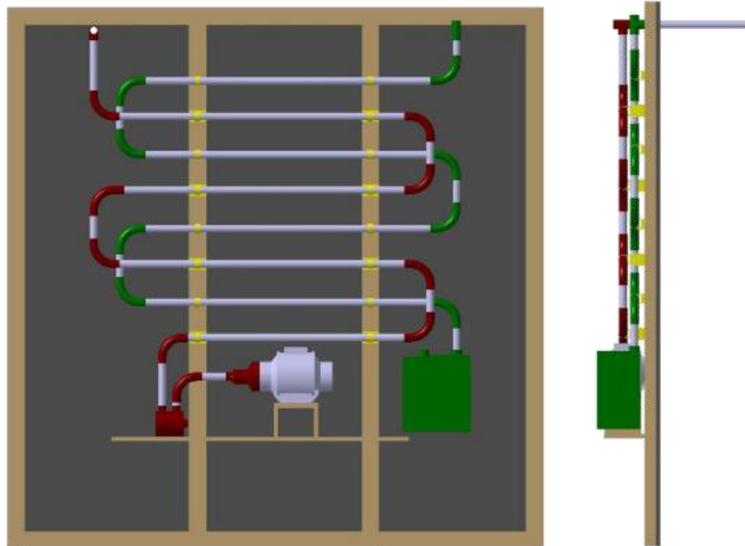


Abbildung 4. Drauf- und Seitenansicht der Seitenwand links mit dem verbauten Ansaugrauchmelder (grün) und dem Lüftungsrauchmelder (rot)

Alle Ansaugöffnungen haben einen Durchmesser von 3,5 mm und sind zum Boden ausgerichtet. Der Lüftungsrauchmelder benötigt zusätzlich einen Einbauluftventilator um eine Strömung zu generieren im Ansaugrohr. Der Ventilator ist über zwei weitere Rohrstücke und einen Bogen mit dem Melder verbunden ist. Hinter dem Ventilator sowie beim Auslass des -Rauchmelders wird ein weiteres Rohrstück von 100 mm Länge angebracht um die Strömungsgeschwindigkeit zu messen.

2.2.2.4 Konfiguration der Brandmeldesysteme

Der und der können nicht weiter konfiguriert werden.

Für den ist die Lüftereinstellung Mittel zu wählen. Die Sensibilität des abgegriffenen Alarms wird auf 0,04705% Lichtdämpfung pro Meter festgelegt.

Für den Kamerabrandmelder oben ist eine Verifikationszeit von 10 s für den Rauchdetektionsalgorithmus einzustellen.

2.3 Elektrischer Aufbau und Datenerfassung

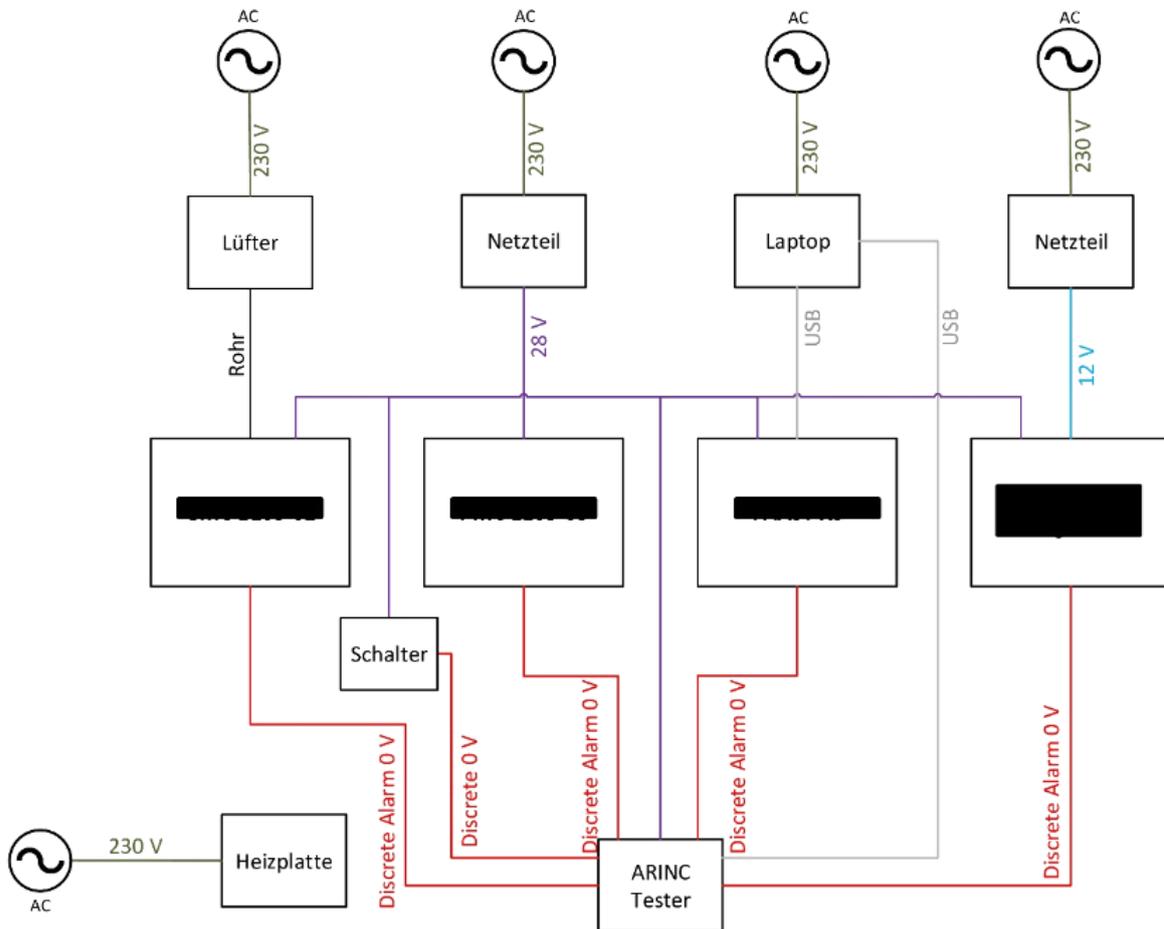


Abbildung 5. Elektrischer Aufbau und Datenerfassung

Abbildung 5 zeigt den elektrischen Aufbau des Tests sowie die Datenerfassung. Die Brandmeldesysteme [REDACTED], [REDACTED] und [REDACTED] werden mit einer Betriebsspannung von 28 V versorgt. Der Kamerabrandmelder [REDACTED] benötigt eine Spannung von 12 V, die von einem zugehörigen Netzteil bereitgestellt wird. Zusätzlich wird der Kamerabrandmelder mit 28 V versorgt, damit ein Alarm geschaltet und anschließend ein diskreter Pegel von 0 V als Signal abgegriffen werden kann. Dieses wird, genau wie alle weiteren diskreten 0 V-Pegel, in das Datenerfassungsmodul (ARINC Tester) geführt. Auch der Schalter zur Signalisierung des Testfeuerstarts wird mit 28 V versorgt und ein diskreter Pegel von 0 V wird als Signal zum ARINC Tester geführt. Der ARINC Tester ist über eine USB-Schnittstelle an den Laptop angeschlossen. Über eine weitere USB-Schnittstelle wird auf dem Laptop der Rauchmelder [REDACTED] überwacht. Die Geräte Heizplatte, Lüfter, Laptop und alle Netzteile werden mit der regulären Netzspannung von 230 V versorgt.

3. Allgemeine Informationen

Ort	<i>Hamburg-Fuhlsbüttel, Lufthansa-Basis</i>	Datum	<i>11. Juni 2018</i>
Zeit Beginn	<i>10:00 Uhr (MEZ)</i>	Zeit Ende	<i>17:00 Uhr (MEZ)</i>
Testingenieur	<i>Larissa Rohlf, Lufthansa Technik</i>		
Testingenieur	<i>Karsten Kühl, Lufthansa Technik</i>		
Testingenieur	[REDACTED]		
Kommentare		
		
		

4. Testprozeduren

Jedes Testfeuer, der Pyrolyseschmelbrand (TF2) und der reduzierte offene Flüssigkeitsbrand (TF5A), wird acht Mal durchgeführt.

4.1 Testprozedur - Testvorbereitung

1. Stelle sicher, dass der Abzug über dem Prüfvolumen eingeschaltet ist.
2. Stelle sicher, dass die Rauchmelder im Brandlabor sowie auf dem Flurbereich vor dem Labor auf Revision gesetzt sind, sodass ein Alarm nicht an eine Brandmeldezentrale weitergeleitet wird.

Zeit Beginn Revision: *10:00 (MEZ)*
 Zeit Ende Revision: *18:00 (MEZ)*

3. Stelle sicher, dass die im Prüfvolumen platzierte Kamera den Brandherd im Bild hat.
4. Stelle vor jeder zwei Testfeuer-Messreihen sicher, dass der Brandherd (Heizplatte bzw. Stahlwanne) exakt mittig im Prüfvolumen platziert ist.
5. Stelle sicher, dass ein funktionsfähiger CO₂-Feuerlöscher in Reichweite steht.
6. Stelle sicher, dass die Volumenströme des [REDACTED] und des Lüftungsrauchmelders [REDACTED] annähernd gleich sind. Dokumentiere die Volumenströme.

Strömungsgeschwindigkeit [REDACTED] [m/s]: *ca. 2,4*
 Strömungsgeschwindigkeit [REDACTED] [m/s]: *ca. 2,2*

7. Stelle sicher, dass die im Prüfvolumen platzierte Lichtquelle eine Beleuchtungsstärke von mindestens sieben Lux auf dem Streifen 20 cm links neben der großen Stahlwanne spendet. Dokumentiere die gemessene Beleuchtungsstärke.

Beleuchtungsstärke: *14 Lux (Stufe II der Leuchte)*

8. Stelle sicher, dass die Rauchmelder mit Spannung versorgt, betriebsbereit und funktionsfähig sind.

█ ist funktionsfähig:	<input checked="" type="checkbox"/>
█ ist funktionsfähig:	<input checked="" type="checkbox"/>
█ ist funktionsfähig:	<input checked="" type="checkbox"/>
█ ist funktionsfähig:	<input checked="" type="checkbox"/>

9. Stelle sicher, dass der ARINC-Tester an einen Laptop angeschlossen und die Software Bus Inspector Pro geöffnet ist. Stelle sicher, dass der Schalter, welcher den Beginn des Testfeuers signalisiert, sowie die Alarmausgänge der Melder in die Low-Aktiv-Eingänge des ARINC-Testers gepinnt sind. Dokumentiere die Zuordnung der Melder zum jeweiligen Low-Aktiv-Eingang, beginnend von Zwölf.

Low-Aktiv-Eingang 12:	Schalter zur Signalisierung des Testfeuerbeginns
Low-Aktiv Eingang 11:	█
Low-Aktiv Eingang 10:	█
Low-Aktiv Eingang 09:	█
Low-Aktiv Eingang 08:	█

10. Stelle sicher, dass das Bildschirmaufnahmeprogramm OBS Studio geöffnet und betriebsbereit ist.
 11. Stelle sicher, dass die Überwachungssoftware █ des Ansaugrauchmelders █ geöffnet und betriebsbereit ist.
 12. Stelle sicher, dass der Brandherd (Heizplatte oder Stahlwanne) exakt mittig im Prüfvolumen platziert ist.
 13. Stelle sicher, dass sich die Atmosphäre an die Rahmenbedingungen der AS8036 hält. Dokumentiere die Atmosphäre.

Temperatur [°C]:	22 (durch Brandlabor festgelegt)
Luftdruck [hPa]:	1012
Rel. Luftfeuchte [%]:	67

4.2 Testprozedur - Testfeuer 2 – Pyrolyseschmelbrand

- a) Stelle sicher, dass das Prüfvolumen rauchfrei ist.
- b) Stelle sicher, dass alle Melder zurückgesetzt, betriebsbereit und störungsfrei sind.
- c) Starte die Aufnahme der Kamera im Prüfvolumen.
- d) Starte die Aufnahme des Kamerabrandmelders [REDACTED].
- e) Starte die Überwachung der Rauchkonzentration durch die Software [REDACTED] des Ansaugrauchmelders [REDACTED].
- f) Starte die Bildschirmaufnahme der Discrete-Benutzeroberfläche der Software Bus Inspector Pro durch das Bildschirmaufnahmeprogramm OBS Studio.
- g) Kontrolliere ob die Restfeuchte eines Buchenstabs der zehn verwendeten Buchenstäbe genauso klein oder kleiner als 5 % ist. Dokumentiere das Ergebnis. Sollte die Restfeuchte der Buchenstäbe nicht der Norm entsprechen weicht das Testfeuer von der Norm ab.

Durchführung	1	2	3	4	5	6	7	8
Restfeuchte [%]	0	0	0	0	0	0	0	0
Restfeuchte ≤ 5 % ?	<input checked="" type="checkbox"/>							

- h) Stelle sicher, dass die Luke in der Decke des Prüfvolumens geschlossen ist.

Hinweis: Sollte das Schließen der Luke zu Testbeginn vergessen worden sein, so muss der Test abgebrochen und wiederholt werden.

- i) Stelle sicher, dass das Fenster zur Einsicht des Prüfvolumens abgehängt ist um Fremdlichteinstrahlung zu vermeiden.
- j) Stelle sicher, dass die Heizplatte auf die höchste Stufe eingeschaltet ist und ihre Maximaltemperatur erreicht hat.
- k) Stelle sicher, dass eine mit Wasser gefüllte Wanne neben der Heizplatte bereitgestellt ist.
- l) Verteile die Buchenstäbe nach DIN EN 54-20 Anhang B, auf der Heizplatte. Stelle beim Aufsteigen der ersten Rauchfahne den Schalter zur Signalisierung des Testfeuerstarts auf „EIN“.
- m) Stelle sicher, dass das Schaltersignal auf der Discrete-Benutzeroberfläche der Software Bus Inspector Pro eingegangen ist.

Hinweis: Sollte das Signal nicht auf der Discrete-Benutzeroberfläche der Software Bus Inspector Pro eingegangen sein, so muss der Test abgebrochen und wiederholt werden.

- n) Schließe die Tür des Prüfvolumens.

- o) Stelle sicher, dass die Alarmsignale aller Rauchmelder auf der Discrete-Benutzeroberfläche der Software Bus Inspector Pro eingegangen sind. Der Test wird nach sechs (6) Minuten abgebrochen. Dokumentiere die Ansprechzeiten.

Versuchsdurchführung	Ansprechzeit [s]				
	■	■	■	■	■
1	■	■	■	-	-
2	■	■	■	-	-
3	■	■	■	-	-
4	■	■	■	-	-
5	■	■	■	-	-
6	■	■	■	-	-
7	■	■	■	-	-
8	■	■	■	-	-

- p) Stelle den Schalter zur Signalisierung des Testfeuerstarts auf „AUS“.
- q) Stoppe die Bildschirmaufnahme der Software OBS Studio. Stelle sicher, dass die Daten gespeichert sind.
- r) Stoppe die Aufnahme der Software ■■■■■. Stelle sicher, dass die Daten gespeichert sind.
- s) Stoppe die Aufnahme der Kamera im Prüfvolumen. Stelle sicher, dass die Daten gespeichert sind.
- t) Öffne die Luke und warte 30 Sekunden.
- u) Betrete das Prüfvolumen und lege die Buchenstäbe mit einer geeigneten Zange von der Heizplatte in die bereitstehende mit Wasser gefüllte Wanne.

4.3 Testprozedur - Testfeuer 5A – Reduzierter offener Flüssigkeitsbrand

- a) Stelle sicher, dass das Prüfvolumen rauchfrei ist.
- b) Stelle sicher, dass alle Melder zurückgesetzt, betriebsbereit und störungsfrei sind.
- c) Starte die Aufnahme der Kamera im Prüfvolumen.
- d) Starte die Aufnahme des Kamerabrandmelders [REDACTED].
- e) Starte die Überwachung der Rauchkonzentration durch die Software [REDACTED] des Rauchmelders [REDACTED].
- f) Starte die Aufnahme der Discrete-Benutzeroberfläche der Software Bus Inspector Pro durch das Bildschirmaufnahmeprogramm OBS Studio.
- g) Fülle die kleine Stahlwanne mit 200 g Heptan.
- h) Stelle sicher, dass die Luke in der Decke des Prüfvolumens geschlossen ist.

Hinweis: Sollte das Schließen der Luke zu Testbeginn vergessen worden sein, so muss der Test abgebrochen und wiederholt werden.

- i) Stelle sicher, dass die Stahlplatte zur Erstickung des Brands neben dem Brandherd bereitliegt.
- j) Stelle sicher, dass das Fenster zur Einsicht des Prüfvolumens abgehängt ist um Fremdlichteinstrahlung zu vermeiden.
- k) Entzünde die Flüssigkeit durch ein brennendes Streichholz mit einer langen Zange. Stelle sicher, Bei Entzündung der Flüssigkeit stelle den Schalter zur Signalisierung des Testfeuerstarts auf „EIN“.
- l) Stelle sicher, dass das Schaltersignal zur Signalisierung des Testfeuerstarts auf der Discrete-Benutzeroberfläche der Software Bus Inspector Pro eingegangen ist.

Hinweis: Sollte das Signal nicht auf der Discrete-Benutzeroberfläche der Software Bus Inspector Pro eingegangen sein, so muss der Test abgebrochen und wiederholt werden.

- m) Schließe die Tür des Prüfvolumens.
- n) Stelle sicher, dass die Alarmsignale aller Rauchmelder auf der Discrete-Benutzeroberfläche der Software Bus Inspector Pro eingegangen sind. Der Test wird nach zehn (10) Minuten abgebrochen. Dokumentiere die Ansprechzeiten.

	Ansprechzeit [s]				
Versuchsdurchführung	[REDACTED]	[REDACTED]	[REDACTED]	[REDACTED]	[REDACTED]
1	[REDACTED]	[REDACTED]	-	-	[REDACTED]
2	[REDACTED]	[REDACTED]	-	-	[REDACTED]
3	[REDACTED]	[REDACTED]	-	-	[REDACTED]
4	[REDACTED]	[REDACTED]	-	-	-
5	[REDACTED]	[REDACTED]	-	-	[REDACTED]
6	[REDACTED]	[REDACTED]	-	-	-
7	[REDACTED]	[REDACTED]	-	-	-
8	[REDACTED]	[REDACTED]	-	-	[REDACTED]

- o) Stelle den Schalter zur Signalisierung des Testfeuerstarts auf „AUS“.
- p) Stoppe die Bildschirmaufnahme der Software OBS Studio. Stelle sicher, dass die Daten gespeichert sind.
- q) Stoppe die Aufnahme der Software [REDACTED]. Stelle sicher, dass die Daten gespeichert sind.
- r) Stoppe die Aufnahme der Kamera im Prüfvolumen. Stelle sicher, dass die Daten gespeichert sind.
- s) Öffne die Luke und warte 30 Sekunden.
- t) Betrete das Prüfvolumen und lege die Stahlplatte mit einer geeigneten Zange auf die Stahlwanne um das Feuer zu ersticken.

5. Ergebnisse

Die Ansprechzeiten der vier Brandmelder wurden für jede Testdurchführung dokumentiert.

Für den Kamerabrandmelder konnten keine Ansprechzeiten dokumentiert werden, da er weder den Pyrolyseschmelbrand noch den reduzierten offenen Flüssigkeitsbrand unter den gegebenen Bedingungen detektiert hat.

Für den Rauchmelder [REDACTED] konnten keine Ansprechzeiten für den reduzierten offenen Flüssigkeitsbrand dokumentiert werden, da er diesen Brand unter den gegebenen Bedingungen nicht detektiert hat.

6. Fazit

Der Test wurde erfolgreich durchgeführt und die dokumentierten Messergebnisse sind auswertbar.

Im Original datiert und unterzeichnet.



Erklärung zur selbstständigen Bearbeitung einer Abschlussarbeit

Gemäß der Allgemeinen Prüfungs- und Studienordnung ist zusammen mit der Abschlussarbeit eine schriftliche Erklärung abzugeben, in der der Studierende bestätigt, dass die Abschlussarbeit „– bei einer Gruppenarbeit die entsprechend gekennzeichneten Teile der Arbeit [(§ 18 Abs. 1 APSO-TI-BM bzw. § 21 Abs. 1 APSO-INGI)] – ohne fremde Hilfe selbstständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt wurden. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich zu machen.“

Quelle: § 16 Abs. 5 APSO-TI-BM bzw. § 15 Abs. 6 APSO-INGI

Dieses Blatt, mit der folgenden Erklärung, ist nach Fertigstellung der Abschlussarbeit durch den Studierenden auszufüllen und jeweils mit Originalunterschrift als letztes Blatt in das Prüfungsexemplar der Abschlussarbeit einzubinden.

Eine unrichtig abgegebene Erklärung kann -auch nachträglich- zur Ungültigkeit des Studienabschlusses führen.

Erklärung zur selbstständigen Bearbeitung der Arbeit

Hiermit versichere ich,

Name: Rohlfs

Vorname: Larissa

dass ich die vorliegende Masterarbeit bzw. bei einer Gruppenarbeit die entsprechend gekennzeichneten Teile der Arbeit – mit dem Thema:

Optimierte Rauchererkennung im Frachtraum von Flugzeugen

ohne fremde Hilfe selbstständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich gemacht.

- die folgende Aussage ist bei Gruppenarbeiten auszufüllen und entfällt bei Einzelarbeiten -

Die Kennzeichnung der von mir erstellten und verantworteten Teile der -bitte auswählen- ist erfolgt durch:

Hamburg

Ort

02.08.2018

Datum

Unterschrift im Original