

GAS- UND WASSERNEBEL-FEUERLÖSCHUNG IN FLUGZEUG-FRACHTRÄUMEN

A. Hopfe, D. Rist

Apparatebau Gauting GmbH
Ammerseestr. 45-49, 82131 Gauting

KURZFASSUNG

Bereits seit 15 Jahren wird intensiv nach einer umweltfreundlichen Alternative zum Löschmittel Halon 1301 für Flugzeug-Frachträume gesucht. Die FAA hat zahlreiche Ersatzstoffe untersucht und ausschließlich die Kombination von Stickstoff und Wasserdampf positiv bewertet.

Die Löschwirkung eines Zwei-Phasen-Löschsystems, das eine geringe Komplexität mit sehr guten Kühl- und Löscheigenschaften kombiniert, wurde durch Variation verschiedener Parameter systematisch untersucht und mit Ergebnissen aus fast 100 Realbrandversuchen verglichen.

Mit Hilfe eines komplexen Computermodells werden die Stoff- und Energiebilanz des Feuers, der Verbrauch von Sauerstoff sowie die Löschung mit abregnenden und verdampfenden Wasserdampftropfen abgebildet. Dabei werden die Belüftung des Frachtraumes und Druckänderungen der Umgebungsluft im Flug berücksichtigt. Das Modell wurde mit den Lösversuchen abgeglichen und kann auf die Situation im Flugzeug angewandt werden.

Das Ergebnis ist ein Systemvorschlag, der reproduzierbar sichere Löschergebnisse bei relativ geringem Wassereinsatz und gleichzeitig niedrigem Systemgewicht liefert.

1 EINLEITUNG

1.1 Motivation

Für die Brandlöschung in den Frachträumen von Passagierflugzeugen wird das gasförmige Löschmittel Halon 1301 (Bromtrifluormethan, CBrF_3) verwendet.

Nach dem IPCC-Protokoll [1] wird Halon 1301 als ein äußerst klimaschädliches Gas eingestuft. Es wird in der Atmosphäre nur sehr langsam abgebaut und zerstört die Ozonschicht. Außerdem trägt es in hohem Maße zur Klimaerwärmung bei. Gemäß Montreal-Protokoll [2] darf Halon daher seit dem ersten Januar 1994 nicht mehr als Löschmittel hergestellt werden. Trotz großer werdender Probleme bei der Beschaffung von Halon wurde jedoch bisher keine Alternative für die Löschung in Flugzeug-Frachträumen qualifiziert.

Die FAA hat aufgrund von Versuchen mit Halon ein Anforderungsprofil für Ersatzstoffe erstellt [3]. Vier Brandszenarien müssen zuverlässig und unter Einhaltung von Temperatur- und Druckkriterien gelöscht werden:

- ein Kartonstapel-Brand,
- ein Frachtcontainer-Brand,
- ein offener Flüssigkeitsbrand,
- ein Brand während des Entlüftens einer Sprayflasche.

Beim zuletzt genannten Versuch muss das Löschsystem

eine Durchzündung des freigesetzten Propan-Butan-Ethanol-Gemisches verhindern. Kein alternatives chemisches Löschmittel hat bisher diesen sogenannten Can-Explosion-Test bestanden, da es stets zu einem Druckanstieg kam.

Die Kombination von kühlendem Wasserdampf in Verbindung mit einer Sauerstoffverarmung durch eingedüsten Stickstoff besteht als einziges Löschmittel alle vier Tests.

Ziel ist dabei nicht in jedem Fall das vollständige Löschen, sondern eine sichere Unterdrückung des Brands bis zur Landung und zum Eingreifen der Flughafenfeuerwehr.

1.2 Löschwirkung von Halonen, Wasserdampf und Stickstoff

Feuer ist eine exotherme chemische Oxidationsreaktion und benötigt vier Randbedingungen:

- das Vorhandensein von Brennstoff,
- eine hinreichende Luftsauerstoffkonzentration,
- genügend Wärme als Aktivierungsenergie der chemischen Reaktionen,
- sowie das Vorhandensein von hochreaktiven Verbrennungszwischenprodukten.

Bei Flüssigkeits- und Feststoffbränden muss zudem der Brennstoff mithilfe der Umgebungs- bzw. Verbrennungswärme vergast werden, um mit dem Luftsauerstoff reagieren zu können.

Die Löschwirkung von Halonen beruht darauf, hochreaktive Zwischenprodukte der Verbrennung zu binden. Dadurch wird die chemische Reaktionskette des Feuers unterbrochen. Eine geringe Kühlwirkung wird zudem durch die Expansion des Löschgases aus dem Gasbehälter erzielt.

Die Löschwirkung von Wassernebel beruht darauf dem Brand Wärme zu entziehen. Zum einen kostet das Erwärmen des Wassers viel Energie, zum anderen werden Wassertropfen sehr energieaufwändig verdampft. Mit abnehmender Tröpfchengröße steigt die Oberfläche des Wassers, wodurch beide Prozesse beschleunigt werden. Die Verdampfung ist dabei nur möglich, solange der Sättigungsdampfdruck des Wassers noch nicht erreicht wurde.

Stickstoff wird zur Verdrängung des Luftsauerstoffes genutzt. Durch das Entspannen des Stickstoffs aus Hochdruckbehältern wird außerdem eine nicht unerhebliche Kühlwirkung erzielt.

1.3 Klassifizierung von Wassernebelssystemen

Wassernebelssysteme werden nach ihrer Funktionsweise unterteilt in Hochdrucksysteme (Betriebsdruck größer als 60 bar) und Niederdrucksysteme (Betriebsdruck kleiner als 30 bar). Für die Anwendung im Flugzeug sind Niederdrucksysteme von Vorteil, weil die Rohre und Armaturen weniger mechanisch belastet werden und daher leichter ausgelegt werden können. Weiterhin wird zwischen Einstoff- und Zweistoff-Düsen unterschieden. Bei Einstoffdüsen sind komplizierte Mechanismen nötig, um aus Wasser feine Tropfen zu generieren. Das wird beispielsweise mit Ultraschallresonatoren realisiert. Zweistoffdüsen nutzen einen Gasstrom zum Zerstäuben des Wassers. Dafür wird entweder mit zwei Rohrleitungen Gas und Wasser zur Düse transportiert und dort gemischt, oder es wird ein Gemisch beider Medien in einer Rohrleitung transportiert.

2 SYSTEMVORSCHLAG

Das vorgestellte System (Bild 1) ist ein Niederdrucksystem mit der Besonderheit, dass die Zweistoffdüsen mit einem Zweiphasengemisch in einer Rohrleitung gespeist werden. Durch diesen Aufbau kann Systemgewicht gespart werden, da eine zusätzliche Leitung entfällt.

Das System kombiniert ein Wassernebel-Subsystem mit einem System zur Eindüsung von Stickstoff. Der Druck aus den mit Ventilen verschlossenen Stickstoffflaschen wird im Betriebsfall mithilfe eines Druckminderers auf 20 bar begrenzt. Das Wassernebelssystem nutzt Drosseln, um Wasser und Stickstoff definiert zu einem zweiphasigen Fluid (hellblau) zu mischen. Über Rohrleitungen und Ventile wird das Gemisch zum ausgewählten Frachtraum geleitet und dort eingedüst.

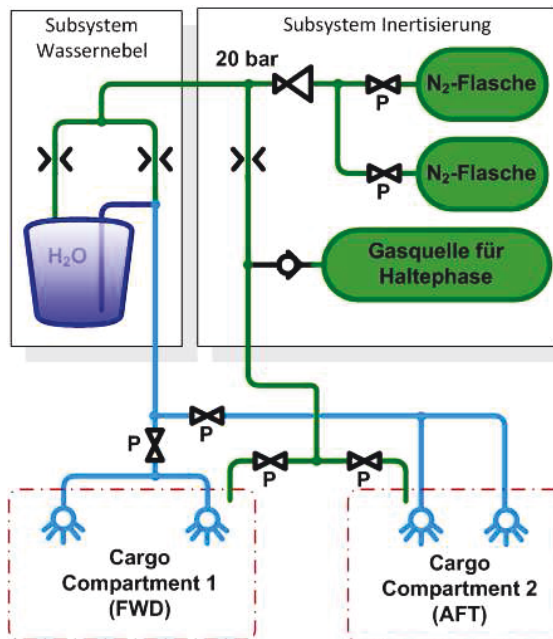


BILD 1. Systemskizze

Zusätzlich wird Stickstoff durch das in Bild 1 grün gezeichnete Leitungssystem in den Frachtraum eingebracht. In den ersten fünf Minuten der Löschung wird der Sauerstoffgehalt im Compartment auf etwa 12 Vol.-% abgesenkt. In dieser Zeit wird der Wassernebel ebenfalls eingebracht.

In der sich anschließenden Haltephase wird der Sauerstoffgehalt auf diesem Niveau gehalten, d.h. die Leckage des Flugzeuges muss ausgeglichen werden. Der dazu nötige Stickstoff kann mithilfe von OBIGGS (OnBoard Gas Generation Systems), Brennstoffzellenabgas, weiteren Gasflaschen oder Gasgeneratoren bereitgestellt werden.

Die Haltephase erstreckt sich bis zur Evakuierung des Flugzeuges und zum endgültigen Löschen des Brandes durch die Flughafenfeuerwehr.

3 OPTIMIERUNGSPARAMETER

Grundsätzlich gibt es für die Systemauslegung zahlreiche Freiheitsgrade. Diese werden genutzt, um ein geringes Systemgewicht mit einer sicheren Löschwirkung zu verbinden.

Für das Wassernebelssystem kann die Gesamtmenge des Wassers variiert werden. Hier ist der Zusammenhang mit dem Systemgewicht unmittelbar gegeben. Auf die Kühlwirkung haben die Dauer und die Dichte der Vernebelung einen Einfluss.

Das Tröpfchengrößenspektrum wird ebenfalls eingestellt. Große schwere Tropfen können tiefer in die Flamme eindringen und effektiv löschen, sie fallen jedoch sehr schnell zu Boden und werden inaktiv. Kleine leichte

Tropfen verdampfen wegen ihrer vergleichsweise großen Oberfläche schnell und kühlen daher den Frachtraum sehr gut. Sie bleiben länger schwebend in der Luft und tragen damit zur Löschung bei. Außerdem können sie durch Luftbewegungen auch zu versteckten Bränden transportiert werden.

Auch das Geschwindigkeitsspektrum der Tropfen kann variiert werden. Mit höheren Geschwindigkeiten geht ein großer Sprühdurchmesser der Düsen einher. Jedoch wird dann auch die Luft im Frachtraum stärker umgewälzt, was für die Verbrennung förderlich ist. Deswegen sind auch die Anzahl und der Ort der Löschdüsen zwei weitere zu optimierende Größen, die zudem Einfluss auf das Systemgewicht haben.

Die Stickstoffmenge wird zunächst durch die vorgegebene Sauerstoff-Zielkonzentration bestimmt. Um die Sauerstoffkonzentration über längere Zeit im vorgegebenen Bereich zu halten, muss die variierte Leckage des Frachtraumes durch zusätzlichen Stickstoff oder durch andere Inertgasquellen ausgeglichen werden.

4 REALBRANDVERSUCHE

4.1 Testszenerien

Von der FAA wurden vier Testszenerien für Realbrandversuche definiert, wobei die Geometrie des Versuchsraumes an Unterflur-Frachträume von Wide-Body-Flugzeugen angelehnt ist.

Als Instrumentierung sind Temperatursensoren an den Wänden und der Decke des Frachtraumes vorgesehen. Ein Löschsystem besteht die ersten drei Tests, wenn die Spitzentemperaturen nach der Löschung maximal so hoch sind wie bei den Halon-Versuchen der FAA. Neben den Obergrenzen für die Temperatur wird außerdem gefordert, die Temperaturverläufe über der Zeit zu integrieren. Das dazugehörige Akzeptanz-Kriterium besagt, dass die Temperatur-Zeit-Integrale dauerhaft niedriger oder gleich hoch sein müssen als bei einer Löschung mit Halon.

Für das sog. „Bulk Load Fire“ werden 178 Kartons mit Papierwolle gefüllt und dicht an dicht gestapelt. Das Feuer wird mittels eines Heizdrahtes in einem eigens dafür präparierten Karton gezündet.

Das so genannte „Containerized-Load“ - Szenario bildet den Brand eines Frachtcontainers ab. Ein LD3-Frachtcontainer wird mit Kartons befüllt, die wiederum Papierwolle enthalten. Ein präparierter Karton wird mit einem Heizdraht gezündet. Neben dem brennenden Container werden weitere Container platziert.

Für das Wasserebel-Löschsystem ist dieser Brand eine Herausforderung, weil der Brandherd für Wasserebel schlecht zugänglich ist. Die Belüftungsschlitze befinden sich im unteren Bereich des Containers, der Wasserebel wird im Allgemeinen jedoch an der Frachtraumdecke

eingedüst. Außerdem ist der Abstand zwischen Container und Frachtraumdecke mit 5 cm sehr schmal und erlaubt nur eine schleppende Ausbreitung des Wasserebels.

Beim sog. „Surface Burning Test“ wird ein Flüssigkeitsbrand gelöscht. Dazu wird eine 60x60 cm große Schale mit Wasser, Kerosin und einer kleinen Menge Benzin gezündet.

Mit dem sog. „Aerosol Can Explosion“ - Szenario wird der Vorgang in der Umgebung einer Sprayflasche simuliert, die durch einen Brand beschädigt wurde und explosionsartig ihren Inhalt abgibt. Das Vorhandensein von Glutresten wird mithilfe eines Zündfunktens simuliert. Zum Bestehen dieses Tests muss das Löschmittel eine Explosion des Gemisches aus Propan, Ethanol und Wasser vollständig verhindern.

4.2 Testaufbau

Zur Beurteilung der Eignung der gewählten Systemkonfigurationen wurden seit 2010 über 100 Brandversuche durchgeführt. Dazu wurde aus zwei Seefrachtcontainern ein Versuchsraum gebaut, dessen Volumen und Deckenhöhe die FAA-Vorschrift erfüllen. 32 Temperatursensoren wurden an der Decke und an den Wänden installiert. Hinzu kamen mobile Temperatursensoren zur Überwachung des Brandherdes und der Systemkomponenten. Drucksensoren im Testraum und am Löschsystem sowie Rauchwarngeräte vervollständigten die Instrumentierung. Alle Daten werden in einem Messrechner zusammengeführt.



BILD 2. Frachtcontainer im Teststand. Zu beachten ist der geringe Abstand zwischen Container und abgehängter Decke.

Der Containerbrand stellt für die Löschung die größte Herausforderung dar. Die Löschdüse sprüht dabei in einen 5 cm hohen Spalt zwischen Decke und Container. Je nach Sprühwinkel kommt es durch den Bernoulli-Effekt zu einer Ansaugung der Wassertropfen an die Decke, oder zu einem Abregnen auf den Container. Durch geeignete Wassertropfen mit angepasster Geschwindigkeit können beide Effekte minimiert werden. Auch die Geometrie der Vertiefung, in der sich die Düse befindet, spielt dabei eine wichtige Rolle und wurde optimiert.

4.3 Variation der Wassermenge

Die ersten Versuche wurden mit 40 l Wasser, 35 kg Stickstoff und neun Düsen durchgeführt. Die dabei gemessenen Temperaturen liegen weit unter den Werten, die beim Einsatz des Halon-Löschsystems erzielt werden. Bei späteren Versuchen kamen daher nur noch drei Düsen mit hohem Aktionsradius zum Einsatz.

Die Wassermenge wurde schrittweise heruntergefahren, wobei bis zu 16 l Wasserverbrauch kein signifikanter Unterschied zwischen den Versuchsergebnissen zu erkennen war. Mit noch weniger Wassereinsatz stiegen die Spitzentemperaturen langsam an, blieben aber weit unter den Referenzwerten von Halon. Bei einer Wassermenge unter 7 l gibt es einen Umschlagpunkt: Die Temperaturen werden nicht mehr nachhaltig gesenkt, besonders beim Frachtcontainerbrand nähert sich das Integral der Temperatur dem durch Halon definierten Grenzwert. Bild 3 und 5 zeigen exemplarisch den Temperaturverlauf einzelner Sensoren und die Integration der Temperatur für einen Löschversuch mit 15 l Wasser und Inertisierung. Dargestellt sind die Messwerte einzelner Sensoren an Decke und Wand. In Bild 4 ist der Temperaturmittelwert an der Decke und an der Wand abgebildet.

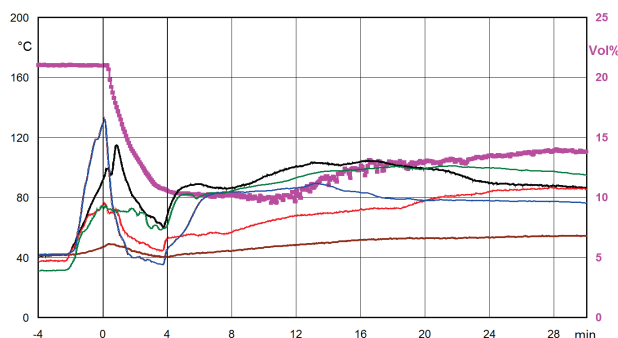


BILD 3. Sauerstoffkonzentration (magenta) und Temperaturverlauf verschiedener Sensoren beim Frachtcontainerbrand.

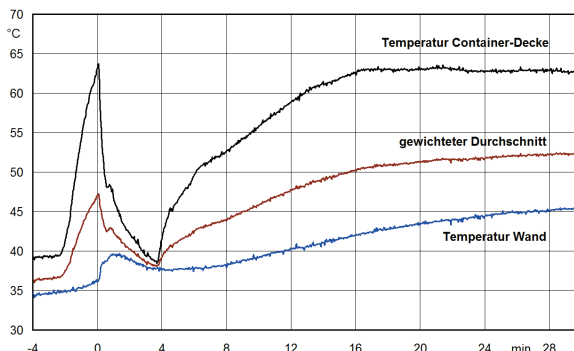


Bild 4. Gemittelte Temperaturwerte beim Frachtcontainer-Brand. 16 Decken- und 16 Wandensensoren.

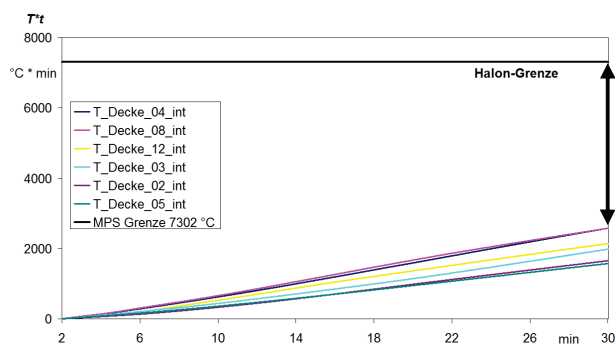


BILD 5. Temperatur-Zeit-Integrale beim Frachtcontainer-Brand bei Löschung mit Wassernebel und Stickstoffeindüsung. Der Vergleichswert bei der Löschung mit Halon 1301 ist schwarz gekennzeichnet.

Beim Flüssigkeitsbrand ist die Situation weniger kritisch: durch die schnelle Verbrennung wird sehr viel Sauerstoff verbraucht, sodass eine Minute nach Start des Löschsystems das Feuer bereits erstickt ist. Der Frachtraum kann in diesem Szenario auch mit sechs Litern Wasser in wenigen Minuten auf unter 100 °C gekühlt werden.

4.4 Variation der Stickstoffmenge

Weil Stickstoff im vorgestellten System in Hochdruckbehältern vorgehalten werden muss, haben Stickstoffmenge und -druck eine große Auswirkung auf Größe und Gewicht des Löschsystems. Deswegen wurde versucht, die eingesetzte Stickstoffmenge zu reduzieren. Dabei zeigte sich, dass der Einsatz von 25 kg Stickstoff eine sichere Unterdrückung des Brands ermöglicht. Das entspricht im 57 m³ großen Frachtraum bei Normaldruck der Absenkung des Sauerstoff-Volumenanteils von 20,9 Prozent auf 14 Prozent. Nach dem Modell von Wighus [4] ist das im gemessenen Temperaturbereich von maximal 200 °C Raumtemperatur die Obergrenze, um ein Feuer sicher zu löschen.

Versuche mit einem höheren Sauerstoff-Anteil zeigten, dass eine Unterdrückung des Brandes nicht in jedem Fall sichergestellt werden kann. Besonders bei verdeckten Glutnestern kommt es nach dem Ende der Wasservernebelung zum unkontrollierten Wiederauf-flammen des Feuers.

Versuche mit mehr als 25 kg eingedüstem Stickstoff führen nicht zu signifikanten Veränderungen der Temperaturverläufe.

5 SIMULATION

5.1 Zonen-Modelle

In der Literatur wird für die Simulation von Feuer und Feuerunterdrückung in Räumen zwischen ortsauflösenden Finite-Elemente-Modellen einerseits und vereinfachten Zonen-Modellen andererseits unterschieden.

Zonenmodelle beschreiben dabei die Zustände in zwei Luftschichten („oben“ und „unten“) gesondert. Verbrennungsabgase und der Energieeintrag des Feuers werden der oberen Zone zugeordnet. Weiterhin kann eine dritte Zone den Sprühkonus einer Löschdüse definieren [5]. Zustands- und Erhaltungsgleichungen werden für jede Zone aufgestellt und ausgewertet. Zwischen den Zonen findet, getrieben durch die Verbrennung, ein Stoff- und Wärmeaustausch statt.

Einfacher wird die Situation, wenn von einem gut durchmischten Raum ausgegangen werden kann. Der Raum wird als eine thermodynamische Zone aufgefasst, in der die Zustandsvariablen ortsunabhängig sind. Wegen der guten Durchmischung der Luft beim Eindüsen des Wassernebels ist dieses Modell für drei der Testfeuer gut anwendbar. Beim Containerbrand wäre hingegen ein Modell besser, welches den Frachtcontainer als separate Zone auffasst. Daraus wären Aussagen über den zeitlichen thermodynamischen Zustand im Frachtcontainer zu gewinnen, was jedoch nicht Ziel dieser Arbeit war.

Für die Berechnung der interessierenden thermodynamischen und strömungsmechanischen Größen beim Brand- und Löschvorgang in Flugzeug-frachträumen wurde bei der Apparatebau Gauting GmbH ein Ein-Zonen-Modell entwickelt, in dem alle wesentlichen Einflussgrößen und –Parameter enthalten sind. Diese sind in den Schemazeichnungen in Bild 6 und Bild 7 als Grundlage der Erhaltungsgrößen von Masse und Energie dargestellt. Die Vollkreise bedeuten positive und die Hohlkreise bedeuten negative Beiträge der bezeichneten Größen im Frachtraum; die Pfeilrichtung der anderen Größen bedeutet Zufuhr von außen bzw. Abgabe nach außen.

Prinzipiell ähnliche Schemaskizzen für vergleichbare Berechnungen sind in anderen Veröffentlichungen zu finden, z.B. in [6] und [8].

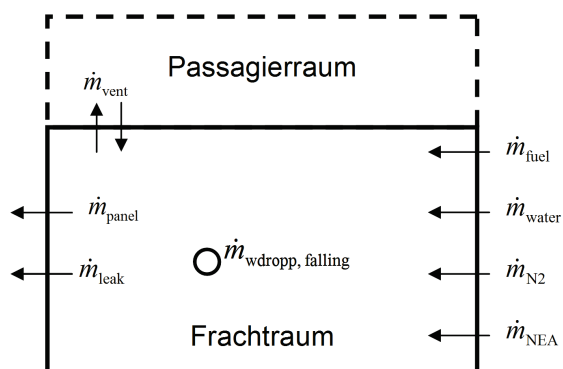


BILD 6. Massen-Erhaltung des feuchten Gases im Frachtraum bei der Simulation eines Brandes und der anschließenden Löschung.

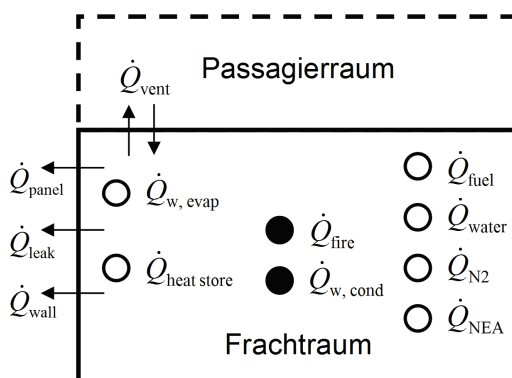


BILD 7. Energie-Erhaltung des feuchten Gases im Frachtraum.

5.2 Änderung von Druck, Temperatur und Masse im Frachtraum.

Mittels eines Programmsystems auf Grundlage des erstellten Simulationsmodells wurden verschiedene Brand- und Löschvorgänge im vereinfacht modellierten Frachtraum eines Flugzeuges als Beispiele berechnet. Für die Eingaben zahlreicher geometrischer, thermodynamischer und sonstiger Größen wurden realitätsnahe Werte gewählt. Der Parameter Brennstoff mit seinen Charakteristiken (Zusammensetzung, Heizwert, andere physikalische Eigenschaften) wurde speziell variiert. In den als Beispielergebnisse – mit dem Brennstoff Heptan – dargestellten Diagrammen von Bild 8 und Bild 9 sind die zeitlichen Verläufe von Druck, Temperaturen und Massenströmen angegeben.

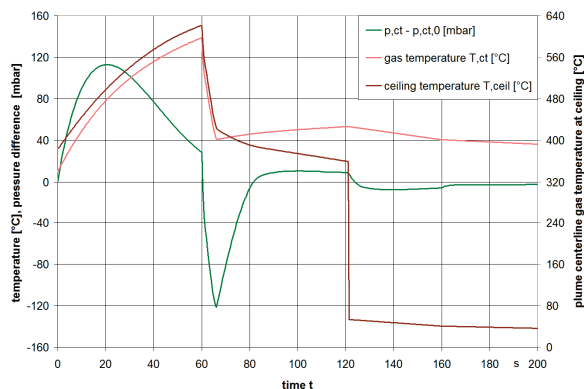


BILD 8. Flugzeug-Frachtraum: Berechnete Temperatur- und Druckänderungen bei einem Brand und anschließender Aktivierung der Wasserebel- und der Stickstoffflöschung.

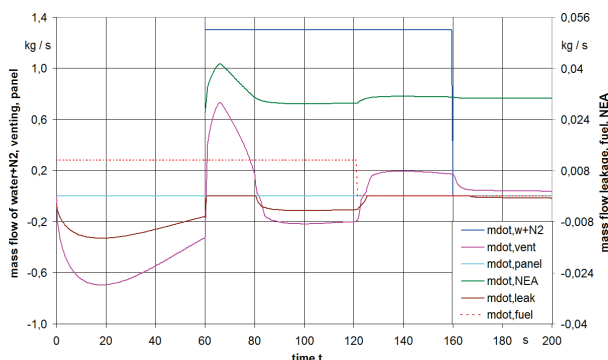


BILD 9. Flugzeug-Frachtraum: Berechnete Massenströme bei einem Brand und anschließender Brandlöschung.

In diesem Simulationsbeispiel wird 60 Sekunden nach Feuerausbruch das Wasserebelssystem aktiviert. Dem Wasserebel ist bereits Stickstoff beigemischt. Diese Eindüsung dauert bis zur 160. Sekunde, also 100 Sekunden lang. Ebenfalls ab der 60. Sekunde wird die Eindüsung des hauptsächlich aus Stickstoff bestehenden Mischgases NEA (97% Nitrogen Enriched Air) aktiviert, die hier bis zum Berechnungsende (200 Sekunden) und praktisch bis zur Flugzeuglandung stattfindet. Das Inertgas NEA dient zur Unterstützung der Brandlöschung, die hier vollständig etwa 61 Sekunden nach Beginn der Eindüsung erreicht wird.

Flugzeuge sind mit Druckausgleichsventilen ausgerüstet, um den Innendruck einigermaßen zu halten [8]. Hinweise darauf, ob und wann solche Komponenten zur Abblasung nach außen oder Einblasung aus dem Passagierraum aktiviert werden sollten, können aus dem dargestellten positiven bzw. negativen Druckdifferenzen im Vergleich zum Zustand vor dem Brand gewonnen werden.

5.3 Simulation des Wasserebels

Der bestimmende Faktor für die Kühlwirkung des Wasserebels ist seine Oberfläche und daher die Tröpfchengröße. Dieser Parameter wurde experimentell mit einem Phasen-Doppler-Anemometer bestimmt. Die genaue Verteilung ist vom horizontalen und vertikalen Abstand der Messung zur Düse abhängig.

Nach [6] wird berechnet, wie lange die Tropfen von der Düse an der Decke bis auf den Boden des Compartments fallen. Statt der vollen Raumhöhe kann auch eine durchschnittliche vertikale Wegstrecke angegeben werden. Solange das Tröpfchen in der Luft ist, verdampft es (bis zur Sättigungsgrenze) und trägt zur Wärmebilanz bei. Der zeitliche Verlauf der Wassertröpfchenverdampfung wurde näherungsweise nach [7] berechnet.

Wegen der sinkenden Temperatur im Frachtraum nach Löschung des Brands ändert sich die Wasserdampf-Sättigungsgrenze, wodurch ein Teil des Wasserdampfes kondensiert und wieder zu Wasserebel wird.

Energetisch bedeutet die Wasserverdampfung im Frachtraum einen wesentlichen Wärmeentzug und die Kondensation eine messbare Wärmezufuhr.

5.4 Verbrennung und Gasspezies-Konzentrationen

Zur Abbildung der Thermodynamik im Frachtraum werden zunächst die zeitlichen Energiebeiträge als Parameter vorgegeben. Entweder handelt es sich wie in Bild 10 um einen zeitlich veränderlichen Energieeintrag, oder um einen konstanten Energieeintrag über eine vorgegebene Zeit.

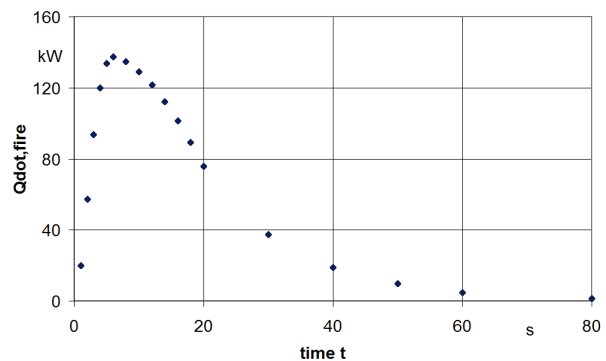


BILD 10. Simulation der zeitlich veränderlichen Energiezufuhr in einen Brandraum durch eine Verbrennung.

Zur rechnerischen Ermittlung des Zeitpunkts der vollständigen Brandlöschung sind zwei Löschkriterien implementiert. Sind beide erfüllt, wird in der Simulation der Energieeintrag des Feuers auf Null gesetzt. Gleiches gilt für die (fiktive) Brennstoffzufuhr und die Gasspezies-Konzentrations-Beiträge der Verbrennungsprodukte.

Das erste Kriterium entstand auf der Basis zahlreicher Experimente [4]. Es stellt einen empirischen Zusammenhang zwischen Temperatur, Sauerstoffkonzentration und der Löschung von offenen Feuern mit Wasserdampf her. Abhängig von der Temperatur wird eine Untergrenze für die Sauerstoffkonzentration ermittelt, bei der ein Feuer erlischt.

Das zweite Kriterium wurde zuerst in [9] definiert. Das „Spray Heat Absorption Ratio“ (SHAR) stellt die Kühlwirkung des Wasserdampfes mit der Heizleistung des Feuers in den Zusammenhang:

$$SHAR = \frac{|\dot{Q}_{water}|}{\dot{Q}_{fire}} = \frac{|\dot{Q}_{water, liqu}| + |\dot{Q}_{water, vap}|}{\dot{Q}_{fire}} \quad (1)$$

Verschiedene Autoren geben die Minimalwerte beim Erlöschen des Feuers an. Diese liegen bei 0,6 bis 0,8 [9], [10], [11].

Zur Ermittlung der Gasspezies-Konzentrationen und ihrer Änderungen durch die Verbrennung, Brandlöschung zu- und abfließenden Massenströmen wie auch Wasserverdampfung und Kondensation im Frachtraum wurde – mit Kenntnis der Zusammensetzung des Brennstoffs – eine Verbrennungsrechnung in das Simulationsmodell mit aufgenommen.

Für das vorgestellte Demonstrationsbeispiel sind im Bild 11 die zeitlichen Verläufe der Volumenkonzentrationen von Sauerstoff, Kohlendioxid, Stickstoff und Wasserdampf sowie die relative Feuchtigkeit dargestellt.

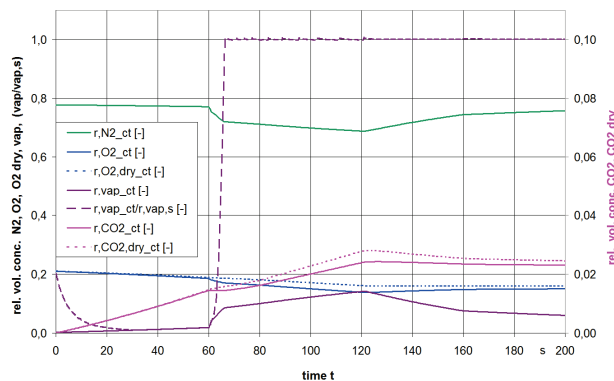


BILD 11. Flugzeug-Frachtraum: Berechnete Volumenkonzentration der Gasspezies bei einem Brand und anschließender Löschung.

Man erkennt den Abfall der realen Sauerstoffkonzentration bis auf 13,8 Vol.-% nach 121 Sekunden. Unter Berücksichtigung der Temperatur des in die Feuerzone eindringenden Gases ist das der Grenzwert nach [4] zum Erlöschen des Feuers. Anschließend kommt es zu einem leichten Wiederanstieg der Sauerstoffkonzentration bei sinkender mittlerer Frachtraum-Temperatur (vgl. Bild 8). In Bild 8 wird auch

die Temperatur an der Frachtraumdecke direkt über dem Feuer angegeben, die sich näherungsweise mit Formeln aus [11] und wesentlichen Parametern der Feuerquelle (Grundfläche, Verbrennungswirkungsgrad, Feuerleistung u.a.) berechnen lässt.

5.5 Verifizierung und Validierung der Simulationsergebnisse

Für die Überprüfung der Resultate aus der rechnerischen Simulation auf Plausibilität und quantitative Vergleiche bzw. Kontrollen wurden einerseits Auswertungen verschiedener eigener Brandversuche sowie andererseits Angaben aus der einschlägigen Fachliteratur und anderen Publikationen herangezogen.

Die beachteten und näherungsweise vergleichbaren Ergebnisse aus den Veröffentlichungen umfassen externe Versuchs- wie auch Berechnungsdaten. Diese kommen größtenteils aus Brandschutzaktivitäten in der Schifffahrt, im Anlagenbau und im Bauwesen, was eine Übertragung auf die Gegebenheiten der Luftfahrt erschwert. Eine Auswahl der für die beschriebenen Zwecke verwendeten Quellen ist im Literaturverzeichnis aufgelistet.

6 ZUSAMMENFASSUNG

In über 100 Brandversuchen wurde gezeigt, dass das untersuchte Feuerlöschsystem, bestehend aus einem Zwei-Phasen-Wasserdampf-System und einer separaten Stickstoff-Eindüsung, alle von der FAA gestellten Anforderungen zur Löschwirkung erfüllt. Es zeigte sich, dass für die Brandlöschung die Absenkung des Sauerstoffgehaltes der bestimmende Faktor ist. Der Wasserdampf wird zur Kühlung des Raumes genutzt.

Mithilfe eines Simulationsmodells, das auf die Brandlöschung im Flugzeugfrachtraum angepasst ist, werden Aussagen über den Verlauf wichtiger Größen während und nach einer Löschung im Flugzeug gewonnen. Das Verhalten des Gesamtsystems kann damit für flugrelevante Situationen vorhergesagt werden, in denen Brand- und Löschversuche nicht möglich sind.

ANERKENNUNG

Die Projekte die dieser Veröffentlichung zugrunde liegen wurden im Rahmen des Luftfahrtforschungsprogramms LuFo IV vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie gefördert.

Literaturverzeichnis

- [1] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2007): *Climate Change 2007*
- [2] J.W. Reinhardt: *Minimum Performance Standard For Aircraft Cargo Compartment Halon Replacement Fire Suppression Systems (2012 Update)* DOT/FAA/TC-TN12/11, U.S. Department of Transportation, FAA, William J. Hughes Technical Center, May 2012
- [3] Ozone Secretariat: *The Montreal protocol on substances that deplete the ozone layer*. United Nations Environment Programme, Nairobi, Kenya., Januar 1989
- [4] R. Wighus: *An empirical model for extinguishment of enclosed fires with water mist*, SINTEF Civil and Environmental Engineering Norwegian Fire Research Laboratory, May 1998
- [5] B. Yao, W.K. Chow, *Numerical modeling for compartment fire environment under a solid-cone water spray*, Applied Mathematical Modelling 30, September 2006
- [6] Y. F. Li; W. K. Chow, *A Zone Model in Simulating Water Mist Suppression on Obstructed Fire*, Heat Transfer Engineering, 27, 2006
- [7] V. Motevalli: *Effectiveness of Water Mist Droplet Size on Fire Suppression in Aircraft Cabin and Cargo Compartment*, 5th Aircraft Fire and Cabin Safety Research Conference, Oct. 29 – Nov. 1, 2007
- [8] D. E. Goldberg, P. E. Rivers: *Computational Analysis of Aircraft Cargo Compartment Pressurization and Extinguishing Agent Hold Time*, SUPDET 2008 proceedings
- [9] H. C. Kung: *Cooling of Room Fires by Sprinkler*, Journal of Heat Transfer, Vol. 99, pp. 353-359, 1977
- [9] Z. Liu, A. K. Kim: *A Review of Water Mist Fire Suppression Systems – Fundamental Studies*, Journal of Fire Protection Engineering, Vol. 10, No. 3, pp. 32-50, 2000
- [10] Y. F. Li, W. K. Chow: *Modelling of water mist fire suppression systems by a one-zone model*, Combustion Theory and Modelling, Vol. 8, No. 3, pp. 567-592, 2004
- [11] B. Karlsson, J. G. Quintiere: *Enclosure Fire Dynamics*, CRC Press, 2000