



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg  
*Hamburg University of Applied Sciences*

Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg  
Fakultät Life Sciences

# **Der Einfluss der Rauchentwicklung eines Brandes außerhalb einer Flugzeugkabine auf die Notfalleвакуierung**

Bachelorarbeit

im Studiengang  
Rettungsingenieurwesen/Rescue Engineering

vorgelegt von  
**Eike Schröter**  
**Mat.-Nr. 1956847**

Hamburg am 25. Juni 2014

**Gutachter:** Prof. Dr. Stefan Oppermann  
(Fakultät Life Sciences, Department Medizintechnik)  
Prof. Dr.-Ing. Gordon Konieczny  
(Fakultät Technik und Informatik, Department Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau)

## Erklärung

Ich versichere, dass ich meine Bachelorarbeit ohne Hilfe und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Quellen und Hilfsmittel angefertigt und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Diese Arbeit hat in gleicher oder ähnlicher Form oder auszugsweise noch keiner Prüfungsbehörde vorgelegen.

Hamburg, der 25. Juni 2014

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'E. Schröter', written in a cursive style.

Eike Schröter

## Zusammenfassung

Das Flugzeug gilt heute als eines der sichersten Verkehrsmittel. Ein Grund hierfür ist die starke Regulierung durch die Gesetzgeber und Luftfahrtbehörden. Hier sind auch Vorschriften zur Notfallevakuierung von Flugzeugen aufgestellt. Nach einer Notlandung, Notwasserung und anderen Notlagen am Boden ist oft eine Evakuierung notwendig. Für die Durchführung der Evakuierung ist die Flugzeugbesatzung verantwortlich. Sobald die Evakuierung eingeleitet wurde, öffnet die Besatzung die Notausgänge und die Notrutschen werden aufgeblasen. In einigen Flugzeugtypen werden einzelne Notausgänge auch durch Fluggäste bedient. Ein Brand außerhalb der Flugzeugkabine kann, neben einer Vielzahl anderer Gründe, eine Evakuierung erforderlich machen. Ein solcher kann beispielsweise ausgelaufener, in Brand geratener Treibstoff sein. Hier kann die Evakuierung nur auf der vom Brand nicht betroffenen Flugzeugseite erfolgen, da die Passagiere sonst in das Feuer rutschen würden oder Verbrennungsprodukte in die Kabine eindringen könnten. Durch ein Versehen einzelner Besatzungsmitglieder oder durch voreilige Fluggäste kann es dennoch passieren, dass ein Notausgang auf der vom Brand betroffenen Flugzeugseite geöffnet wird und Rauch in die Kabine einströmt. Hier stellt sich die Frage: Inwiefern können bei einem Feuer außerhalb der Flugzeugkabine durch einen fälschlicherweise geöffneten Notausgang so viele Verbrennungsprodukte in die Kabine eindringen, dass durch Toxizität, Sichtbehinderung und Wärme die vollständige Evakuierung stark behindert oder verhindert wird?

Mit dieser Frage beschäftigt sich die vorliegende Arbeit. In Anlehnung an den *Leitfaden Ingenieurmethoden des Brandschutzes* der vfdb und mit Hilfe einer Computersimulation mit Fire Dynamics Simulator wurde ermittelt, ob und wie viele Verbrennungsprodukte wie Rauch und Hitze in die Kabine eindringen.

Die Auswertung der Ergebnisse zeigte, dass ein Feuer außerhalb der Flugzeugkabine starke Auswirkungen auf die Vorgänge innerhalb der Kabine bei der Evakuierung haben kann. Wie stark sie ausfallen, ist abhängig von der Lage des Feuers gegenüber der geöffneten Tür und von Umwelteinflüssen wie Wind. In Vergleichsszenarien konnte ermittelt werden, dass die fälschlicherweise geöffnete Tür der Punkt ist, an dem die meisten Verbrennungsprodukte in das Flugzeug eindringen. Wäre die Tür nicht geöffnet worden, hätte der Brand außerhalb der Flugzeugkabine nur geringen Einfluss auf die Evakuierung im Inneren. Das Öffnen einer Tür, durch die Brandrauch eindringen kann, muss in jedem Fall vermieden werden. Dies stellt die Bedeutung der in den EU-OPS 1 expliziert geforderten Schulungsinhalte hervor, nach dem die Flugbegleiter in dem Erkennen von nicht benutzbaren Notausgängen geschult werden müssen.

# Inhalt

Erklärung.....	II
Zusammenfassung.....	III
Inhalt.....	IV
Abbildungsverzeichnis.....	VI
Tabellenverzeichnis.....	VII
Abkürzungsverzeichnis.....	VIII
Einheitenverzeichnis.....	IX
Formelzeichenverzeichnis.....	X
1 Einleitung.....	1
2 Methodische Herangehensweise.....	3
3 Die Notfalleвакуierung.....	4
3.1 Einleitung.....	4
3.2 Vorschriften.....	4
3.2.1 Zulassungsvorschriften.....	5
3.2.2 Betriebsvorschriften.....	7
3.3 Not- und Sicherheitseinrichtungen.....	9
3.3.1 Notausstiege.....	9
3.3.2 Fluchtwege.....	10
3.3.3 Notbeleuchtung.....	11
3.3.4 Notrutschen.....	11
3.4 Ablauf einer Notfalleвакуierung.....	12
4 Definition der Schutzziele, funktionalen Anforderungen und Leistungskriterien.....	14
4.1 Höhe der raucharmen Schicht.....	15
4.2 Qualität der raucharmen Schicht.....	15
4.2.1 Die optische Dichte pro Weglänge bzw. die Erkennungsweite.....	15
4.2.2 Die Auswirkungen toxischer Gase.....	17
4.3 Thermische Einwirkungen aus Wärmestrahlung und Konvektion.....	19

4.4	Berechnung von Evakuierungszeiten .....	21
5	Grundlagen der Brandsimulation .....	24
5.1	Modelle zur Brandsimulation .....	24
5.1.1	Physikalische Modelle .....	24
5.1.2	Mathematische Modelle .....	25
5.2	Grundlagen der numerischen Strömungsberechnung im Feldmodell .....	26
5.3	Fire Dynamics Simulator als Feldmodell.....	27
6	Definition des Flugzeugmodells.....	28
7	Durchführung von ingenieurmäßigen Nachweisen .....	31
8	Darstellung der Ergebnisse .....	38
8.1	Evakuierungsdauer .....	38
8.2	Szenario 1a.....	38
8.2.1	Fluchtweg vordere Tür .....	38
8.2.2	Fluchtweg vorderer Tragflächennotausstieg.....	39
8.2.3	Fluchtweg hinterer Tragflächennotausstieg.....	39
8.2.4	Fluchtweg zur Tür hinten.....	39
8.2.5	Wärmestrahlung an den linken Türen.....	40
8.3	Szenario 1b.....	40
8.4	Szenario 1c.....	40
8.5	Szenario 1d.....	40
8.6	Szenario 2a.....	40
8.7	Szenario 2b.....	40
8.8	Szenario 2c.....	41
8.9	Szenario 2d.....	41
9	Diskussion.....	42
10	Fazit.....	47
	Literaturverzeichnis .....	48
	Anhang A: DVD-Anhang.....	51

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1: Auslaufender Treibstoff einer Boeing 787 am Flughafen Bangkok (Einzelbild aus [3]).....	1
Abbildung 3.1: Bauvorschriftenstruktur der EASA (CS 25 Large Aeroplanes) [6], [10].....	6
Abbildung 3.2: Notrutschen einer Airbus A320 [14] .....	12
Abbildung 4.1: Bewegungsgeschwindigkeit in Rauch [18] .....	16
Abbildung 4.2: Toleranzzeit für einen ruhenden Menschen mit unbedeckter Haut bei geringer Luftbewegung (<30 m/min) [18].....	20
Abbildung 6.1: Schnitt Aufsicht Flugzeugkabine, Alle rechten Ausgänge geöffnet, alle linken geschlossen, Maßangaben in Meter.....	29
Abbildung 6.2: Querschnitt Flugzeugkabine, Maßangaben in Meter .....	29
Abbildung 6.3: 3D-Ansicht Flugzeugmodell .....	30
Abbildung 7.1: Fluchtwege (rote Punkte: Messpunkte, grüne Linien: Fluchtwege).....	35

## **Tabellenverzeichnis**

Tabelle 1: Abschnitte der EU-OPS 1 [9] .....	7
Tabelle 2: Notausstiegstypen [6] .....	10
Tabelle 3: Horizontale Gehgeschwindigkeit und spezifischer Personenstrom für bestimmte Wegelemente (aus [5]) .....	22
Tabelle 4: Messpunkte .....	34
Tabelle 5: Ergebnisse Evakuierungsberechnung.....	38

## Abkürzungsverzeichnis

vfdb	Vereinigung zur Förderung des Deutschen Brandschutzes e.V.
FDS	Fire Dynamics Simulator
JAA	Joint Aviation Authorities
JAR	Joint Aviation Requirements
EASA	European Aviation Safety Agency (Europäische Agentur für Flugsicherheit)
ICAO	International Civil Aviation Organization (Internationale Zivilluftfahrtorganisation)
CS 25	Certification Specifications 25 large aeroplanes (Zulassungsvorschriften für große Flugzeuge der EASA)
EU-OPS 1	Technische Vorschriften und Verwaltungsverfahren für die gewerbsmäßige Beförderung in Flugzeugen in der EU
FED	Fractional Effektive Dose (tödliche Teildosis eines Giftes)
Hb	Hämoglobin (roter Blutfarbstoff)
O <sub>2</sub> Hb	mit einem Sauerstoffmolekül besetztes Hämoglobin
COHb	mit einem Kohlenmonoxidmolekül besetztes Hämoglobin

## Einheitenverzeichnis

s	Sekunde
m	Meter
cm	Zentimeter (= 0,01 Meter)
Vol.-%	Volumenprozent
l	Liter (= $10^{-3} \text{ m}^3$ )
min	Minute (= 60 Sekunden)
ppm	Teile von einer Millionen (Parts per Million)
°C	Grad Celsius
kW	Kilowatt (= 1000 Watt)
kg	Kilogramm (= 1000 Gramm)
MJ	Megajoule (= $10^6$ Joule)

## Formelzeichenverzeichnis

<i>Formelzeichen</i>	<i>Einheit</i>	<i>Beschreibung</i>
$t_{\text{Evakuierung}}$	s	Zeit, die für die Evakuierung benötigt wird
$t_{\text{Verfügbar}}$	s	Zeit, die zur Evakuierung zur Verfügung steht
$D_L$	$\text{m}^{-1}$	optische Dichte
$K$	$\text{m}^{-1}$	Extinktionskoeffizient
$S$	m	Erkennungsweite
$C$	-	Erkennungsfaktor
$s_{\text{max}}$	m	Entfernung zu dem Punkt, der am weitesten von einem Notausgang entfernt ist
$v_{\text{Bewegung}}$	$\frac{\text{m}}{\text{s}}$	Bewegungsgeschwindigkeit
$F_{\text{CO}}$	-	Quotient aus aufgenommener CO-Dosis und letaler Dosis
$F_{\text{HCN}}$	-	Quotient aus aufgenommener HCN-Dosis und letaler Dosis
$F_{\text{CO}_2}$	-	Quotient aus aufgenommener CO <sub>2</sub> -Dosis und letaler Dosis
$F_{\text{O}_2}$	-	Quotient aus zu wenig aufgenommenen Sauerstoff und letaler Sauerstoffmindestdosis
$D$	Vol.-%	kritische Menge COHb im Blut
$RMV$	$\frac{1}{\text{min}}$	Atemrate (Respiratorisches Minutenvolumen)
$\Delta t$	min	Zeitintervall
$c_{\text{CO}}$	ppm	Konzentration Kohlenstoffmonoxid (CO)
$c_{\text{HCN}}$	ppm	Konzentration Cyanwasserstoff (HCN)
$c_{\text{CO}_2}$	Vol.-%	Konzentration Kohlenstoffdioxid (CO <sub>2</sub> )
$c_{\text{O}_2}$	Vol.-%	Konzentration Sauerstoff (O <sub>2</sub> )
$V_{\text{Hyp}}$	-	Faktor zu Beschreibung der CO <sub>2</sub> -bedingten Beschleunigung der Atmung

$F_{Toxisch}$	-	Summe der Quotienten der aufgenommenen Teildosen
$\tau_{conv}$	s	Maximale Expositionsdauer Hitze <sup>1</sup> Konvektion
$\tau_{rad}$	s	Maximale Expositionsdauer Hitze Strahlung
$T$	°C	Temperatur
$q$	$\frac{kW}{m^2}$	Wärmestrahlung
$F_{Thermisch}$	-	Quotient aus ausgesetzter Hitze und letaler Hitzemenge
$t_{Weg}$	s	Zeit, die von dem am weitest entfernten Punkt bis zum Ende eines Wegelements benötigt wird
$t_{Passage}$	s	Zeit, die alle Personen zum Passieren eines Wegelements benötigen
$D$	$\frac{\text{Personen}}{m^2}$	Personendichte
$F_S$	$\frac{\text{Personen}}{m \cdot s}$	Personenstrom
$L_{max}$	m	längste Wegstrecke in einem Wegelement
$L_m$	m	kürzester Weg
$V$	$\frac{m}{s}$	Gehgeschwindigkeit
$N$	Personen	Anzahl der Personen, die in Wegelement passieren
$B$	m	Breite
$\dot{Q}'$	$\frac{kW}{m^2}$	flächenspezifische Wärmefreisetzungsrate
$\dot{m}''$	$\frac{kg}{s \cdot m^2}$	flächenspezifische Abbrandrate
$H_u$	$\frac{MJ}{kg}$	unterer Heizwert
$\chi$	-	Verbrennungseffektivität

### Molekülformeln

CO Kohlenstoffmonoxid

CO<sub>2</sub> Kohlenstoffdioxid

HCN Cyanwasserstoff oder Blausäure

<sup>1</sup> Hitze als thermische Einwirkung auf den menschlichen Körper, siehe Kapitel 4.3

$O_2$	Sauerstoff
$NO_x$	Stickstoffoxide
$C_{14}H_{30}$	Kerosin (Näherung, vgl. [1])

# 1 Einleitung

Die Boeing 787 „Dreamliner“ ist das neueste Verkehrsflugzeug des US-amerikanischen Flugzeugherstellers Boeing. Boeing hat damit als erster Hersteller ein Verkehrsflugzeug auf den Markt gebracht, das zum größten Teil aus kohlefaserverstärktem Kunststoff besteht. Doch der Dreamliner sollte sich für den Flugzeugbauer zu einem Albtraum entwickeln. Nachdem der Erstflug mit einer Verzögerung von über zwei Jahren gegenüber dem ursprünglichen Zeitplan stattfand, rissen die Probleme nicht ab. Nachdem die 787 mehrfach aufgrund sich selbst entzündender Batterien notlanden musste, wurde im Januar 2013, ein und ein Vierteljahr nach der Erstauslieferung, für 3 Monate ein weltweites Flugverbot verhängt [2]. Neben diesem verheerenden Problem gab es eine Reihe weiterer Pannen. So hatte der Dreamliner wiederholt Probleme mit auslaufendem Treibstoff. Nachdem es bereits vor der Flugverbotsphase einen Vorfall in Boston gab, bei dem 150 Liter Treibstoff durch ein undichtes Ventil ausliefen [3], gab es im Januar 2014 einen weiteren Vorfall mit einer Maschine der Fluggesellschaft Norwegian Air Shuttle. Ein von einem Passagier gemachtes Video zeigt, wie am Flughafen von Bangkok aus der Tragfläche große Mengen Treibstoff austreten [4].



**Abbildung 1.1: Auslaufender Treibstoff einer Boeing 787 am Flughafen Bangkok (Einzelbild aus [4])**

Welches Gefahrenpotential auslaufender Treibstoff hat, zeigt ein Vorfall am Flughafen Mumbai. Am 4. September 2009 geriet das äußere linke Triebwerk einer Boeing 747-400 der Air India auf ihrem Weg von Mumbai nach Riad, noch während es von der Parkposition zur Startbahn rollte, in Brand [5]. Unmittelbar nachdem das Flugzeug aus der Parkposition geschoben wurde und alle vier Triebwerke gestartet wurden, fiel der Cockpitbesatzung eines anderen Flugzeuges auf, dass im Bereich der linken Tragfläche der Boeing 747 Treibstoff

austrat. Nach weiteren Beobachtungen durch einen Techniker und den Fahrer des Follow-Me-Fahrzeuges gelang es der Flugsicherung erst nach über 5 Minuten, die Piloten über den austretenden Treibstoff zu informieren und das sofortige Abschalten aller Triebwerke anzuordnen. Kurz nach dem Abschalten der Triebwerke fing der ausgetretene Treibstoff an heißen Triebwerksteilen Feuer. Als dies von der Kabinenbesatzung bemerkt wurde, leitete sie umgehend die Evakuierung<sup>2</sup> über die Notrutsche ein. Bei der Evakuierung wurden 21 der 213 Fluggäste leicht verletzt, es gab Kratzer und Schürfwunden. Das Feuer um das Triebwerk wurde durch die Flughafenfeuerwehr schnell gelöscht. Die Untersuchungen nach diesem Unfall haben ergeben, dass sich ein Treibstoffschlauch vom Triebwerk gelöst hat und hierdurch der Treibstoff ausgetreten ist.

Die Pannenserie der Boeing 787 zeigt, dass auch hochmoderne Verkehrsflugzeuge vor technischen Problemen nicht gefeit sind. Die Treibstoffleckagen wurden hier immer rechtzeitig erkannt, bevor es zu einem Brand kommen konnte. Auch der Vorfall in Mumbai hätte ein weitaus schlimmeres Ende nehmen können.

Wenn ausgelaufener Treibstoff in Brand gerät, ist eine Evakuierung oft unumgänglich. In solchen Situationen kann die Evakuierung nur durch die Notausgänge, die nicht unmittelbar von dem Brand betroffen sind, erfolgen. Anderenfalls würden die Passagiere direkt in das Feuer geraten. Durch ein Versehen einzelner Besatzungsmitglieder oder durch voreilige Fluggäste kann es dennoch passieren, dass ein vom Brand betroffener Notausgang geöffnet wird. Für die Evakuierung steht dieser (geöffnete) Notausgang nicht zur Verfügung, dennoch können hierdurch Verbrennungsprodukte wie Rauch und Hitze in die Kabine eindringen.

Hier stellt sich die Frage: Inwiefern können bei einem Feuer außerhalb der Flugzeugkabine durch einen fälschlicherweise geöffneten Notausgang so viele Verbrennungsprodukte in die Kabine eindringen, dass durch Toxizität, Sichtbehinderung und Wärme die vollständige Evakuierung stark behindert oder verhindert wird?

---

<sup>2</sup> In der Luftfahrtterminologie ist die Evakuierung als sofortige Räumung zu verstehen. Diese Definition geht aus den EU-OPS 1 [6] hervor. DIN 14011 Begriffe aus dem Feuerwehrwesen findet entsprechend keine Anwendung.

## **2 Methodische Herangehensweise**

Die Methodik der vorliegenden Arbeit orientiert sich an dem „Leitfaden Ingenieurmethoden des Brandschutzes“ [8] der Vereinigung zur Förderung des Deutschen Brandschutzes (vfdb). Der Leitfaden beschreibt das Vorgehen zur Erstellung und Überprüfung von Brandschutzkonzepten im baulichen Brandschutz unter Zuhilfenahme von Ingenieurmethoden. Während sich der klassische Weg eng an materielle Vorschriften aus dem Bauordnungsrecht hält und wenig Spielraum zulässt, orientiert sich der Weg mit Ingenieurmethoden näher an der Realität. Durch Nachweisverfahren werden hierbei Brandschutzmaßnahmen risikogerecht eingesetzt. Diese Vorgehensweise führt dazu, dass zum einen immer ausreichend Brandschutzmaßnahmen ergriffen werden, auf der anderen Seite gehen diese aber nicht über den Bedarf hinaus, was einen wirtschaftlichen Vorteil mit sich bringen kann. Die Ingenieurmethoden im Brandschutz haben eine besondere Bedeutung bei Sonderbauten, da diese brandschutztechnisch Einzelfälle darstellen und aufgrund dessen die brandschutztechnische Auslegung nicht ausreichend in Vorschriften gefasst wurde um daraus ein Brandschutzkonzept erstellen zu können. In Zusammenhang mit diesem Leitfaden wird ein Flugzeug wie ein Sonderbau betrachtet. Der ingenieurmethodische Weg wird der Fragestellung entsprechend angepasst.

Zunächst wird in der vorliegenden Arbeit die Notfalleвакуierung eines Verkehrsflugzeuges betrachtet. Hier wird auch auf technischen Not- und Sicherheitseinrichtungen eingegangen, die bei der Notfalleвакуierung eine besondere Rolle spielen. In dem darauf folgenden Abschnitt „Definition der Schutzziele, funktionale Anforderungen und Leistungskriterien“ werden die für die Beantwortung der Fragestellung relevanten Beurteilungsgrundlagen ermittelt. Dies wird gemäß dem Leitfaden durchgeführt. Hierauf folgend werden die Grundlagen der Brandsimulation erläutert und das verwendete Simulationsprogramm Fire Dynamics Simulator vorgestellt. In dem Kapitel „Definition des Flugzeugmodells“ erfolgt die Definition der brandschutztechnischen Randbedingungen des Flugzeugmodells wie die Geometrie und die Nutzer. In dem nächsten Kapitel „Durchführung von ingenieurmäßigen Nachweisen“ werden die Brandbemessungsszenarien definiert und die Eingabeparameter für die Simulation bestimmt. Hiernach werden die Ergebnisse dargestellt und diskutiert.

## **3 Die Notfalleвакуierung**

### **3.1 Einleitung**

Der Notfalleвакуierung wird bereits bei der Zulassung von Verkehrsflugzeugen ein hoher Stellenwert beigemessen. So muss zur Zulassung eines neuen Modells ein Evakuierungstest durchgeführt werden. Hierbei wird ein Flugzeug mit der maximalen Passagierzahl besetzt und über die Hälfte der Notausgänge vollständig evakuiert. Um die Zulassung zu erhalten, muss dies innerhalb von 90 Sekunden erfolgen [9]. Der Stellenwert wird durch die hohen Kosten der Übung von ca. 2 Mio. Euro und dem hohen Verletzungsrisiko für die Teilnehmer deutlich [10].

Bei einer Notfalleвакуierung spielt eine Reihe von Faktoren eine Rolle [11]:

- Ausbildung und Zusammenspiel der Kabinenbesatzung
- Zahl und Lage der Notausstiege
- Sicherheitseinrichtungen wie Notfallbeleuchtung und Notrutschen
- Konfiguration der Kabine
- Passagierzahl

Diese Faktoren lassen sich den Anforderungen an den Betrieb und den Anforderungen an den Bau von Flugzeugen zuordnen. Die Anforderungen an den Betrieb sind ausschließlich in den EU-OPS 1, den „technische Vorschriften und Verwaltungsverfahren für den gewerblichen Luftverkehr mit Flächenflugzeugen“ [6], geregelt. Anforderungen an den Bau ergeben sich vorrangig aus der CS-25, den Bauvorschriften für große Flugzeuge. Es gibt jedoch auch Überschneidungen mit den EU-OPS 1. Exemplarisch sei hier das Vorhandensein von Notrutschen an Notausstiegen ab einer bestimmten Türschwellehöhe genannt, welches in beiden Regelwerken gefordert wird.

In dem ersten Teil dieses Kapitels werden die Zulassungs- und Betriebsvorschriften vorgestellt. Im zweiten Teil wird auf die Not- und Sicherheitseinrichtungen, die für Notfalleвакуierung relevant sind, eingegangen. Hierzu zählen die Notausstiege, Fluchtwege, Notbeleuchtung sowie die Notrutschen. Der dritte Teil beschreibt hierauf aufbauend den idealtypischen Ablauf einer Notfalleвакуierung.

### **3.2 Vorschriften**

Aufgrund der hohen Sicherheitsanforderungen im Luftverkehr hat der Gesetzgeber umfangreiche Rechtsnormen erlassen. Innerhalb der Europäischen Union wurde das

Luftfahrtrecht in großen Teilen harmonisiert. Zuerst geschah dies durch die *Joint Aviation Authorities* (JAA). Die JAA war ein Zusammenschluss europäischer Luftfahrtbehörden und gab mit den *Joint Aviation Requirements* (JAR) ein umfassendes Regelwerk für die Zivilluftfahrt in Europa heraus. Nach der Gründung der *Europäischen Agentur für Flugsicherheit* (EASA) wurde die JAA aufgelöst. Neuausgaben der JARs werden hierbei in EU-Vorschriften überführt [12].

In den Regelwerken der EASA sind die Einzelvorschriften wie bei Gesetzen eindeutig nummeriert. Dies geschieht nach dem Schema, dass zuerst die Abkürzung für das Vorschriftenwerk, z. B. CS 25 für *Certification Specification 25 Large Aeroplanes*, genannt wird und durch einen Punkt getrennt die Nummer der Einzelvorschrift. So wird die erste Vorschrift in CS 25 mit CS 25.1 bezeichnet.

### **3.2.1 Zulassungsvorschriften**

Die grundlegende Anforderung, dass ein Luftfahrzeug ‚lufttüchtig‘ sein muss, wurde schon mit dem *Abkommen über die internationale Zivilluftfahrt* (Chicagoer Abkommen) [13] 1944 aufgestellt. Das Chicagoer Abkommen stellt die völkerrechtliche Basis der internationalen Zivilluftfahrt dar und mit dessen Verabschiedung wurde die *International Civil Aviation Organization* (ICAO) gegründet. Derzeit haben 191 Staaten das Abkommen unterzeichnet [14]. Als integraler Bestandteil des Abkommens gelten die Anhänge. Der Anhang 8 regelt hierbei die Lufttüchtigkeit von Luftfahrzeugen [12]. Es enthält die Regelung, dass jeder Unterzeichnerstaat dafür Sorge zu tragen hat, dass nur lufttüchtige Luftfahrzeuge eine Zulassung erhalten.

Lufttüchtigkeit ist definiert als „ein Begriff aus dem nationalen Luftrecht, der aussagt, dass ein Luftfahrtgerät vorgegebene (technische) Anforderungen erfüllt und sich in einem Zustand befindet, der einen sicheren Betrieb erlaubt.“ [10]

Die Musterzulassung neuer Flugzeugtypen erfolgt in der Europäischen Union auf Grundlage der EASA Bauvorschriften *Certification Specification* (CS) [9], [12]. Diese stellen Mindestanforderungen an die Konstruktion und Auslegung von Luftfahrzeugen auf, damit ein sicherer Betrieb gewährleistet ist. Ein Flugzeug erhält nur dann eine Zulassung, wenn es und seine Teile diese Vorschriften erfüllen. Hierbei decken die Vorschriften nicht nur das Luftfahrzeug an sich ab, sondern auch Triebwerke und Propeller sowie Flugsicherungs-ausrüstungsgeräte und alle zum Einbau bestimmten Ausrüstungskomponenten wie z. B. Navigationsgeräte, Reifen, Rettungs- und Sicherheitsgeräte und Bordküchen [9], [12]. Die Bauvorschriften sind in mehrere Abschnitte gegliedert. Beispielhaft sind hier die *CS Definitions: Definitions and Abbreviations* zu nennen,

die Begriffsbestimmungen und Abkürzungen enthält, die *CS E: Aero Engines*, die Vorschriften zu Flugzeugtriebwerken enthält oder die *CS 23: Normal-, Utility-, Aerobatic-/Commuter Aeroplanes*, die die Bauvorschrift für Motorflugzeuge darstellt [12], [15].

Für den Bau von Verkehrsflugzeugen ist der Abschnitt *CS 25: Large Aeroplanes* [9] ausschlaggebend. Die CS 25 gilt für alle Flugzeuge mit einem maximalen Startgewicht von über 5700 kg. Eine Beschränkung hinsichtlich des Verwendungszwecks gibt es nicht, sie gilt sowohl für den Personen- als auch den Frachttransport. Ausgenommen sind lediglich *Commuter Aeroplanes*. *Commuter Aeroplanes* (Zubringerflugzeuge), sind Flugzeuge mit zwei Propellern, deren maximales Startgewicht 8618 kg nicht übersteigt und die nicht mehr als 19 Fluggastsitze haben [15]. Unter die CS-25 fallen somit nahezu alle im zivilen Luftverkehr anzutreffenden Passagier- und Frachtflugzeuge.

Die CS-25 ist in zwei Bücher aufgeteilt. In Buch 1 sind die eigentlichen Vorschriften enthalten, in Buch 2 Anwendungshinweise und Auslegungen der Vorschriften. Das Buch 1 ist in Unterabschnitte („Subparts“) untergliedert, die verschiedene Produktgruppen darstellen. Die Unterabschnitte des Buch 2 orientieren sich hierbei an denen des Buch 1 [12]. Der Aufbau ist in Abbildung 3.1 dargestellt.

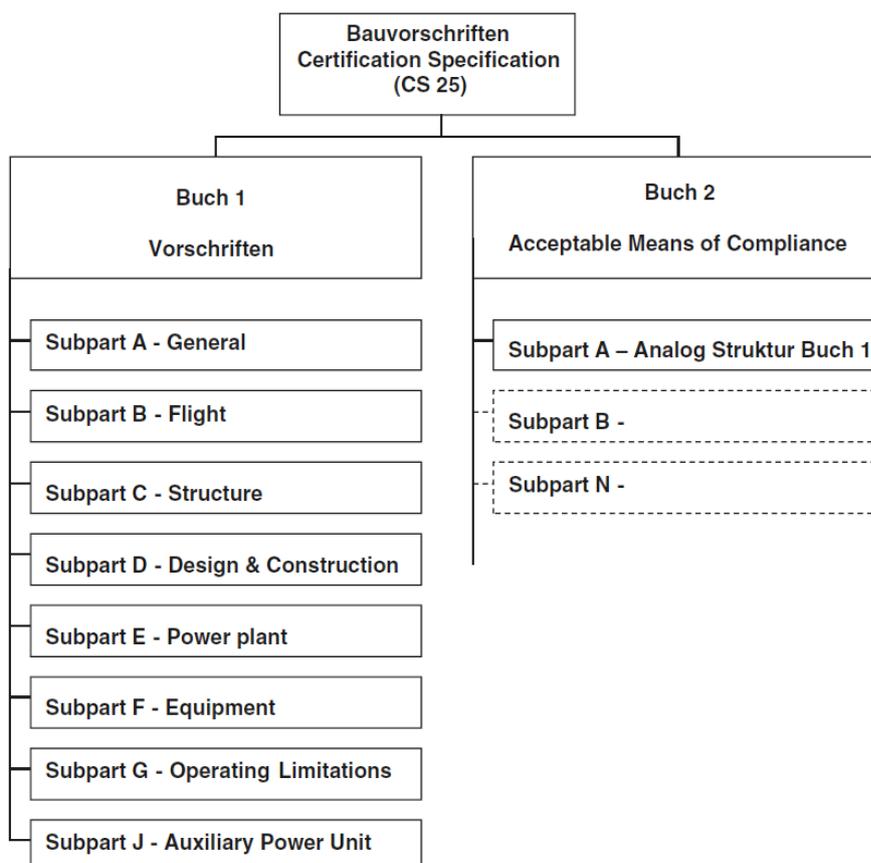


Abbildung 3.1: Bauvorschriftenstruktur der EASA (CS 25 Large Aeroplanes) [9], [12]

### 3.2.2 Betriebsvorschriften

Wie auch beim Bau und der Zulassung von Flugzeugen fordert das Regelwerk der ICAO, dass jeder Unterzeichnerstaat Regelungen über den Betrieb von Flugzeugen erlassen muss. In der EU ist dies durch die Herausgabe der OPS 1, oder EU-OPS 1 geschehen. Im Gegensatz zu den Zulassungsvorschriften CS ist der Geltungsbereich der EU-OPS 1 nicht über technische Merkmale wie das Gewicht eingeschränkt, sondern über den Verwendungszweck des Flugzeugs. Die OPS 1 gelten für die Gewerbsmäßige Beförderung in Flugzeugen für Luftfahrtunternehmen in der Europäischen Union [6]. Eingeführt wurde sie mit der EG-Verordnung NR. 859/2008 am 20.08.2008 und ersetzt seitdem die JAR-OPS 1 [6], [12].

Die EU-OPS 1 enthält alle Vorschriften, die für den Betrieb von Verkehrsflugzeugen zu beachten sind. Sie ist in 19 Abschnitte gegliedert:

**Tabelle 1: Abschnitte der EU-OPS 1 [6]**

ABSCHNITT A	Geltungsbereich und Begriffsbestimmungen
ABSCHNITT B	Allgemeines
ABSCHNITT C	Luftverkehrsbetreiberzeugnis und Aufsicht über Luftfahrtunternehmen
ABSCHNITT D	Betriebliche Verfahren
ABSCHNITT E	Allwetterflugbetrieb
ABSCHNITT F	Flugleistungen — Allgemein
ABSCHNITT G	Flugleistungsstufe A
ABSCHNITT H	Flugleistungsstufe B
ABSCHNITT I	Flugleistungsstufe C
ABSCHNITT J	Masse und Schwerpunktlage
ABSCHNITT K	Instrumente und Ausrüstungen
ABSCHNITT L	Kommunikations- und Navigationsausrüstung
ABSCHNITT M	Instandhaltung
ABSCHNITT N	Flugbesatzung
ABSCHNITT O	Kabinenbesatzung
ABSCHNITT P	Handbücher, Bordbücher und Aufzeichnungen
ABSCHNITT Q	Beschränkung der Flug- und Dienstzeiten und Ruhevorschriften
ABSCHNITT R	Beförderung gefährlicher Güter im Luftverkehr
ABSCHNITT S	Luftsicherheit

Wesentlich für den Betrieb eines Flugzeugs durch die Besatzung ist das in Abschnitt P (OPS 1.1040) geforderte Betriebshandbuch. Genaue Anweisungen, wie die betrieblichen Verfahren auszusehen haben, sind in den EU-OPS 1 nicht enthalten. Diese müssen durch

den Luftfahrtunternehmer in dem Betriebshandbuch innerhalb der von den EU-OPS 1 gesetzten Grenzen geregelt werden. Eine weitere Kontrolle geschieht durch die zuständige Luftfahrtbehörde, die das Betriebshandbuch zulassen muss [6].

In der Vorschrift OPS 1.1045 wird eine bestimmte Struktur vorgeschrieben. Das Betriebshandbuch wird in vier Teile gegliedert:

- Teil A: Allgemeines/Grundsätzliches  
Dieser Teil muss alle musterunabhängigen betrieblichen Grundsätze, Anweisungen und Verfahren enthalten, die für den sicheren Betrieb notwendig sind.
- Teil B: Flugzeugbezogene Betriebsunterlagen  
Dieser Teil muss alle musterbezogenen Anweisungen und Verfahren, die für den sicheren Betrieb notwendig sind, enthalten. Die Unterschiede zwischen den vom Luftfahrtunternehmer eingesetzten Flugzeugmustern, Flugzeugbaureihen oder einzelnen Flugzeugen müssen berücksichtigt werden.
- Teil C: Strecken- und flugplatzbezogene Anweisungen und Angaben  
Dieser Teil muss alle Anweisungen und Angaben, die für das Einsatzgebiet benötigt werden, enthalten.
- Teil D: Schulung  
Dieser Teil muss alle Anweisungen und Angaben für die Schulung von für den sicheren Betrieb benötigtem Personal enthalten.

(Auszug aus OPS 1.1045 [6])

Als Anlage zu OPS 1.1045 wird der vorgeschriebene Inhalt mit einer inhaltlichen Gliederung detailliert wiedergegeben.

Die für die jeweilige Tätigkeit relevanten Bestandteile des Betriebshandbuchs sind den Mitarbeitern zur Verfügung zu stellen. Jedes Besatzungsmitglied muss ein persönliches Exemplar erhalten.

Die Verfahren zur Notfallevakuierung sollen von dem Luftfahrtunternehmer im Teil B des Betriebshandbuchs, demusterspezifischen Teil, geregelt werden. Dieses muss Verfahren zur Vorbereitung einer Noträumung und zur Durchführung einer Noträumung nach einer Notlandung, Notwasserung oder anderer Notsituationen enthalten (Anlage 1 zu OPS 1.1045 [6])

Jedes Mitglied der Kabinenbesatzung muss in Noträumungsverfahren geschult werden. Dies geschieht in der Sicherheitsgrundschulung sowie in der Umschulung bzw. in der Unterschiedsschulung. Die Sicherheitsgrundschulung ist eine allgemeine, nicht flugzeugmusterspezifische Schulung. Die Umschulung ist die Schulung auf das spezielle Flugzeugmuster. Eine Unterschiedsschulung wird durchgeführt, wenn das Besatzungsmitglied auf einer anderen Baureihe eines Flugzeugmusters eingesetzt werden

soll, als in der Umschulung geschult wurde. Der Inhalt der Schulung ist in den Anhängen zu den jeweiligen Einzelvorschriften OPS 1.1005 und OPS 1.1010 aufgeführt. Die für die Noträumungsverfahren relevanten Inhalte in der Sicherheitsgrundschulung sind insbesondere Verfahren, um Fluggäste zu motivieren, das Flugzeug schnell zu verlassen und die Lenkung von größeren Menschenmengen. Daneben soll geschult werden, wann die Kabinenbesatzung eine Noträumung selbst einleiten darf und muss und es soll ein Bewusstsein für die Wichtigkeit sicherheitsrelevanter Aufgaben und Pflichten geschaffen werden (Anlage 1 zu OPS 1.1005 [6]). In der musterspezifischen Schulung, also die Schulung auf einen bestimmten Flugzeugtyp, muss unter anderem das Öffnen von Notausgängen in normalen als auch in Notfallsituationen und das Ausbringen der Notrutschen gelernt werden. In der Schulung muss auch gelehrt werden, dass und wie geplante und nicht geplante Evakuierung erkannt werden. Hier wird auch das Erkennen nicht benutzbarer Notausgänge explizit genannt (Anlage 1 zu OPS 1.1010 [6]).

In den EU-OPS 1 sind für den Betrieb zum Teil Forderungen aufgestellt, die gleich oder ähnlich bereits für die Zulassung nach CS-25 gefordert werden. Dies sind insbesondere in „Abschnitt K Instrumente und Ausrüstung“ enthaltene Not- und Sicherheitseinrichtungen (vgl. [6], [9]).

### **3.3 Not- und Sicherheitseinrichtungen**

#### **3.3.1 Notausstiege**

Das Design der Notausgänge in Hinsicht auf die Größe ist im Abschnitt CS 25.807 *Emergency Exits* geregelt. Hier werden neun verschiedene Typen definiert. Neben den Typen A bis C sowie I bis IV gibt es die Typen Ventral und Tail cone. Dies sind Ausgänge, die durch den Bauch des Flugzeugs in das Freie führen, beispielsweise eine Treppe, die im Heck des Flugzeuges ausgeklappt wird. Diese Art von Ausgängen ist bei Verkehrsflugzeugen nur selten bei einigen älteren Modellen anzutreffen.

Die Typen A bis C und I bis IV sind Türen und Notausstiegsluken. Hierbei ist nicht festgelegt, ob ein Notausgang als Tür oder als Notausstiegsluke ausgeführt ist. Während Türen in der Regel auch im Normalbetrieb verwendet werden, sind die Notausstiegsluken ausschließlich für den Notfall vorgesehen. Alle Typen dürfen sich auch über Tragflächen befinden, so dass der Fluchtweg über die Tragfläche führt. In der CS-25 sind die Mindestmaße sowie die maximale Höhe der Türschwellen der Notausgangstüren festgelegt. Es ist ebenso angegeben, wie viele Passagiere pro Notausgangspaar zulässig sind, also jeweils für zwei gegenüberliegende Notausgänge. Wenn in einem Notausgangspaar verschiedene Typen verwendet werden, ist für die maximale Passagierzahl der kleinere Ausgang maßgebend.

**Tabelle 2: Notausstiegstypen [9]**

Typ	Minimale Größe (B·H)	Maximale Türschwellenhöhe		Maximale Passagierzahl pro Notausgangspaar
		Innen über Kabinenboden	Außen über Tragfläche	
A	107 cm · 183 cm	0 cm	0 cm	110
B	81,3 cm · 182,9 cm	0 cm	0 cm	75
C	76,2 cm · 121,9 cm	0 cm	0 cm	55
I	61 cm · 122 cm	0 cm	0 cm	45
II	51 cm · 112 cm	0 cm	43 cm	40
III	51 cm · 91,4 cm	51 cm	69 cm	35
IV	48 cm · 66 cm	73,7 cm	91,4 cm	9

Aus CS 25.809 *Emergency exit arrangement* ergeben sich weitere Anforderungen an die Notausstiege. Um sicherzustellen, dass Notausstiege nicht geöffnet werden, wenn es die Bedingungen vor dem Notausstieg nicht erlauben, muss jeder eine Vorrichtung, z. B. ein Fenster, haben, mit dem der Bereich davor eingesehen werden kann. Eine weitere für die Evakuierung wichtige Forderung ist, dass ein Notausstieg innerhalb von 10 Sekunden nach dem Betätigen des Öffnungsmechanismus vollständig geöffnet und in dieser Position gesichert ist. Wesentlich ist auch, dass das Öffnen möglichst einfach und auch im Dunkeln möglich sein muss.

In CS 25.813 ist zusätzlich geregelt, dass für die Notausstiege der Typen A, B, C, I und II unmittelbar an dem Ausgang Platz sein muss, an dem sich ein Flugbegleiter zur Unterstützung der Evakuierung aufhalten kann. Dieser Platz ist mit Haltegriffen auszustatten, damit sich der Flugbegleiter selbst sichern kann.

### **3.3.2 Fluchtwege**

Die CS 25.813 regelt den Zugang zu den Notausstiegen. Für die verschiedenen Typen sind Mindestwerte vorgesehen, wie breit der Weg vom Längsgang bzw. von den Längsgängen zu den Notausstiegen sein muss. Bei Flugzeugen mit zwei Längsgängen ist auch gefordert, dass gegenüberliegende Notausstiege mit einem Quergang verbunden sind, für den ebenfalls Mindestbreiten vorgeschrieben sind.

In CS 25.815 *Width of aisle* sind die Breiten für Längsgänge geregelt. Bei Flugzeugen mit 20 oder mehr Fluggastsitzen müssen die Längsgänge bis zu einer Höhe 64 cm mindestens eine Breite von 38 cm, in dem Bereich über 64 cm eine Breite von 51 cm aufweisen.

### **3.3.3 Notbeleuchtung**

Ein Verkehrsflugzeug benötigt eine Notbeleuchtung, die von einer unabhängigen Energiequelle versorgt werden muss. Die Notbeleuchtung besteht aus folgenden Bestandteilen:

- Notausgangsschilder
- Allgemeine Kabinenbeleuchtung
- Beleuchtung der Notausstiegsbereiche in Fußbodennähe
- Bodenmarkierung der Fluchtwege
- Umfeldbeleuchtung außerhalb der Kabine

Die Notausgangsschilder beinhalten die Schilder zur Markierung der Notausgänge selbst sowie die Schilder, die den Weg zu den Notausgängen weisen. Diese Schilder können hintergrundbeleuchtet oder selbstleuchtend sein. Sie müssen einen weißen Hintergrund mit roter Aufschrift bzw. einem rotem Symbol haben. Für diese Zeichen sind Leuchtwerte vorgeschrieben. Für die Beleuchtung innerhalb der Kabine und der Notausstiegsbereiche sind minimale Helligkeiten vorgeschrieben. Auf dem Kabinenboden müssen selbstleuchtende Markierungen sein, die auch bei einem Ausfall der restlichen Notbeleuchtung bzw., wenn sie z. B. durch Rauch unbrauchbar geworden ist, entlang der Gänge den Weg zum nächsten Notausgang weisen. Außerhalb der Kabinen müssen alle Bereiche, in die Notausstiege führen, beleuchtet sein. Dies sind insbesondere die Notrutschen sowie die Bereiche davor und bei Notausstiegen, die über Tragflächen führen, die Wege über die Tragflächen. Das Notbeleuchtungssystem muss batteriegepuffert sein und mindestens eine Zeit von 10 Minuten überbrücken können.

### **3.3.4 Notrutschen**

Eine Notrutsche ist ein Rettungssystem, durch das die Fluggäste und Besatzung im Falle eines Notfalls das Flugzeug auch ohne eine Treppe verlassen können. Einige Notrutschen können bei einer Notwasserung auch getrennt vom Flugzeug als Floß verwendet werden [10]. Jeder Notausstieg, der nicht auf eine Tragfläche führt und dessen Schwelle sich bei dem am Boden stehenden Flugzeug über 1,8 m über dem Boden befindet, benötigt eine Vorrichtung, um sicher den Boden zu erreichen. Diese muss eine aufblasbare Notrutsche oder etwas Vergleichbares sein. Notausgänge, die auf eine im Flugzeug integrierte Treppe führen, können diese Notrutsche ersetzen, wenn die Treppe zur Notfalleвакуierung geeignet ist. Bei Tragflächennotausstiegen muss eine Notrutsche von der Tragfläche hinunterführen, wenn der Weg von der Tragfläche zum Boden über 1,8 m beträgt. Eine Notrutsche muss sich durch die Öffnung des Notausstieges im Notfall automatisch aufblasen. Zusätzlich muss es eine Möglichkeit geben, die Rutsche manuell auszulösen sowie die Rutsche vom

Flugzeug zu trennen. Dieses darf maximal 6 Sekunden, bei Türen des Typs C 10 Sekunden, dauern. In jedem Fall müssen sie spätestens 10 Sekunden nach der Betätigung der Türöffnungsautomatik vollständig geöffnet sein. Notrutschen, die vor Türen der Typen A und B angebracht sind, müssen zweibahnig sein, das heißt: es müssen zwei Personenreihen nebeneinander rutschen können. Die Abbildungen unten zeigen eine Notrutsche an einer Tür und an einer Tragfläche eines Airbus A320. Einige Bestandteile und Ausrüstungen der Notrutsche sind näher bezeichnet.

#### DOOR SLIDE DESCRIPTION

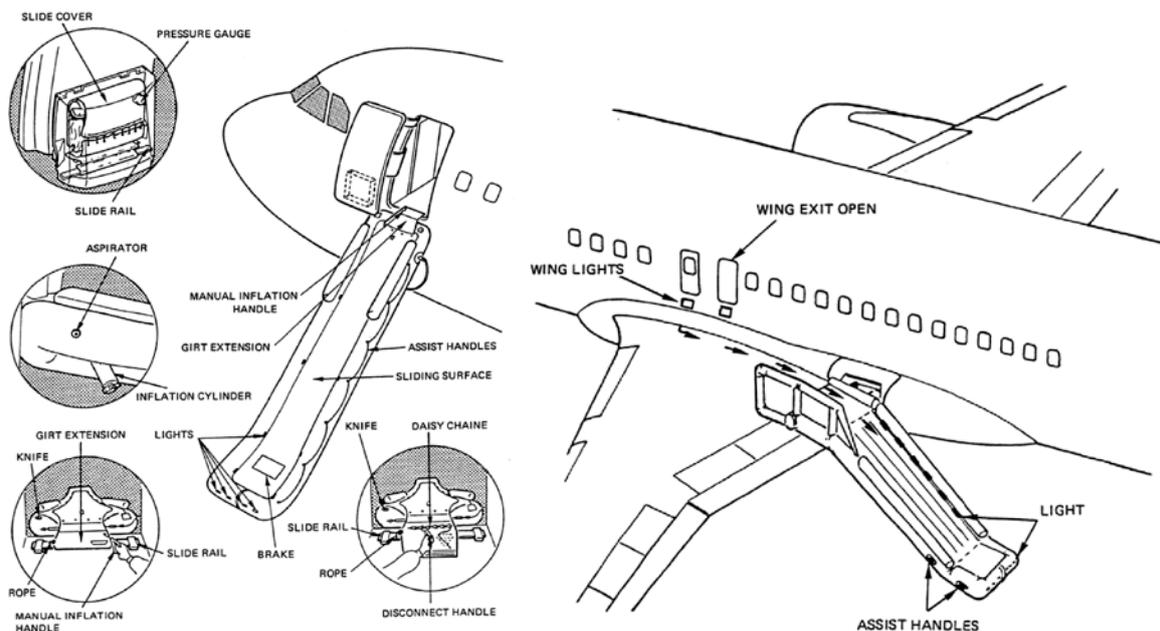


Abbildung 3.2: Notrutschen einer Airbus A320 [16]

### 3.4 Ablauf einer Notfalleвакуierung

Sollte aufgrund einer besonderen Gefahrenlage eine Notfalleвакуierung erforderlich werden, wird diese von der Cockpitbesatzung eingeleitet. In besonders schweren Situationen kann und muss auch jedes Mitglied der Kabinenbesatzung die Notfalleвакуierung einleiten. Gründe hierfür können zum Beispiel sein:

- Unkontrollierbares Feuer
- Dichter Rauch
- Starke Beschädigungen an der Struktur des Flugzeugs
- Notwasserung

Die Kabinenbesatzung wird entsprechend geschult, um diese besonderen Situationen zu erkennen.

Die folgende Beschreibung stellt die Abläufe einer Evakuierung an Land dar. Eine Evakuierung im Wasser, wie sie z. B. nach einer Notwasserung erforderlich ist, läuft ähnlich ab. Da sie für die vorliegende Arbeit nicht von Bedeutung ist, soll hierauf nicht näher eingegangen werden.

Nachdem die Anweisung zur Notfallevakuierung gegeben wurde, gibt die Kabinenbesatzung den Fluggästen die Anweisung, sich unverzüglich zu den Notausgängen zu begeben. Hiernach werden die Notausgänge geöffnet und die Notrutschen ausgebracht. Die jeweiligen Flugbegleiter haben hierbei darauf zu achten, dass die Tür nicht geöffnet wird, wenn die Bedingungen vor dem Notausgang eine sichere Benutzung nicht ermöglichen. Dies können Feuer und Rauch sowie Wrackteile oder andere Hindernisse sein, die ein Öffnen der Notrutsche behindern. Wenn die Tür geöffnet und die Notrutsche vollständig aufgeblasen ist, werden die Fluggäste dazu angewiesen, zügig das Flugzeug über die Notrutschen zu verlassen. Dies geschieht durch ständiges Wiederholen von Kommandos wie „Springen! Rutschen! Weg von Flugzeug!“. Wenn ein Notausgang nicht benutzbar sein sollte, sperrt ein Flugbegleiter diesen und schickt die Fluggäste zu einem benutzbaren. Ein Notausgang kann auch während der Evakuierung, wenn schon Fluggäste darüber evakuiert wurden, unbenutzbar werden. Dies ist zum Beispiel der Fall, wenn die Notrutsche beschädigt wird oder sich ein Feuer davor entwickelt hat. Wenn alle Fluggäste das Flugzeug verlassen haben, muss die Kabinenbesatzung kontrollieren, dass niemand in dem Flugzeug zurückgeblieben ist und hiernach, ggf. mit Notausrüstung, das Flugzeug selbst verlassen [11].

## 4 Definition der Schutzziele, funktionalen Anforderungen und Leistungskriterien

Nach [8] sind für die brandschutztechnische Beurteilung eines Gebäudes Schutzziele, funktionale Anforderungen und Leistungskriterien zu formulieren. Mit dem Schutzziel wird definiert, warum etwas erreicht werden soll. Die funktionale Anforderung leitet hieraus ab, was konkret zur Erreichung des Schutzziels getan werden muss. Mit den Leistungskriterien werden Beurteilungsgrundlagen geschaffen, anhand derer man die Erfüllung der funktionalen Anforderung messen kann.

Das Schutzziel ist bereits aus dem Zweck der Notfallevakuierung vorgegeben: Der Schutz des Lebens und der Gesundheit von Menschen. Nach [8] leitet sich aus dem Schutzziel die funktionale Anforderung „Vermeidung von Personenschäden“ ab. Diese sehr allgemein gehaltene funktionale Anforderung muss weiter konkretisiert werden. Aus der Fragestellung der vorliegenden Arbeit ergibt sich die konkretisierte funktionale Anforderung, den Einfluss der Verbrennungsprodukte eines Feuers außerhalb der Kabine durch Toxizität, Sichtbehinderung und Wärme auf die Notfallevakuierung so gering zu halten, dass sie nicht behindert wird.

Diese lässt sich nach [8] der funktionalen Anforderungen „Sicherheit der Personen bei Einwirkung von Rauch, (Atem-)Gifte [sic], und Hitze“ [8] zuordnen. Hiernach gelten hierfür folgende Leistungskriterien:

- 1 die Höhe der raucharmen Schicht,
- 2 die Qualität der raucharmen Schicht, insbesondere
  - 2.1. die optische Dichte pro Weglänge bzw. die Erkennungsweite,
  - 2.2. die Auswirkungen toxischer Gase und
- 3 thermische Einwirkungen aus Wärmestrahlung und Konvektion

(Auszug aus [8])

Zur Erfüllung des Schutzziels muss die funktionale Anforderung solange erfüllt sein, bis die Evakuierung abgeschlossen ist. Es gilt dabei, dass die Zeit, die für die Evakuierung zur Verfügung steht, größer sein muss, als die Zeit, die für die Evakuierung erforderlich ist:

$$t_{\text{Evakuierung}} < t_{\text{Verfügbar}}$$

Die Zeit, die zur Evakuierung zur Verfügung steht, ist die Zeit, nach der die funktionale Anforderung nicht mehr erfüllt ist. Sie wird mittels ingenieurgemäßen Nachweismethoden ermittelt. Die Zeit, die für Evakuierung benötigt wird, wird mit einem Handrechenverfahren berechnet.

## 4.1 Höhe der raucharmen Schicht

Als konservatives Beurteilungskriterium gilt die Höhe der raucharmen Schicht. Als raucharme Schicht wird der Abstand zwischen dem Fußboden und der Rauchgasschichtunterseite definiert (DIN 18232-2). Unter anderem soll sie es den Nutzern von Gebäuden ermöglichen, sich in Sicherheit zu bringen. Für die Höhe der raucharmen Schicht werden verschiedene Ansätze verfolgt. Weit verbreitet, wie auch in der DIN 18232-2 und den Versammlungsstättenverordnungen, ist die Forderung nach einer Mindesthöhe von 2,5 m. Andere Quellen geben zum Teil deutlich geringere Höhen an, so wird in [18] eine Schichthöhe von 1,8 m einschließlich eines Sicherheitszuschlages bereits als ausreichend betrachtet. Da bei Verkehrsflugzeugen die Deckenhöhe bereits weniger als 2,5 m beträgt, wird in dieser Arbeit als Leistungskriterium eine raucharme Schicht von mindestens 1,8 m festgesetzt. Nimmt man als Deckenhöhe 2,2 m, wie bei einem Airbus A320, an, so dürfte die Rauchsicht nicht mehr als 40 cm betragen. Dies bewegt sich dabei bereits unter der geringsten Rauchsichthöhe (50 cm), wie sie in DIN 18232-2 genannt ist.

## 4.2 Qualität der raucharmen Schicht

Da für die raucharme Schicht eine nicht konservative, vergleichsweise geringe Höhe gewählt wurde, ist eine Beurteilung der Qualität der raucharmen Schicht von besonderer Wichtigkeit.

### 4.2.1 Die optische Dichte pro Weglänge bzw. die Erkennungsweite

Die DIN EN ISO 13943 definiert Rauch als den sichtbaren Teil der flüchtigen Verbrennungsprodukte. Die Intensität des Lichtes wird beim Durchgang durch den Rauch gemindert, was zu einer Verringerung der Sichtweite führt. Durch die Verringerung der Sichtweite wird die Bewegungsgeschwindigkeit der flüchteten Personen verlangsamt und die Notausgangsbeschilderung ist nicht mehr erkennbar, was zu einer Einschränkung der Orientierung führt.

Die lichttrübende Wirkung des Rauches kann durch die optische Dichte  $D_L$  bzw. den Extinktionskoeffizienten  $K$  angegeben werden. Beide beschreiben das Verhältnis von einfallendem zu ausfallendem Licht durch ein Medium in Abhängigkeit der Weglänge. Die beiden Größen unterscheiden sich lediglich dadurch, dass die optische Dichte diesen Quotienten als dekadischen Logarithmus und der Extinktionskoeffizient ihn als natürlichen Logarithmus angibt. Hieraus ergibt sich folgender Umrechnungsfaktor [8]:

$$D_L = \frac{K}{\ln 10} \approx 0,43 \cdot K$$

Die Einheit beider Größen ist  $m^{-1}$ .

Empirische Studien belegen, dass mit zunehmender Trübung des Lichts die Bewegungsgeschwindigkeit der Personen abnimmt (vgl. Abbildung 1.1). Zu unterscheiden ist hierbei der Einfluss von reizendem und nichtreizendem Rauch.

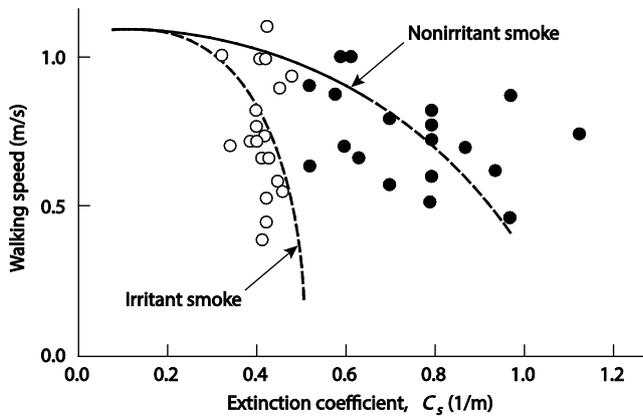


Abbildung 4.1: Bewegungsgeschwindigkeit in Rauch<sup>3</sup> [1]

Für die Orientierung spielt die Erkennung von Notausgangsschildern eine besondere Rolle. Neben der Lichttrübung durch den Rauch ist bei selbstleuchtenden Zeichen die Leuchtdichte von Bedeutung und bei lichtreflektierenden Zeichen der Reflexionsgrad. Zur Bewertung kann hier die Erkennungsweite  $S$  herangezogen werden. Die Erkennungsweite ist die Entfernung, in der ein Objekt gerade noch erkannt werden kann.

$$S = \frac{C}{K}$$

mit:  $C$  Erkennungsfaktor oder Kontrast

Der Erkennungsfaktor  $C$  ist abhängig von der Leuchtdichte und der Größe der Objekte. In [1] wird der Erkennungsfaktor für selbstleuchtende Zeichen mit 5 – 10 und für reflektierende Zeichen mit 2 – 4 angegeben.

Wenn die Erkennungsweite geringer wird als der Abstand zu dem Punkt, der am weitesten von einem Notausgangsschild entfernt liegt, ist keine Orientierung mehr gegeben.

Um die Selbstrettungsfähigkeit aufrechtzuerhalten, müssen folgende Faktoren erfüllt sein:

1. Die Erkennungsweite  $S$  darf nicht kleiner werden, als der Abstand zu dem Punkt, der am weitesten von einem Notausgangsschild entfernt ist.
2. Die Bewegungsgeschwindigkeit darf sich auf Grund der lichttrübenden Wirkung des Rauches nicht derart verlangsamen, dass eine Evakuierung in der vorgegebenen Zeit nicht möglich ist.

<sup>3</sup> Der Extinktionskoeffizienten  $K$  wird in dieser Grafik mit dem Formelzeichen  $C_s$  angegeben.

Mathematisch lassen sich die Bedingungen wie folgt formulieren:

$$S > s_{max}$$

$$v_{Bewegung} > \frac{s_{max}}{t_{verfügbar}}$$

mit:  $s_{max}$  Entfernung zu dem Punkt, der am weitesten von einem Notausgang entfernt ist  
 $t_{verfügbar}$  Zeit, die zur Evakuierung zur Verfügung steht  
 $v_{Bewegung}$  Bewegungsgeschwindigkeit aus Abbildung 1.1

#### 4.2.2 Die Auswirkungen toxischer Gase

Die Toxizität von Brandgasen rührt von ihrer narkotisierenden und erstickenden Wirkung her. Brandgase enthalten als giftige Bestandteile Kohlenstoffmonoxid (CO) und Kohlenstoffdioxid (CO<sub>2</sub>) und, je nach dem brennenden Stoff, Acrolein (C<sub>3</sub>H<sub>4</sub>O), Stickstoffoxide (NO<sub>x</sub>) und andere Stickstoffverbindungen, Chlorwasserstoff (HCl), Schwefeloxide und Phosphoroxide [20]. Bei den Stickstoffverbindungen ist als besonders giftiger Bestandteil der Cyanwasserstoff (auch Blausäure, HCN) zu nennen. Da bei einer Verbrennung Sauerstoff (O<sub>2</sub>) verbraucht wird, ist in Brandgasen eine geringere Sauerstoffkonzentration als unter normalen Bedingungen vorhanden, die für den Menschen gefährlich werden kann.

Die Gefahr, die von den Brandgasen ausgeht, ist von der aufgenommen Teildosis eines Rauchbestandteils abhängig. Die Höhe der Teildosis, die zur Handlungsunfähigkeit führt, wird als *Fractional Effective Dose* (FED) bezeichnet.

Die meisten Todesfälle bei Bränden sind auf eine Kohlenstoffmonoxidvergiftung zurückzuführen. Die toxische Wirkung von Kohlenstoffmonoxid rührt von der starken CO-Affinität des Hämoglobins (Abk. Hb) im Blut her. Das Bindungsvermögen von CO ist über 300-mal größer als das von Sauerstoff. Dadurch werden durch das eingeatmete CO rote Blutkörperchen blockiert, die nun nicht mehr zum Transport von Sauerstoff zur Verfügung stehen, was wiederum zu einer Unterversorgung des Gewebes führt. Ab einem Anteil von 25% der von CO besetzten Blutkörperchen, dem COHb, am Gesamtblut treten erste Vergiftungserscheinungen auf. Der Anteil, bei dem die Handlungsunfähigkeit eintritt, ist von dem Körpergewicht und dem Aktivitätsgrad abhängig. Für einen 70 kg schweren Erwachsenen bei leichter körperlicher Beanspruchung mit einem Atemminutenvolumen von 25 l/min tritt sie bei 30 %, in Ruhe bei einem Atemminutenvolumen von 8,5 l/min bei 40 %, ein. Der Tod tritt bei einem COHb-Anteil von 50 – 60 % ein [8] [20].

Kohlenstoffdioxid kommt normalerweise zu 0,03 % in der Luft vor. Bei einer erhöhten Konzentration in der Atemluft kann es zu einer Kohlenstoffdioxidvergiftung kommen. Der Kohlenstoffdioxidgehalt im Blut ist der wichtigste Faktor für die Atemregulation. Die Zellen im Körper verarbeiten, stark vereinfacht ausgedrückt, Sauerstoff zu Kohlenstoffdioxid. Steigt hierdurch die CO<sub>2</sub>-Konzentration im Blut, wird die Atmung beschleunigt. Wenn diese Erhöhung jedoch nicht durch den Stoffwechsel im Körper, sondern durch eine erhöhte CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Atemluft entsteht, tritt eine nicht physiologische Atembeschleunigung ein. Steigt die Konzentration noch weiter an, kann es zu einer zum Tod führenden Lähmung des Atemzentrums kommen. Die Beschleunigung der Atmung führt dazu, dass auch deutlich höhere Dosen anderer Gifte aus dem Rauchgas aufgenommen werden [20].

In [8] und [1] wird ein Verfahren beschrieben, um das Erreichen der Handlungsunfähigkeit quantitativ zu beurteilen. Hierbei wird die aufgenommene Teildosis pro Zeit gegenüber der FED mit dem Quotienten  $F$  beschrieben. Wenn die Summe eines Quotienten  $F_j$  für eine Teildosis in einem Zeitraum den Wert 1 erreicht hat, ist die FED erreicht und der Mensch ist nicht mehr handlungsfähig. Als nicht konservative Methode ist diese jedoch kritisch zu betrachten und sollte nicht ausschlaggebend sein für die Aussage, sich auf der sicheren Seite zu befinden [8]. Zu beachten ist, dass dieses Verfahren nur für eine kurze Expositionsdauer sowie ab einer gewissen Schadstoffkonzentration anwendbar ist. Für CO ist die Anwendbarkeit erst ab einer Konzentration von 2000 ppm und für CO<sub>2</sub> erst ab 2 % gegeben. Ein Sauerstoffmangel ist erst ab einer Sauerstoffkonzentration von unter 13 % zu berücksichtigen.

Für die Berechnung der Quotienten für die jeweiligen Bestandteile gelten folgende Formeln [1]:

$$F_{CO} = \frac{3,317 \cdot 10^{-5} \cdot RMV \cdot c_{CO}^{1,036} \cdot \Delta t}{D}$$

$$F_{HCN} = \frac{\Delta t}{e^{5,396 - 0,023 \cdot c_{HCN}}}$$

$$F_{CO_2} = \frac{\Delta t}{e^{6,1623 - 0,5189 \cdot c_{CO_2}}}$$

$$F_{O_2} = \frac{\Delta t}{e^{8,13 - 0,54 \cdot (20,9 - c_{O_2})}}$$

mit:  $D$  kritische Menge COHb im Blut in Volumenprozent  
 $RMV$  Atemrate in  $\frac{l}{min}$   
 $\Delta t$  Zeitintervall in min

$c_{CO}$	Konzentration Kohlenstoffmonoxid (CO) in ppm
$c_{HCN}$	Konzentration Cyanwasserstoff (HCN) in ppm
$c_{CO_2}$	Konzentration Kohlenstoffdioxid (CO <sub>2</sub> ) in Volumenprozent
$c_{O_2}$	Konzentration Sauerstoff (O <sub>2</sub> ) in Volumenprozent

Die Wechselwirkungen der verschiedenen Rauchgasbestandteile lassen sich in folgender Formel beschreiben:

$$F_{Toxisch} = \max \left( (F_{CO} + F_{HCN}) \cdot V_{Hyp} + F_{O_2}, F_{CO_2} \right)$$

mit:  $V_{Hyp} = e^{0,2 \cdot c_{CO_2}}$

Die durch die Kohlenstoffdioxidvergiftung hervorgerufene beschleunigte Atmung und die dadurch beschleunigte Aufnahme anderer Gifte wird durch den Faktor  $V_{Hyp}$  gewürdigt. Da die Wirkung von CO und HCN, als auch der Sauerstoffmangel, zu einer Unterversorgung der Zellen mit Sauerstoff führt, werden diese Quotienten addiert.

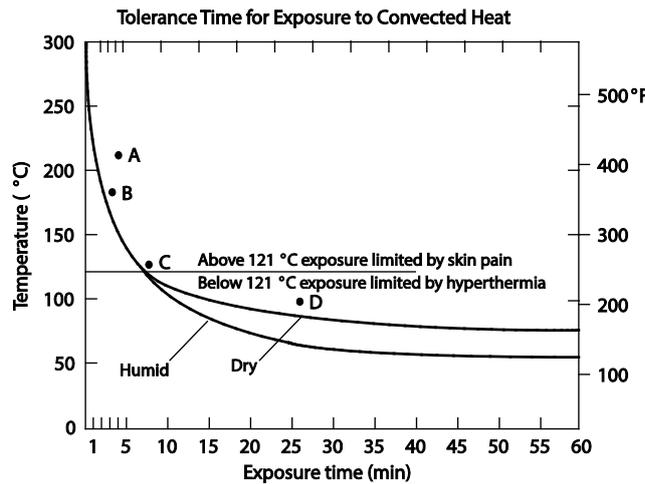
Wenn  $F_{Toxisch}$  den Wert 1 erreicht hat, ist die Handlungsfähigkeit nicht mehr gegeben, eine Selbstrettung ist nicht möglich.

### 4.3 Thermische Einwirkungen aus Wärmestrahlung und Konvektion

Die dritte Größe, die die Handlungsfähigkeit flüchtender Personen einschränken kann, ist die Hitze. Hitze, also die thermische Einwirkung auf den Körper, wirkt durch drei Mechanismen:

- Thermischer Schock
- Hautverbrennungen
- Verbrennungen des Atmungsapparats

Ein thermischer Schock, die Hyperthermie, entsteht, wenn die Körpertemperatur über einen kritischen Wert ansteigt. Ab einer Körpertemperatur von 40 °C ist die Handlungsfähigkeit eingeschränkt; wenn sie 42,5 °C erreicht hat, tritt der Tod nach wenigen Minuten ein [8]. Durch die Wirkung der heißen Gase wird der Körper aufgeheizt. Neben der Temperatur hat die Luftfeuchtigkeit Auswirkungen auf die maximale Dauer, über die man die Hitze tolerieren kann. Durch die bessere Wärmeleitfähigkeit feuchter Luft wird bei einer hohen Luftfeuchtigkeit der Körper schneller erwärmt, was zu einer kürzeren Toleranzzeit führt. Wird bei unbedeckter Haut eine Umgebungstemperatur von über 120 °C erreicht, tritt für die maximale Toleranzzeit die Hyperthermie in den Hintergrund, da sie bei diesen Temperaturen durch die Schmerzen durch Verbrennung der Haut limitiert wird (vgl. Abbildung 1.2) [1].



**Abbildung 4.2: Toleranzzeit für einen ruhenden Menschen mit unbedeckter Haut bei geringer Luftbewegung (<30 m/min) [1]**

Über dieser Temperatur von 120 °C verbrennt man sich an der heißen Luft. Diese Verbrennung ist ebenso abhängig von der Lufttemperatur, der Luftfeuchtigkeit und der Expositionsdauer. Hautverbrennungen können auch durch Wärmestrahlung hervorgerufen werden. Die Wärmestrahlung kann zu einem von dem Feuer selbst herrühren, aber auch von der heißen Rauchsicht strahlen. Die Erträglichkeitsschwelle, die ebenso die Schwelle zur Handlungsunfähigkeit ist, ist von der Zeit abhängig. Eine Wärmestrahlung von über 5 kW/m<sup>2</sup> können nur unter 10 Sekunden ertragen werden. Da die Toleranzzeit mit zunehmender Wärmestrahlung exponentiell abnimmt, kann nach [1] von einer Erträglichkeitsschwelle von 2,5 kW/m<sup>2</sup> ausgegangen werden. Neben der Handlungsunfähigkeit durch einen starken Schmerzreiz ist bei einer Hautverbrennung auch ein Schock in Folge von Flüssigkeitsverlust möglich.

Durch das Einatmen von heißen Gasen kann der Atmungsapparat verbrannt werden. Hier spielt die Luftfeuchtigkeit eine besonders große Rolle. Während Dampf mit einer Temperatur von 100 °C schwere Verbrennungen des gesamten Atmungsapparats hervorruft, schränkt trockene Luft mit einer Temperatur von bis zu 500 °C die Funktionsfähigkeit der Lunge nicht ein, wenngleich das Atmen dieser heißen Luft Verbrennungen des restlichen Atemtrakts hervorruft und mit Schmerzen verbunden sein kann.

Für den verursachten Schaden ist bei allen drei Wirkmechanismen der Hitze die Expositionsdauer ausschlaggebend. Aufgrund empirischer Erfahrungen wurden Formeln aufgestellt, die die maximale Expositionsdauer berechnen. Hier wird zwischen Konvektion (der von der Luft mitgeführten Wärmeenergie) und Wärmestrahlung unterschieden.

Die maximale Expositionsdauer für die Konvektion ist von der Temperatur der Luft abhängig. Für eine vollständig bekleidete Person gilt [8]:

$$\tau_{conv} = \frac{3 \cdot 10^9}{T^{3,4}} [s]$$

mit:  $T$  Temperatur in °C

Für die Strahlungswärme lässt sich folgende Formel aufstellen:

$$\tau_{rad} = \frac{525}{q^{1,9}} [s]$$

mit:  $q$  Wärmestrahlung in kW/m<sup>2</sup>

Es ist zu beachten, dass diese Formel nur für eine Wärmestrahlung von weniger als 2,5 kW/m<sup>2</sup> anwendbar ist. Oberhalb dieses Wertes werden als maximale Expositionsdauer für 2,5 kW/m<sup>2</sup> 30 s, für 4 kW/m<sup>2</sup> 10 - 20 s und für 10 kW/m<sup>2</sup> 4 s angegeben.

Auch hier lässt sich analog zu dem Quotienten bei toxischen Gasen ein Quotient  $F$  als Beurteilungsgrundlage aufstellen. Der gemeinsame Quotient  $F_{Thermisch}$  ist die Summe der Quotienten für Konvektion und Wärmestrahlung.

$$F_{Thermisch} = \sum \left( \frac{\Delta t}{\tau_{conv}} + \frac{\Delta t}{\tau_{rad}} \right)$$

Auch hier gilt, dass mit dem Erreichen des Wertes 1 keine Handlungsfähigkeit mehr gegeben ist.

#### 4.4 Berechnung von Evakuierungszeiten

Für die Berechnung von Evakuierungszeiten findet sich eine Vielzahl von Verfahren. Zu unterscheiden sind hydraulische Modelle und Individualmodelle. Während die hydraulischen Modelle Strömungsmodelle sind und eine Menschenmasse wie ein fließendes Fluid betrachtet wird bei den Individualmodellen jede Person einzeln betrachtet. Entsprechend genauer sind die Individualmodelle, da hier das Verhalten und die Unterschiedlichkeit jeder Person berücksichtigt werden kann. Sie erfordern jedoch auch einen hohen Rechenaufwand und werden rechnergestützt durchgeführt [8]. Da der Schwerpunkt der vorliegenden Arbeit nicht auf der Berechnung von Evakuierungszeiten liegt, wird als ein einfaches, hydraulisches Modell, das sogenannte Handrechenverfahren verwendet. Es ist eine reine Kapazitätsanalyse und unterliegt gewissen Einschränkungen. So geht es davon aus, dass alle Personen gleichzeitig mit der Evakuierung beginnen, es werden von den Personen keine individuellen Entscheidungen gefällt, die den Personenstrom beeinflussen und es gibt keine mobilitätseingeschränkte Personen.

Die Kapazitätsanalyse ist ein Handrechenverfahren, welches die Kapazität von Wegelementen berechnet.

Das Handrechenmodell berechnet die Zeit, die für die Strecke durch ein Wegelement benötigt wird, sowie die Zeit, die für die Passage eines Wegelements benötigt wird. Als Eingabegrößen werden die Weglängen, die Fluchtwegbreiten sowie die Personendichte verwendet. Aus der Personendichte werden anhand empirisch ermittelter Werte die Gehgeschwindigkeit und der Personenstrom ermittelt. Bei der Personendichte wird in [8] als für die Bemessung von Rettungswegen geeigneter Werte zwischen moderater ( $D \approx 1 \text{ P./m}^2$ ) und optimaler ( $D \approx 2 \text{ P./m}^2$ ) Auslastung unterschieden. Die dadurch resultierenden Geschwindigkeiten und Personenströme sind für verschiedene Personenströme unterschiedlich.

**Tabelle 3: Horizontale Gehgeschwindigkeit und spezifischer Personenstrom für bestimmte Wegelemente (aus [8])**

Wegelement	Gehgeschwindigkeit V	Personenstrom $F_S$
Treppe (moderate Auslastung)	0,6 m/s	0,8 P./s·m
Treppe (optimale Auslastung)	0,5 m/s	1,0 P./s·m
Korridor, Mundloch (moderate Auslastung)	1,0 m/s	1,1 P./s·m
Korridor, Mundloch (optimale Auslastung)	0,6 m/s	1,3 P./s·m
Ausgang, Türe (moderate Auslastung)	1,0 m/s	0,9 P./s·m
Ausgang, Türe (optimale Auslastung)	0,6 m/s	1,4 P./s·m

Die Gehgeschwindigkeit V bezieht sich bei Treppen auf die horizontale Ausdehnung, also auf die Grundrissdarstellung. Der Personenstrom  $F_S$  ist der Personenstrom pro Breite.

Die Zeit, die für die Evakuierung benötigt wird, ist die größere der Zeiten, die für den Weg benötigt wird und die für die Passage von Engstellen benötigt wird. Wenn es mehrere Engstellen gibt, ist die Zeit für die Engstelle ausschlaggebend, für die die Passage am längsten dauert.

$$t_{\text{Evakuierung}} = \max \left\{ \begin{array}{l} t_{\text{Passage}} \\ t_{\text{Weg}} \end{array} \right.$$

Die Wegzeit ist die Zeit, die von dem am weitest entfernten Punkt bis zum Ende des Wegelements benötigt wird:

$$t_{\text{Weg}} = \frac{L_{\text{max}}}{V}$$

Die Passagezeit setzt sich zusammen aus der Zeit, die die sich am nächsten am Wegelement befindliche Person zum Wegelement benötigt und der Zeit, die alle Personen zum Passieren des Wegelements benötigen:

$$t_{\text{passage}} = \frac{L_{\text{min}}}{V} + \frac{N}{F_S \cdot B}$$

Gibt es mehrere Engstellen, so ist  $L_{\text{min}}$  die Strecke von der vorhergehenden Engstelle zuzüglich aller  $L_{\text{min}}$ -Werte der vorhergehenden Engstellen. Die Wegzeit für den gesamten Fluchtweg ist die Summe aller Wegzeiten der einzelnen Abschnitte [1], [8].

## 5 Grundlagen der Brandsimulation

Die Brandmodellierung hat ihren Ursprung in der Bautechnik. Hier werden Brände simuliert, um die brandschutztechnische Auslegung von Gebäuden zu beurteilen. Da Brandversuche am realen Gebäude in der Regel nicht möglich sind, werden mit Hilfe von Modellen das Gebäude und der Brand nachgebildet. Diese Nachbildung ist jedoch immer beschränkt, also kann sie sich höchstens an die Wirklichkeit annähern, sie jedoch nie vollkommen darstellen [21]. Das Ziel dieser Modellierung ist die Ermittlung und Beschreibung der Ausbreitung von Verbrennungsprodukten wie Hitze und Rauch, um daraus auf das reale Gebäude schließen zu können.

Grundlegend lassen sich zwei Arten von Modellen unterscheiden: Die physikalischen und die mathematischen Modelle.

### 5.1 Modelle zur Brandsimulation

#### 5.1.1 Physikalische Modelle

Bei den physikalischen Modellen wird ein Brandversuch anhand eines Nachbaus durchgeführt. Hier sind maßstabsgetreue, verkleinerte Nachbauten und Nachbauten im Maßstab 1:1 zu unterscheiden. Die physikalischen Modelle dienen nicht der Beobachtung des Brandes selbst, sondern der Rauchgasausbreitung. Ein geläufiges Beispiel für physikalische Modelle ist der aus der Strömungslehre stammende Windkanalversuch [8].

Um von dem verkleinerten Maßstab auf die Realität schließen zu können, müssen Ähnlichkeitsgesetze herangezogen werden. Im Windkanalversuch ist dies die Reynold'sche Zahl<sup>4</sup>. Im Brandversuch ist jedoch eine ganze Reihe von Ähnlichkeitsgesetzen anzuwenden, die dieses Modell oft zu ungenau macht. Ein Versuch mit einer Nachbildung im Maßstab 1:1 ist dagegen sehr aufwendig und produziert hohe Kosten.

Die physikalischen Modelle sind dennoch von Bedeutung, da mit ihnen die mathematischen Modelle validiert werden können.

---

<sup>4</sup> Reynold'sches Ähnlichkeitsgesetz: Maßstabsgetreu verkleinerte Körper haben bei höherer Strömungsgeschwindigkeit bzw. geringerer Viskosität die gleiche Reynold'sche Zahl wie der originale Körper [22].

### 5.1.2 Mathematische Modelle

Die mathematischen Modelle unterscheiden drei verschiedene Berechnungsverfahren [8]:

- Analytische Rechenverfahren,
- Zonenmodelle und
- Feldmodelle (CFD-Modelle).

Die Zonenmodelle und die CFD-Modelle zählen hierbei zu den numerischen Verfahren, lassen sich also nur mit Hilfe eines Computers berechnen.

#### Analytische Rechenverfahren

Die analytischen Rechenverfahren sind Handrechenverfahren, die sich auf stark vereinfachte Annahmen stützen. Mit ihnen lassen sich z. B. Temperaturen über dem Brandherd oder Heißgasschichten unter Decke in sehr einfacher Geometrie bestimmen. Komplexere Objekte und zeitabhängige Größen lassen sich hiermit nicht berechnen.

#### Zonenmodelle

Bei dem Zonenmodell wird ein Brandraum in Zonen, sog. Kontrollvolumina, aufgeteilt. Bei dem Ein-Zonenmodell, auch Vollbrandmodell, ist der gesamte Raum ein Kontrollvolumen. Dies setzt jedoch voraus, dass im gesamten Raum homogene Verhältnisse, beispielsweise hinsichtlich der Temperatur und der Gasdurchmischung, herrschen. Um sich näher an die Wirklichkeit anzunähern, wird das Zwei-Zonenmodell verwendet. Hier werden eine Heißgasschicht unterhalb der Decke und eine Kaltgasschicht im unteren Bereich des Raumes betrachtet. Für jedes Kontrollvolumen und die Wechselwirkung zwischen ihnen werden jeweils die Erhaltungsgleichungen der Strömungsmechanik numerisch gelöst.

#### Feldmodelle (CFD-Modelle)

Feldmodelle werden auch als CFD-Modelle bezeichnet. CFD steht hier für Computational Fluid Dynamics. Im Gegensatz zu den Zonenmodellen wird hier das Objekt von einem Gitternetz durchzogen, indem man jede Gitterzelle einzeln berechnet. Während die Zonenmodelle nur Durchschnittswerte für größere Bereiche liefern können, kann man mit den Feldmodellen eine hohe lokale Auflösung erreichen. Hierdurch eignet sich das Feldmodell auch zu Brandsimulation von Bränden im Freien. Nachteilig ist, dass sie eine hohe Rechenleistung benötigen und die Simulation je nach Komplexität und Auflösung des Gitternetzes lange Rechenzeiten hat. Die Berechnung basiert auf der numerischen Strömungsberechnung. Hierauf wird im Kapitel 1.2 näher eingegangen.

## 5.2 Grundlagen der numerischen Strömungsberechnung im Feldmodell

Die Berechnungen des Feld- oder CFD-Modellnumerischen basiert auf den Navier-Stokes-Gleichungen [1]. Sie werden auch die fünf Erhaltungsgleichungen der Strömungsmechanik genannt. Diese besagen, dass Masse, Impuls und Energie in einem System erhalten bleiben.

Die fünf Erhaltungsgleichungen sind [23]:

- Massenerhaltung
- Impulserhaltung in x-Richtung
- Impulserhaltung in y-Richtung
- Impulserhaltung in z-Richtung
- Energieerhaltung

Für das CFD-Modell wird das Objekt mit einem dreidimensionalen Gitter durchspannt. Es besteht aus einer endlichen Anzahl Gitterzellen und jede Gitterzelle ist ein Volumenelement endlicher Größe. Sowohl Anzahl als auch die Größe bzw. das Volumen der Volumenelemente ist hierbei über die Zeit konstant [24].

Die Erhaltungsgleichungen werden für jeden Zeitschritt für jede Gitterzelle berechnet. Sie besagen, dass die Änderung über die Zeit dem Zu- bzw. Abgang über die Grenzflächen der Gitterzellen entspricht. Umgestellt ausgedrückt bedeutet dies, dass in der Gitterzelle die gleiche Masse, der gleiche Impuls und die gleiche Energie vorhanden ist, wie in dem Zeitschritt zuvor abzüglich bzw. zuzüglich dem, was über die Grenzflächen in die benachbarten Gitterzellen abgegangen bzw. aus ihnen hinzugekommen ist [24].

Neben den Navier-Stokes-Gleichungen sind zur Lösung noch weitere Gleichungen notwendig. Dies sind die thermische Zustandsgleichung, die kalorischen Zustandsgleichungen sowie die Stokesschen Beziehungen. Die thermische Zustandsgleichung zeigt die Beziehungen zwischen dem Druck mit der Dichte und der Temperatur. Die kalorischen Zustandsgleichungen zeigen die Beziehung zwischen der spezifischen inneren Energie und der spezifischen Enthalpie mit der Temperatur. Die Stokesschen Beziehungen zeigen die Zusammenhänge der für die Impulserhaltungsgleichung relevanten Spannungen mit den Geschwindigkeiten. Zusätzlich sind für die Berechnung Randbedingungen nötig. Diese werden zum Teil vorgegeben, zum anderen Teil berechnet. Als Grundregel gilt, dass die Randbedingungen, die von außen an das Rechengebiet kommen, vorgegeben sein müssen und dass die Randbedingungen, aus von innen an den Rand kommen, berechnet werden müssen. Beispiele für

Randbedingungen sind der Zustrom in das Rechengitter oder der Abstrom aus dem Rechengitter heraus [24].

### 5.3 Fire Dynamics Simulator als Feldmodell

Der Fire Dynamics Simulator, kurz FDS, ist eine freie Software zur Brandsimulation, die federführend von dem US-amerikanischen *National Institute of Standards and Technology* (NIST) entwickelt wurde. Als Ergänzungsprogramm wird zu FDS standardmäßig Smokeview mitgeliefert. Smokeview ist eine Erweiterung, die die Ergebnisse von FDS in Bildern und Animation visualisiert. FDS benutzt als Feldmodell zur Strömungsberechnung die Navier-Stokes-Gleichungen [25]. Für die Berechnung der aus der Verbrennung entstehenden Produkte nutzt es ein *Mixture Fraction Combustion Model*. In diesem Modell werden die Verbrennungsprodukte mittels einer allgemeinen Reaktionsgleichung aus den Stoffanteilen des Brennstoffes berechnet. Die Verbrennungsprodukte werden dabei auch über Ausbeuten und Entstehungsraten vorgegeben. Über der Brennstoffoberfläche wird unter Zuhilfenahme des Mischungsverhältnisses von Brennstoff, Sauerstoff und Brandprodukten die weitere Verbrennung beschrieben. Durch die Möglichkeit einer zweistufigen Berechnung, in der Brennstoff zuerst zu Kohlenmonoxid reagiert und erst in einem zweiten Schritt zu Kohlendioxid oxidiert, lässt sich auch eine unvollständige Verbrennung unter Sauerstoffmangel darstellen. Die Abbrandrate wird aus der vorgegebenen flächenspezifischen Wärmefreisetzungsrate berechnet [8], [26].

Das von FDS genutzte Gitternetz besteht aus rechtwinkligen Quadern. Die Genauigkeit der Berechnung ist dabei von der Anzahl der Gitterzellen pro Raumvolumen abhängig. Auf die Rechenzeit hat feldmodelltypisch die Gesamtzahl der Gitterzellen Einfluss.

Die Geometrie von Objekten wird aus rechtwinkligen Quadern zusammengesetzt. Die Grenzflächen an den Rändern des Gitternetzes können offen (Medien können frei abströmen) oder geschlossen (wie eine Wand) sein. Auch ist es möglich, sie als Ventilationsöffnungen zu definieren, z.B. um einen Luftstrom in das Gitternetz hinein zu simulieren. FDS benötigt als Eingabedatei eine Textdatei. Hier werden alle Eingabeparameter definiert. Es lassen sich eine Vielzahl von Messpunkten definieren. Hier können verschiedene Parameter, wie die Höhe der raucharmen Schicht, Temperaturen oder Masseströme gemessen werden. Alle ermittelten Werte werden in einer Ausgabedatei wiedergegeben [27].

## 6 Definition des Flugzeugmodells

Die Grundlage des Flugzeugmodells bildeten der Airbus A320. Die A320 stellt das Basismodell der A320-Familie da. Die A320-Familie besteht aus den Typen A318, A319, A320 und A321. Die verschiedenen Modelle der Familie sind nahezu baugleich und unterschieden sich lediglich in der Länge. In der gesamten A320-Familie wurden bereits über 6000 Flugzeuge gebaut und es liegen über 4000 Bestellungen vor [28].

Mit ihrer Reichweite von ca. 6000 km wird sie typischerweise auf Kurz- (z. B. Frankfurt – Hamburg) und Mittelstrecken (z. B. New York – Los Angeles) eingesetzt. Vereinzelt wird sie auch auf Strecken eingesetzt, die sich an der Grenze zur Langstrecke bewegen (z. B. London – New York) [12], [28].

Die A320 ist ein Schmalrumpfflugzeug mit einem Gang. In der typischen Sitzkonfiguration mit zwei Reiseklassen bietet es 150 Personen Platz. Die maximale Passagierzahl beträgt 180. Sie ist ein Tiefdecker, die Tragflächen sind unterhalb des Rumpfes angeordnet und sie verfügt über zwei Mantelstromtriebwerke unterhalb der Tragflächen und ein Hilfstriebwerk im Heck. Die Treibstofftanks befinden sich in den Tragflächen und im Flügelmittelkasten. Sie haben eine Kapazität von 23859 Litern. Zusätzlich können an der Vorderwand des hinteren Frachtraums, unmittelbar hinter dem Flügelmittelkasten, zwei weitere Tanks verbaut werden. Mit diesen zusätzlichen Tanks kommt die A320 auf eine Treibstoffkapazität von 26759 Litern mit einem Zusatztank bzw. auf 29659 Liter mit zwei Zusatztanks. Sie hat auf jeder Seite zwei Türen sowie zusätzlich je zwei Notausstiegsfenster oberhalb der Tragflächen. Vor den Notausstiegen befinden sich einbahnige Notrutschen, bzw. bei den Tragflächennotausstiegen führen einbahnige Notrutschen von den Tragflächen [29].

FDS lässt nur einfache, rechteckige Formen innerhalb des gewählten 0,2 m-Rasters zu. Die Geometrie der A320 wird stark vereinfacht in dieses Raster eingefügt. Die Kabine wird als rechteckiger Kasten mit einer Länge von 25 m innen bzw. 25,4 m außen und einer Innenhöhe von 2,2 m dargestellt. Der vordere und hintere Türbereich ist jeweils mit einer Trennwand 1,6 - 1,8 m vom Kabinenende entfernt abgetrennt. In den Trennwänden ist mittig ein 1,2 m breiter Durchgang. In dem Inneren der Kabine, zwischen den Trennwänden, werden die Gepäckfächer unmittelbar an der Kabinendecke, an den Außenwänden durch einfache Quader dargestellt. Die Quader haben eine Breite von 1,2 m und eine Höhe von 0,6 m. Auf die Darstellung vom Sitzen wird verzichtet, da sie auf die Strömung der Rauchschiicht unterhalb der Decke und auf die Qualität der raucharmen Schicht keinen Einfluss haben.



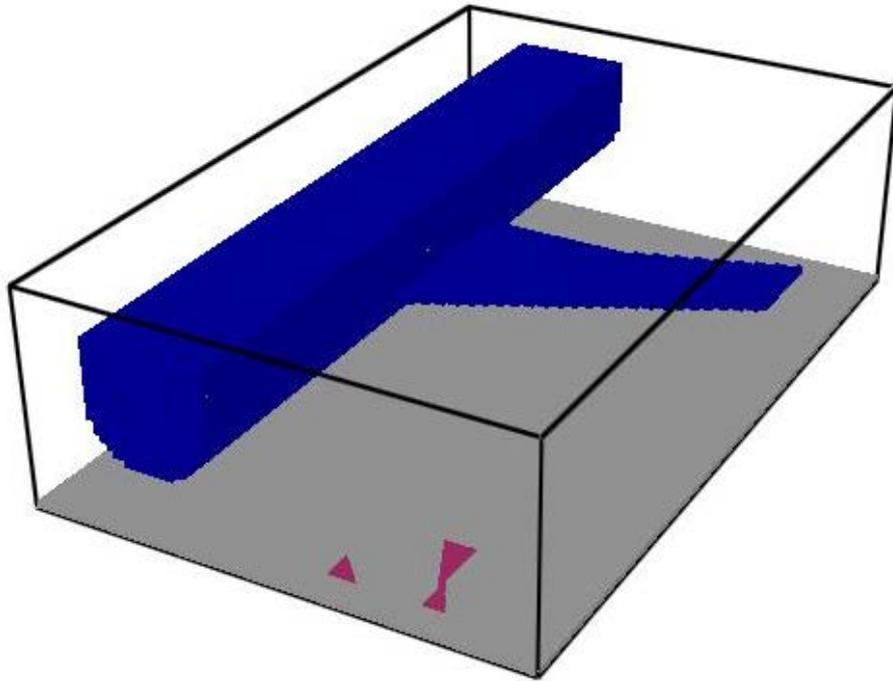


Abbildung 6.3: 3D-Ansicht Flugzeugmodell

## 7 Durchführung von ingenieurmäßigen Nachweisen

In diesem Kapitel werden die Bemessungsbrandszenarien entworfen und die Eingabedaten für das Simulationsprogramm festgelegt.

### Szenarien

Für die Bemessungsbrände werden „most credible“-Szenarien entworfen. Ein „worst case“-Szenario wird nicht entworfen, da die Eintrittswahrscheinlichkeit sehr gering ist [8].

Für alle Szenarien gelten folgende Rahmenbedingungen: Ein Flugzeug befindet sich stehend auf dem Rollfeld. An Bord befinden sich 180 Personen zuzüglich der Besatzung. Die Besatzung besteht aus 2 Piloten und 4 Flugbegleitern. Die Zahl der Flugbegleiter ergibt sich aus den Vorschriften zur Mindestkabinenbesatzung nach [6]. Alle Passagiere befinden sich auf ihren Sitzen. An den vorderen und den hinteren Türen befinden sich jeweils 2 Flugbegleiter auf den ihnen zugewiesenen Plätzen. Auf der linken Seite des Flugzeugs befindet sich eine Treibstoffflache mit einer Fläche von 12 m<sup>2</sup>, die in Brand gerät. Der Brandort befindet sich je nach Szenario vor der vorderen Tür oder unter der Tragfläche. Mit dem Start der Simulation wird die Evakuierung eingeleitet. 10 Sekunden nach Einleitung der Evakuierung sind alle Türen auf der rechten, dem Feuer abgewandten Seite sowie der Notausgang auf der linken Seite, vor dem sich der Brandort befindet, geöffnet. Die auf der linken Seite geöffnete Tür wurde von einem Flugbegleiter oder einem Passagier fälschlicherweise geöffnet und steht zur Notfallevakuierung nicht zur Verfügung. Zum Vergleich wird für jeden Brandort ein Szenario definiert, in dem keine Tür auf der linken, dem Brand zugewandten Seite geöffnet wird. Jedes Szenario wird einmal mit und ohne Wind durchgeführt. Der Wind weht mit einer Geschwindigkeit von 2,5 m/s rechtwinklig auf den Flugzeugrumpf zu. Während der Evakuierung stehen an den vorderen und hinteren Türen Flugbegleiter, um die Evakuierung zu lenken. An den Tragflächennotausstiegen befinden sich keine Flugbegleiter.

**Tabelle 4: Szenarien**

Szenario	Brandort	Geöffnete Notausgänge auf der linken Seite	Wind
1a	Vor vorderer, linker Tür	Vordere Tür	Ja
1b	Vor vorderer, linker Tür	Keine	Ja
1c	Vor vorderer, linker Tür	Vordere Tür	Nein
1d	Vor vorderer, linker Tür	Keine	Nein
2a	Unter linker Tragfläche	Tragflächennotausstiege	Ja
2b	Unter linker Tragfläche	Keine	Ja
2c	Unter linker Tragfläche	Tragflächennotausstiege	Nein
2d	Unter linker Tragfläche	Keine	Nein

### Treibstofffläche

Es wird angenommen, dass die Treibstofffläche durch eine Leckage in einem Tragflächentank eines Flugzeuges entstanden ist. Verkehrsflugzeuge mit Strahltriebwerken werden typischerweise mit Kerosin betankt [10]. Kerosin ist ein aus Erdöl gewonnener Treibstoff und zählt zu den Kohlenwasserstoffen. Bei der Destillation von Erdöl fällt es zwischen den Benzinen und den Dieselmotortreibstoffen an. Der Handelsname als Fluggasttriebmittel ist Jet A-1. Als Summenformel wird nach [1]  $C_{14}H_{30}$  angegeben. Bei der Verbrennung unter gut belüfteten Bedingungen sind pro Gramm Brennstoff 0,012 g Kohlenmonoxid und 0,042 g Ruß in den Abgasen enthalten. Der spezifische Heizwert beträgt 44 MJ/kg. Nach [30] beträgt die flächenspezifische Abbrandrate 160 kg/(m<sup>2</sup>h). Unter Anwendung der in [31] angegebenen Formel für die Wärmefreisetzungsrate pro Fläche:

$$\dot{Q}' = \dot{m}'' \cdot H_u \cdot \chi$$

mit:  $\dot{m}''$  flächenspezifische Abbrandrate (kg/(sm<sup>2</sup>)),  
 $H_u$  unterer Heizwert (MJ/kg),  
 $\chi$  Verbrennungseffektivität (1)

ergibt sich eine flächenspezifische Wärmefreisetzungsrate von 1956 kW/m<sup>2</sup>.

Als Simulationsdauer werden 180 Sekunden gewählt.

### Raum und Rechengitter

Für den zu berechnenden Raum wird ein Raum mit einer Tiefe von 25,4 m, einer Breite von 16,2 m und einer Höhe von 7,2 m gewählt. Dieser Raum wird mit einem Rechengitter mit 127 mal 81 mal 36 Zellen durchspannt. Dieses entspricht einer Zellengröße von 0,2 m mal 0,2 m mal 0,2 m und einer Gesamtzahl von 370332 Zellen. Der Raum ist bis auf die Unterseite (z-

min) in allen Richtungen offen, d. h. Masse kann frei abströmen. Die Unterseite ist eine 0,2 m hohe Asphaltfläche. In den Szenarien mit Wind ist die y-min-Seite eine vollflächige Ventilationsöffnung, die eine Luftströmung von 2,5 m/s in den Raum gibt. In den Szenarien ohne Wind ist auch diese Fläche offen. Die Treibstofffläche ist eine Fläche auf dem Rollfeld. Die Form mit der Fläche von 12 m<sup>2</sup> ist einem Kreis mit einem Durchmesser von 3,9 m angenähert. Der Rumpf und die Flügel sind wie in Kapitel 6 beschrieben aus einzelnen Quadern zusammengesetzt. Die Türöffnungen sind als Löcher in den y-Min und y-Max-Außenwänden der Kabine definiert. Sie sind mit einem Timer so geschaltet, dass sie sich erst nach 10 Sekunden öffnen.

### Messpunkte

Auf der horizontalen Ebene sind 22 Punkte festgelegt, an denen Messwerte für verschiedene Parameter ermittelt werden. Die Position auf der z-Achse variiert je nach Zweckmäßigkeit für das jeweilige Parameter.

An der Außenhaut der linken Seite des Flugzeugsrumpfes sind links und rechts der vorderen Tür, zwischen den Tragflächennotausstiegen und an der geschlossenen hinteren Tür Messpunkte, die die Wärmestrahlung, die auf die Oberfläche einwirkt, erfassen.

Im Inneren der Kabine befinden sich auf der Mittelachse zwischen den Notausgängen jeweils drei Messpunkte. In den Durchgängen zwischen den Kabinentrennwänden befindet sich je ein Messpunkt. Im Längsgang, auf der Längsachse des Rumpfes, befinden sich zwischen der vorderen Kabinentrennwand und dem vorderen Tragflächennotausstieg sowie zwischen dem hinteren Tragflächennotausstieg und der hinteren Kabinentrennwand jeweils zwei Messpunkte. Die Messpunkte im Inneren der Kabine erfassen jeweils

- die Höhe der raucharmen Schicht,
- die Temperatur in der Rauchsicht,
- die Temperatur der raucharmen Schicht,
- den Extinktionskoeffizienten in Augenhöhe und in 1 m Höhe,
- den Masseanteil in Augenhöhe und in 1 m Höhe von
  - Kohlendioxid,
  - Kohlenmonoxid und
  - Sauerstoff sowie
- die Wärmestrahlung, die auf den Fußboden einwirkt.

Auf die Messung von Cyanwasserstoff (HCN) wird verzichtet, da bei der Verbrennung von Kerosin als Kohlenwasserstoffverbindung ohne Stickstoffanteile mit keinem Auftreten dieser

Stickstoffverbindung zu rechnen ist. Als Augenhöhe wird die Augenhöhe von 95 Perzentil der Männer zwischen 18 und 65 Jahren nach DIN 33402-2 auf ein Zehntel abgerundet mit 1,7 m angegeben. Die Werte des Extinktionskoeffizienten und der Masseanteile werden zusätzlich auf der Höhe von 1 m ermittelt, um bei einer Unterschreitung der raucharmen Schicht von 1,7 m noch Werte aus der raucharmen Schicht zur Verfügung zu haben. Die Liste der Messpunkte, ihre ungefähre Lage und ihre Position auf der x-y-Ebene ist in der folgenden Tabelle angegeben. Die mit \* markierten Punkte sind die Messpunkte an der Außenhaut, die lediglich die Wärmestrahlung erfassen. Alle anderen Messpunkte erfassen alle Werte wie in der oben angegebenen Aufzählung.

**Tabelle 5: Messpunkte<sup>5</sup>**

Name	Lage	x	y
Vorne y110	Vorderer Türbereich	0,9	11,0
Vorne y120	Vorderer Türbereich	0,9	12,0
Vorne y130	Vorderer Türbereich	0,9	13,0
Trennwand Vo	Zwischen vorderen Kabinentrennwänden	1,9	12,0
TragVo y110	Vorderer Tragflächennotausstiegsbereich	11,3	11,0
TragVo y120	Vorderer Tragflächennotausstiegsbereich	11,3	12,0
TragVo y130	Vorderer Tragflächennotausstiegsbereich	11,3	13,0
TragHi y110	Hinterer Tragflächennotausstiegsbereich	12,1	11,0
TragHi y120	Hinterer Tragflächennotausstiegsbereich	12,1	12,0
TragHi y130	Hinterer Tragflächennotausstiegsbereich	12,1	13,0
Trennwand Hi	Zwischen hinteren Kabinentrennwänden	23,5	12,0
Hinten y110	Hinterer Türbereich	24,5	11,0
Hinten y120	Hinterer Türbereich	24,5	12,0
Hinten y130	Hinterer Türbereich	24,5	13,0
Gang x050	Längsgang vordere Kabinenhälfte	5,0	12,0
Gang x082	Längsgang vordere Kabinenhälfte	8,2	12,0
Gang x159	Längsgang hintere Kabinenhälfte	15,9	12,0
Gang x197	Längsgang hintere Kabinenhälfte	19,7	12,0
Aussen VoLi*	Außenhaut links von vorderer, linker Tür	0,2	10,0
Aussen VoRe*	Außenhaut rechts von vorderer, linker Tür	1,6	10,0
Aussen TragVo*	Außenhaut zwischen linken Tragflächennotausstiegen	11,6	10,0
Aussen HiLi*	Außenhaut an Tür hinten links	24,5	10,0

<sup>5</sup> Um Probleme mit der Zeichenkodierung in der FDS-Eingabedatei zu vermeiden, wurden bei der Benennung der Messpunkte nur Zeichen aus dem UTF-8-Zeichensatz verwendet. Der Buchstabe „ß“ wurde dementsprechend durch „ss“ ersetzt.

## Verfahren zu Auswertung

Für die Beurteilung der Erfüllung der Leistungskriterien müssen die Aufgaben der einzelnen Messpunkte in die quantitativen Skalen der funktionellen Anforderungen ermittelt werden. Da die Flucht jedoch ein Prozess ist, in dem sich die flüchtenden Personen durch den Raum bewegen, ist es nicht zielführend, die Parameter nur für einzelne Punkte zu bestimmen. Viel mehr muss der Fluchtweg als Ganzes betrachtet werden.

Zunächst werden jedoch für jeden Messpunkt folgende Werte ermittelt:

Mit Hilfe einer Excel-Tabelle werden für jeden Messpunkt in der inneren Kabine folgende Werte ermittelt:

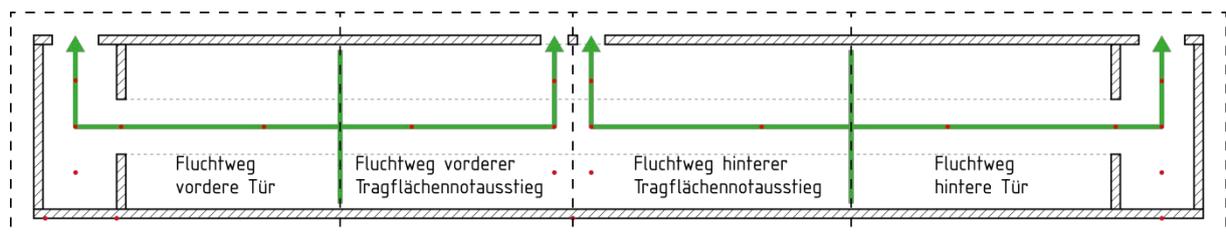
- Zeit, nach der raucharmen Schicht  $< 1,8$  m ist (KAPITEL ANGEBEN),
- Zeit, nach der  $F_{\text{Thermisch}} \geq 1$  ist,
- Zeit, nach der  $F_{\text{Toxisch}} \geq 1$  ist.

Für folgende Werte werden die Ergebnisse jeweils als Mittelwerte für 10 Sekundenintervalle angegeben:

- Erkennungsweite für Zeichen mit elektrischer Hintergrundbeleuchtung (1 m Höhe),
- Erkennungsweite für Zeichen mit elektrischer Hintergrundbeleuchtung (1,7 m Höhe) und
- die durch den Einfluss von Rauch geminderte Bewegungsgeschwindigkeit und
- Höhe der raucharmen Schicht.

Die durch den Rauch beeinflusste Bewegungsgeschwindigkeit wird dabei als einziger Wert nicht berechnet, sondern aus der Abbildung 4.1 abgelesen.

Zur Beurteilung der Fluchtwege werden die Parameter der für die Beurteilung der Erfüllung der Leistungskriterien für jeden Fluchtweg einzeln ermittelt. Zu jedem Notausgangspaar führt ein Fluchtweg, dementsprechend gibt es vier Fluchtwege.



**Abbildung 7.1: Fluchtwege (rote Punkte: Messpunkte, grüne Linien: Fluchtwege)**

Zunächst wird jeder der vier Fluchtwege in jeweils zwei Wegelemente zerlegt. Für die vordere und hintere Tür sind dies der Weg von dem am weitesten vom Notausgang entfernten Sitzplatz zum Längsgang, der Weg von hier bis zur Kabinentrennwand und der Weg von der Kabinentrennwand bis zur Tür. Für die beiden Tragflächennotausstiege ist dies der Weg vom am weitesten vom Notausgang entfernten Sitzplatz zum Längsgang, der Weg über den Längsgang zum Beginn des zum Ausstieg führenden Querganges sowie der vom Längsgang zum Notausstieg führende Quergang. Für jeden Fluchtweg wird die Evakuierungszeit mit dem in Kapitel 4.4 beschriebenen Handrechenverfahren berechnet. Es wird angenommen, dass alle Notausgänge gleichmäßig benutzt werden. Somit wird jeder Notausgang von 45 Personen genutzt. Für die Berechnung der Weglängen wird angenommen, dass jeder Fluggast den nächstgelegenen Notausgang benutzt. Die Personendichte wird bei 180 Personen auf einer Gesamtfläche von ca. 90 m<sup>2</sup> mit 2 P./m<sup>2</sup> als „Optimal“ angenommen. Engstellen sind jeweils die Notausgänge an sich und bei der vorderen und hinteren Tür der Durchgang durch die Kabinentrennwand bzw. bei den Tragflächennotausstiegen der Quergang zwischen den Passagiersitzen zu den Ausstiegen. Die Breite des Durchgangs zwischen den Passagiersitzen zu den Tragflächennotausstiegen ist im Modell nicht definiert und wird mit der in [8] geforderten Mindestbreite von 0,51 m angenommen.

**Tabelle 6: Fluchtwege, Weglängen und Durchgangsbreiten**

Fluchtweg zum Notausstieg	Wegabschnitt 1			Wegabschnitt 2 (Tür)		
	Kürzester Weg (L <sub>min</sub> )	Breite (B)	Längster Weg (L <sub>max</sub> )	Kürzester Weg (L <sub>min</sub> )	Breite (B)	Längster Weg (L <sub>max</sub> )
Vordere Tür	0 m	1,2 m	6,5 m	3,0 m	1 m	3,0 m
Vorderer Tragflächennotausstieg	0 m	0,51 m	8,5 m	0 m	0,6 m	0 m
Hinterer Tragflächennotausstieg	0 m	0,51 m	9,5 m	0 m	0,6 m	0 m
Hintere Tür	0 m	1,2 m	7,5 m	3,0 m	1 m	3,0 m

Die Evakuierungsdauer für jeden Wegabschnitt ist dabei gleichzeitig die maximale Aufenthaltsdauer. Für die Berechnung, ob und wann  $F_{\text{Thermisch}}$  und  $F_{\text{Toxisch}}$  den Wert 1 erreichen bzw. überschreiten, werden die Durchschnittswerte der Messpunkte im Bereich des Fluchtweges herangezogen. Die Durchschnittswerte werden aus den sich an dem

jeweiligen Wegelement nächsten befindlichen Messpunkt mit einer Gewichtung des Weganteils an der gesamten Weglänge gemittelt. Wenn für eine Strecke zwei Messpunkte gleichweit von der Strecke entfernt ist, wird das arithmetische Mittel dieser beiden Messpunkte als der nächstgelegene Messpunkt betrachtet. Weiter wird anhand der Ergebnisse für die Messpunkte in dem Bereich ermittelt, ob und wann auf dem Fluchtweg  $F_{\text{Thermisch}}$  und  $F_{\text{Toxisch}}$  den Wert 1 erreichen, wie hoch die raucharme Sicht ist und nach wie vielen Sekunden sie die Mindesthöhe von 1,8 m unterschreitet, wie hoch die Erkennungsweite für selbstleuchtende Notausgangsschilder ist und wie stark die Bewegungsgeschwindigkeit abnimmt.

## 8 Darstellung der Ergebnisse

### 8.1 Evakuierungsdauer

Tabelle 7: Ergebnisse Evakuierungsberechnung

Fluchtweg	Wegabschnitt 1		Wegabschnitt 2 (Tür)		$\Sigma t_{Weg}$	Dauer der Evakuierung ( $t_{Evakuierung}$ )
	$t_{Passage}$	$t_{Weg}$	$t_{Passage}$	$t_{Weg}$		
Vordere Tür	28,8 s	10,8 s	37,3 s	5,0 s	15,8 s	37,3 s
Vorderer Tragflächennotausstieg	67,9 s	14,2 s	53,6 s	0,0 s	14,2 s	67,9 s
Hinterer Tragflächennotausstieg	67,9 s	15,8 s	53,6 s	0,0 s	15,8 s	67,9 s
Hintere Tür	28,8 s	12,5 s	37,3 s	5,0 s	17,5 s	37,3 s

Demnach ist das Flugzeug laut der Kapazitätsanalyse nach 67,9 s vollständig evakuiert.

### 8.2 Szenario 1a

#### 8.2.1 Fluchtweg vordere Tür

Im Wegabschnitt 1 erreicht weder  $F_{Thermisch}$  noch  $F_{Toxisch}$  den Wert 1. Im Wegabschnitt 2, dem Türbereich, erreicht  $F_{Toxisch}$  auf Augenhöhe (1,7 m) nach 90 Sekunden den Wert 1.  $F_{Toxisch}$  auf 1 m und  $F_{Thermisch}$  bleiben dauerhaft deutlich unter 1. Auf dem gesamten Fluchtweg sinkt die Höhe der raucharmen Schicht nach 10-20 Sekunden unter die Mindesthöhe von 1,8 m und bewegt sich für die restliche Dauer auf einer Höhe von ca. 1 m. Unmittelbar vor der Tür vorne rechts ist sie im Schnitt höher und erreicht hier Werte zwischen 1 und 1,7 m. Die Erkennungsweite in Augenhöhe für hintergrundbeleuchtete Notausgangsbeschilderung sinkt im Wegabschnitt 1 nach 30-40 Sekunden auf 10 m ab und bewegt sich hiernach bis zum Ende zwischen 7,5 und 9 Metern. In 1 m Höhe sinkt die Erkennungsweite nach ca. 90 Sekunden erstmals unter 15 m und bewegt sich von da an zwischen 10 und 12 m. Zwischen den vorderen Kabinentrennwänden beträgt sie auf Augenhöhe ab 20-30 Sekunden 5,5 - 7 m. In 1 m Höhe bleibt sie zwischen 7,5 und 13 m. Im Bereich der vorderen Tür unterschreitet sie bereits kurz nach dem öffnen der Türen 9 m und bewegt sich auf Augenhöhe zwischen 6 und 8 m und auf 1 m Höhe zwischen 7,5 und 12 m. Der Extinktionskoeffizient erreicht im Bereich vor der Kabinentrennwand nach 20-30 Sekunden und im Türbereich nach 10-20 Sekunden Werte, die die Bewegungsgeschwindigkeit auf unter 0,54 m/s reduzieren.

### **8.2.2 Fluchtweg vorderer Tragflächennotausstieg**

Auf dem Fluchtweg zum vorderen Tragflächennotausstieg werden keine kritischen Schadstoffwerte erreicht und die Hitze bleibt in einem geringen Bereich. Dementsprechend gehen  $F_{\text{Thermisch}}$  und  $F_{\text{Toxisch}}$  nicht über den Wert 0 hinaus. Die Höhe der raucharmen Schicht unterschreitet auf dem Längsgang nach 20-30 Sekunden den Wert von 1,8 m und bewegt sich von da an bei ca. 1 m. Im Zugang zum Tragflächennotausstieg wird nach ca. 60 Sekunden die Mindesthöhe von 1,8 m unterschritten und bleibt hiernach zwischen 1,5 und 1,8 m. Die Erkennungsweite im Mittelgang auf Augenhöhe sinkt nach 30-40 Sekunden auf ca. 10 m und nimmt von hier an kontinuierlich bis auf einen Wert von 7,6 m am Ende ab. Die Erkennungsweite auf 1 m Höhe sinkt nach ca. 60 s auf unter 20 m und nimmt bis 120 bis 130 s bis 10 m weiter ab und bleibt von hier an ungefähr auf diesem Wert. Die Erkennungsweite auf 1 m Höhe in dem Quergang zum Tragflächennotausstieg zwischen den Sitzen sinkt nach ca. 60 s auf unter 20 m, nach 100 s bis zum Ende beträgt sie ca. 10 m. Die Bewegungsgeschwindigkeit wird ab Sekunde 20 bis 30 auf 1 m/s und ab Sekunde 30 bis 40 auf unter 0,54 m/s begrenzt

### **8.2.3 Fluchtweg hinterer Tragflächennotausstieg**

Auf dem Fluchtweg zum hinteren Tragflächennotausstieg bleibt die Schadstoffkonzentration in einem geringen Bereich, so dass bei den Werten  $F_{\text{Thermisch}}$  und  $F_{\text{Toxisch}}$  kein Ausschlag zu verzeichnen ist. Die raucharme Schicht unterschreitet 1,8 m nach 30 s und nimmt bis zu Sekunde 50 weiter bis auf 1 m ab und behält diesen Wert bis zum Ende bei. Die Erkennungsweite unterschreitet 10 m nach 30 bis 40 s und sinkt nach 100 s bis zum auf 7,5 bis 8 m. Die Erkennungsweite auf 1 m Höhe in dem Quergang zum Tragflächennotausstieg zwischen den Sitzen sinkt nach ca. 60 s auf unter 20 m, nach 100 s bis zum Ende beträgt sie ca. 10 m. Der Extinktionskoeffizient erreicht nach 40 s einen Wert, der die Bewegungsgeschwindigkeit auf unter 0,54 m/s reduziert.

### **8.2.4 Fluchtweg zur Tür hinten**

Auf dem gesamten Fluchtweg bleibt die Schadstoffkonzentration so gering, dass die Werte für  $F_{\text{Thermisch}}$  und  $F_{\text{Toxisch}}$  für die gesamte Simulationsdauer den Wert 0 beibehalten. In dem Wegabschnitt 1 (Sitzplatz bis hintere Kabinentrennwand) als auch im Wegabschnitt 2 (Türbereich) wird die kritische Höhe für die raucharme Schicht nach ca. 30 s unterschritten und bewegt sich danach bei 0,6 bis 0,9 m. Die Erkennungsweite auf Augenhöhe in beiden Wegabschnitten sinkt zwischen Sekunde 40 und 50 auf 11 m und nimmt dann weiter bis zu 7 m am Ende ab. In 1 m Höhe bewegt sie sich zwischen Sekunde 60 und 120 im Bereich 10 bis 20 m bis sie danach 8,6 bis 10 m beträgt. Die Gehgeschwindigkeit ist ab Sekunde 40 bis 50 auf unter 0,54 m/s gemindert.

### **8.2.5 Wärmestrahlung an den linken Türen**

Die Wärmestrahlung an der vorderen, linken Tür erreicht einen Durchschnittswert von ca.  $9 \text{ kW/m}^2$  mit einem Maximum von  $23,89 \text{ kW/m}^2$ . An den anderen linken Türen wird zu keiner Zeit  $1 \text{ kW/m}^2$  überschritten.

### **8.3 Szenario 1b**

Bei sämtlichen Werten innerhalb der Kabine des Szenarios 1b ist keine signifikante Änderung zu dem Zustand, wie er ohne Feuer wäre, festzustellen. Die Werte für die Wärmestrahlung an den Türen entspricht denen des Szenario 1a.

### **8.4 Szenario 1c**

Bis auf die Wärmestrahlung ist keine negative Veränderung der Werte festzustellen. Die Wärmestrahlung ergibt nur im vorderen Türbereich nennenswerte Ausschläge, diese sind maximal  $1 \text{ kW/m}^2$ , was zu einem  $F_{\text{Thermisch}}$  von 0,01 führt. Die Strahlungswärme an der vorderen linken Tür beträgt im Durchschnitt  $11,13 \text{ kW/m}^2$  und hat ein Maximum von  $23 \text{ kW/m}^2$ . An den Tragflächennotausstiegen auf der linken Seite sind im Mittel  $1,24 \text{ kW/m}^2$  zu messen. Maximal werden hier  $2,66 \text{ kW/m}^2$  erreicht. An dem hinteren linken Notausgang wird der Wert von  $0,3 \text{ kW/m}^2$  nicht überschritten.

### **8.5 Szenario 1d**

Es lässt sich keinerlei Einfluss des Feuers auf den Innenraum feststellen. Die Werte für die Messpunkte an den linken Flugzeigtüren entsprechen denen des Szenarios 1c.

### **8.6 Szenario 2a**

Im Szenario 2a lässt sich nur ein geringer Einfluss auf das Kabineninnere feststellen.  $F_{\text{Thermisch}}$  und  $F_{\text{Toxisch}}$  haben keinen Ausschlag, ebenso nimmt die raucharme Schicht gar nicht bzw. im Bereich der Tragflächennotausgänge nur um  $0,1 \text{ m}$  ab. Der Extinktionskoeffizient steigt stellenweise auf  $0,1 \text{ m}^{-1}$ , hier bleibt die Erkennungsweite jedoch über  $100 \text{ m}$  und die Bewegungsgeschwindigkeit nimmt hierdurch nicht signifikant ab. Die Strahlungswärme an den linken Türen bewegt sich hier unterhalb von  $1 \text{ kW/m}^2$ .

### **8.7 Szenario 2b**

Es lässt sich keinerlei Einfluss des Feuers auf den Innenraum feststellen. Die Werte für die Strahlungswärme an den linken Türen entsprechen denen aus Szenario 2a.

## **8.8 Szenario 2c**

Es lässt sich keinerlei Einfluss des Feuers auf den Innenraum feststellen. An den linken Notausgängen bewegt sich die Strahlungswärme unter  $1 \text{ kW/m}^2$  mit Ausreißen an den Tragflächennotausstiegen, die hier in einzelnen Sekunden auf bis zu  $4,87 \text{ kW/m}^2$  ansteigt.

## **8.9 Szenario 2d**

Es lässt sich keinerlei Einfluss des Feuers auf den Innenraum feststellen. Die Daten für die Wärmestrahlung an den linken Türen entspricht denen des Szenarios 2c.

## 9 Diskussion

Die Ergebnisse der Simulation zeigen bei den Szenarien 1b bis 2d keine nennenswerten Auswirkungen des Feuers auf das Kabineninnere. Auch wenn bei allen Szenarien das Eindringen von Verbrennungsprodukten in die Kabine durch eine geringe Änderung von Temperatur und Extinktionskoeffizient nachweisbar ist, geschieht dies nur in so geringen Mengen, dass sie keinen Effekt auf die Evakuierung haben.

Die Auswirkungen des Feuers im Szenario 1a (Türen vorne links und alle rechten geöffnet, mit Wind) sind hingegen sehr hoch. Hier wird das Schutzziel nicht erfüllt. In der gesamten Kabine sinkt die raucharme Schicht nach spätestens 30 Sekunden, 20 Sekunden nachdem die Türen geöffnet wurden, auf unter 1,8 m und hat von da an vielerorts nur noch eine Höhe von einem Meter. Der Schadstoffeintrag ist nur im vorderen Türbereich in einer gefährlichen Höhe. Während in den anderen Bereichen der Kabine auf Grund der geringeren Konzentration das FED-Modell keine Anwendung findet, erreicht hier  $F_{\text{Toxisch}}$  nach 90 Sekunden auf Augenhöhe (1,7 m über Kabinenboden) den Wert 1. In 1 m Höhe ist jedoch bereits keine zur Handlungsunfähigkeit führende Menge an giftigen Gasen vorzufinden. Die thermische Einwirkung durch die Strahlung aus der Rauchsicht bleibt insgesamt auf einem vertretbaren Niveau. Die lichttrübende Wirkung von Rauch führt in der gesamten Kabine zu einer Behinderung. In Augenhöhe sinkt die Erkennungsweite von hintergrundbeleuchteten Zeichen schnell auf unter 10 m ab und hat im Mittel einen Wert von 7 bis 8 m. Vor diesem Hintergrund ist, davon ausgehend, dass an jedem Notausgangspaar ein Leuchtzeichen ist, von jedem Punkt der Kabine ein Notausgangszeichen zu erkennen. Kritisch wird dieser Wert, wenn ein Notausgangspaar unbenutzbar wird. So ist bei diesem Wert von einem Notausgang aus der nächstgelegene nicht mehr zu erkennen. Auf einer Höhe von 1 m ist die Erkennungsweite mit Werten um 10 m besser. Während die Sichtweite von 10 m im vorderen Türbereich sofort nach dem Öffnen erreicht wird, wird die Sicht weiter hinten langsamer schlechter bis hin zum hinteren Türbereich, der den Wert von 10 m erst nach 120 Sekunden erreicht. Bemerkenswert ist, dass im vorderen Türbereich vor der rechten Tür die Erkennungsweite besonders mit ca. 8 m um im Schnitt 3 m schlechter ist, als an dem nur einen Meter entfernten benachbarten Messpunkt.

Die Bewegungsgeschwindigkeit wird durch die Sichtminderung ebenfalls eingeschränkt. Im vorderen Türbereich nach 20 Sekunden und im Rest der Kabine nach spätestens 40 Sekunden ist ein Extinktionskoeffizient erreicht, der sich über dem empirisch ermittelten Wertebereich aus [1] bewegt. Hier kann nur angegeben werden, dass die Bewegungsgeschwindigkeit auf unter 0,54 m/s reduziert ist. Die tatsächliche Auswirkung auf die Dauer der Evakuierung kann hier nicht ermittelt werden, jedoch die schnellste

Geschwindigkeit, mit der die Evakuierung durchgeführt wird, mit 0,26 m/s deutlich unter diesem Wert beträgt. Eine Erweiterung der Werte auf einen höheren Extinktionskoeffizient ist anzudenken. Dabei ist jedoch infrage zu stellen, ob ein Mensch sich bei derart dichtem Rauch noch aufrechtgehend fortbewegt.

Zu bemerken ist die thermische Belastung durch die Strahlungswärme des Feuers, die unmittelbar an der Tür vorne links auftritt. Mit durchschnittlich 9 kW/m<sup>2</sup> ist ein Aufenthalt an dieser Position nur wenige Sekunden möglich. Ein Flugbegleiter, der an dieser Tür die Evakuierung lenkt, um so beispielsweise Fluggäste davon abzuhalten, in das Feuer hineinzurutschen, könnte seiner Aufgabe nicht nachkommen. Das Schließen der fälschlicherweise geöffneten Tür ist durch diese starke Wärmebelastung unmöglich.

Der Vergleich des Szenario 1a, bei dem die Tür vorne links trotz des Feuers geöffnet wurde, mit dem Szenario 1b, bei dem sie geschlossen blieb, zeigt, dass durch die versehentlich geöffnete Tür nahezu der gesamte Rauch eingedrungen ist. Bleibt die Tür verschlossen, kann die Evakuierung ohne Behinderung durch Verbrennungsprodukte durchgeführt werden.

Die Strahlungswärme, die an den anderen Türen bzw. bei dem Feuer unter der Tragfläche an allen Türen, auftritt, ist so gering, dass diese Türen von diesem Aspekt her für die Noträumung hätten benutzt werden können. Vor dem Hintergrund der schnellen Brandbekämpfung ohne die zusätzliche Gefährdung von Personen durch Löschmaßnahmen, bzw. die Behinderung der Löschmaßnahmen scheint die Evakuierung nur über die von dem Brand nicht betroffene Flugzeugseite dennoch sinnvoll. Sollte es während der Evakuierung jedoch zu Verzögerungen kommen, ein anderer Notausgang unbrauchbar werden oder sich die Bedingungen im Inneren soweit verschlechtern, dass die Evakuierung beschleunigt werden muss, ist das Öffnen weiterer Notausgänge zu prüfen. Hier lässt sich der Grundsatz aufstellen, dass die Gefährdung außerhalb der Kabine geringer sein muss als im Inneren. Wenn dieses Verhältnis zu Ungunsten des Kabineninneren umschlägt, müssen die Maßnahmen entsprechend angepasst werden. Da es auch außerhalb der Kabine zur Veränderung der Situation kommen kann, erscheint es als zweckdienlich, dass Flugbegleiter, die eine Tür als nicht benutzbar erklärt haben, in regelmäßigen Abständen den Bereich vor der Tür erneut kontrollieren. Sollten sich im Laufe der Evakuierung die Situation vor der Tür beispielsweise durch erfolgreiche Löschmaßnahmen der Flughafenfeuerwehr verbessert haben, könnte die zuvor nicht benutzbare Tür benutzbar werden und zu einer effektiven Evakuierung beitragen.

Die Aussagekraft des Quotienten  $F_{\text{Toxisch}}$  ist kritisch zu hinterfragen. Die Eingangswerte für die Formeln basieren zu großen Teilen auf Tierversuchen. Die Übertragbarkeit auf den

Menschen ist hier nur eingeschränkt möglich [33]. Eine empirische Ermittlung bzw. Validierung von Eingangswerten für den Menschen ist moralisch nicht vertretbar, da sie mit dem Tod oder mindestens einer erheblichen Gesundheitsschädigung von Menschen einhergehen würden. Auch wenn gesicherte Werte für den Menschen vorhanden wären, würde sie die unterschiedliche Auswirkung von Atemgiften auf Personen mit unterschiedlicher körperlicher Konstitution kaum widerspiegeln [1]. Der Quotient  $F_{\text{Toxisch}}$  kann deswegen nur als ein Anhaltswert dienen, sollte aber nicht als ausschlaggebender Beweis verwendet werden, das man sich bei der brandschutztechnischen Auslegung in einem sicheren Bereich befindet. Ein hoher  $F_{\text{Toxisch}}$  belegt aber in jedem Fall eine kritische Menge von Atemgiften.

Die im Baurecht geforderte Mindesthöhe von 2,5 m ist in einem Flugzeug schon durch die geringere Deckenhöhe nicht erreichbar. Grundsätzlich erscheint die in dieser Arbeit verwendete Mindesthöhe von 1,8 m als zu gering, wenn man bedenkt, dass die durchschnittliche Augenhöhe eines erwachsenen Manns bei 1,7 m liegt (DIN 33402-2). Bei dieser optimistisch geringen Mindestschichthöhe bleiben im Falle des hier verwendeten Flugzeugtyps gerade einmal 40 cm Platz für die Rauchsicht. Dies sind bereits weniger, als die in der DIN 18232-2 geforderten 50 cm. Es scheint so, dass bei Rauchentwicklung im Flugzeug bzw. bei Raucheinwirkung von außen die Evakuierung nur krabbelnd durchgeführt werden kann.

Es ist festzustellen, dass bei einem Feuer außerhalb der Flugzeugkabine durch das Eindringen von Verbrennungsprodukten eine Behinderung der Evakuierung stattfindet. Das Öffnen einer Tür, durch die Brandrauch eindringen kann, muss in jedem Fall vermieden werden. Dies stellt die Bedeutung der in den EU-OPS 1 expliziert geforderten Schulungsinhalte hervor, nach dem die Flugbegleiter in dem Erkennen von nicht benutzbaren Notausgängen geschult werden müssen. Eine Erweiterung dieser vorgeschriebenen Schulungsinhalte erscheint also nicht notwendig. Es sollte jedoch darauf hingewiesen werden, dass aufgrund der möglichen erhöhten Schadstoffbelastung in solchen Situationen die Nutzung der Atemschutzausrüstung in Betracht gezogen werden sollte.

Sollte dennoch eine Tür, durch die Verbrennungsprodukte eindringen können, geöffnet werden, können technische Vorkehrungen zweckmäßig sein. Eine Rauchausbreitung innerhalb des Flugzeuges ist zu vermeiden. Dies gilt nicht nur für das Szenario dieser Arbeit, sondern auch für andere Brandszenarien. Bei einem Brand während des Reisefluges, der mit bordeigenen Mitteln nicht unter Kontrolle zu bringen ist, können bis zum nächstgelegenen für eine Notlandung in Frage kommenden Flughafen über drei Stunden vergehen [6]. Hier besteht die Möglichkeit, den Rauch mithilfe der Klimaanlage abzuführen [34]. Dies

funktioniert nach dem Prinzip der Überdruckbelüftung [35]: Die Klimaanlage befördert kontinuierlich Luft in die Flugzeugkabine, während durch ein geregeltes „Outflow-Valve“ überschüssige Luft aus dem Flugzeug ausströmt. Bei den meisten Flugzeugen funktioniert die Klimaanlage mit aus den Triebwerken entnommener Druckluft. Da aber bei einer Evakuierung die Triebwerke abgeschaltet sind, steht die Klimaanlage währenddessen nicht zu Verfügung. Bei Flugzeugtypen, deren Klimaanlage mit Strom betrieben wird, wie es z. B. bei der Boeing 787 der Fall ist, kann die Überdruckbelüftung durch eine Batteriepufferung auch nach dem Abschalten der Triebwerke aufrechterhalten werden. Hierdurch ließe sich, bei entsprechendem Volumenstrom, auch ein Eindringen von Verbrennungsprodukten von außerhalb durch die Türöffnungen vermeiden. Zu beachten ist jedoch hierbei, dass die Klimaanlage keine Verbrennungsprodukte ansaugen darf. Augenscheinlich stellt diese Überdruckbelüftung mit einer elektrischen Klimaanlage eine kostengünstige Möglichkeit dar, da die notwendigen Systeme bereits vorhanden sind. Im besten Fall müssen lediglich die Standardvorgehensweisen für Notsituationen angepasst werden.

Für die Verhinderung der Rauchausbreitung können auch Rauchabschlüsse sinnvoll sein. Dies könnten einfach Vorhänge sein, wie sie in der Flugzeugkabine vorhanden sind, um beispielsweise Türbereiche, in denen sich Bordküchen befinden, einen Sichtschutz für die Fluggäste herzustellen. Mit einer entsprechenden Feuerfestigkeit und Rauchundurchlässigkeit kann das Schließen solcher Vorhänge den Rauch bereits eingrenzen. In dem Szenario 1a hätte eine solche Lösung vermutlich den Rauch weitestgehend auf den vorderen Türbereich begrenzt. Der hierdurch fehlende Notausgang wäre dadurch kompensiert geworden, dass im restlichen Flugzeug die Evakuierung weitgehend ungehindert hätte durchgeführt werden können.

Es stellt sich die Frage, inwieweit die Evakuierungsübungen bei der Zulassung neuer Flugzeugtypen als Indikator für die Sicherheit geeignet sind. Sie finden unter optimalen Bedingungen statt, wie sie in der Realität kaum vorzufinden sind. Der einzige tatsächlich behindernde Faktor ist ,neben der Begrenzung auf die Hälfte der Notausgänge, die Durchführung im Dunkeln [9]. Andere Faktoren, wie sie regelmäßig bei Evakuierungen auftreten, wie Rauch oder Beschädigung des Flugzeugrumpfes, bleiben außer Betracht. Dabei sind es gerade diese Faktoren, die die Evakuierung oft erst nötig machen. Ed Galea führte eine Studie durch [36], in der er für ein Flugzeug, welches stark beschädigt ist, eine Evakuierung unter Musterbedingungen nach CS-25 und eine an realen Unfällen angelehnte Evakuierung simulierte. Dabei wurde deutlich, dass die Evakuierung, wie sie bei der Zulassung geübt wird, zu einem besseren Ergebnis kommt als real geschehene Unfälle. Inwiefern diese Ergebnisse bei einem Szenario mit einem strukturell unbeschädigten Flugzeug mit Rauch in der Kabine, wie in der vorliegenden Arbeit, ausfallen würden,

bedürfen weiterer Untersuchung mit einer Evakuierungssimulation. Auch stellt sich die Frage, wie effektiv eine Flugzeugevakuierung durchzuführen ist, wenn die Fluggäste durch eine geringe Höhe der raucharmen Schicht dazu gezwungen sind, sich krabbelnd fortzubewegen. In dem Szenario 1a wäre sie durch die Höhe der raucharmen Schicht von 1 m nur noch so durchzuführen gewesen. Auch der Gesetzgeber scheint mit den Bodenmarkierungen zu den Fluchtwegen dem Rechnung getragen zu haben. Für dieses Szenario der „krabbelnden Flugzeugevakuierung“ liegen keine Daten vor. Empirisch ermittelte Personenflussraten, wie in [37] beschrieben, lassen sich nicht mit dem Handrechenverfahren anwenden, da als Personenflussraten in diesem Modell bereits langsamere Werte angegeben sind als die für Krabbelnde ermittelte Werte.

## 10 Fazit

Die vorliegende Arbeit beschäftigte sich mit dem Eindringen von Rauch durch eine fälschlicherweise geöffnete Tür in eine Flugzeugkabine während einer Notfallevakuierung. Die Ergebnisse wurden in Anlehnung an den *Leitfaden Ingenieurmethoden des Brandschutzes* [8] der vfdb und mit Hilfe einer CFD-Simulation ermittelt. Die Auswertung der Ergebnisse zeigte, dass ein Feuer außerhalb der Flugzeugkabine starke Auswirkungen auf die Vorgänge innerhalb der Kabine bei der Evakuierung haben kann. Wie stark sie ausfallen, ist abhängig von der Lage des Feuers gegenüber der geöffneten Tür und von Umwelteinflüssen wie Wind. In Vergleichsszenarien konnte ermittelt werden, dass die fälschlicherweise geöffnete Tür der Punkt ist, an dem die meisten Verbrennungsprodukte in das Flugzeug eindringen. Wäre die Tür nicht geöffnet worden, hätte der Brand außerhalb der Flugzeugkabine nur geringen Einfluss auf die Evakuierung im Inneren. Dies verdeutlicht die Wichtigkeit, dass Flugbegleiter vor dem Öffnen eines Notausgangs die Bedingungen vor der Tür überprüfen und sie gegebenenfalls für die Evakuierung sperren und Fluggäste zu anderen Ausgängen umgeleitet werden.

Als ungeeignet erwiesen sich der Grenzwert für die Höhe der raucharmen Schicht aus dem baulichen Brandschutz und das Evakuierungsmodell nach der Kapazitätsanalyse. Gerade für den Sonderfall eines Verkehrsflugzeugs scheint für die Abschätzung der Evakuierungsdauer eine Simulation oder ein Realversuch notwendig.

Außer Acht gelassen wurde die Möglichkeit, in den Szenarien gar keine Evakuierung durchzuführen. Dies kann, wenn keine Gefahr besteht, dass das Feuer auf das Kabineninnere übergreift, die sicherste Möglichkeit sein. Durch das schnelle Eingreifen der Flughafenfeuerwehr, die laut internationaler Vorschriften nach spätestens 3 Minuten vor Ort sein muss [38], können Brände schnell bekämpft werden und das Flugzeug hiernach kontrolliert geräumt werden. Hierbei besteht jedoch die Gefahr, dass bei einer Fehleinschätzung wertvolle Zeit verloren geht, wenn die Gefährdung durch das Feuer zu gering eingeschätzt wird und die Evakuierung dann zu spät eingeleitet wird.

Abschließend kann gesagt werden, dass eine Gefahr von voreilig oder unachtsam geöffneten Türen, die als nicht benutzbar einzustufen sind, ausgeht. Ursächlich ist hierbei der Faktor Mensch. Zur Reduzierung der Gefahr wird mit der Schulung der Flugzeugbesatzungen in dem Erkennen von nicht benutzbaren Notausgängen an diesem Punkt angesetzt.

## Literaturverzeichnis

- [1] *SFPE handbook of fire protection engineering*. 3rd ed. Quincy, Mass, Bethesda, Md : National Fire Protection Association; Society of Fire Protection Engineers, 2002
- [2] THE AVIATION HERALD: *Accident: ANA B788 near Takamatsu on Jan 16th 2013, battery problem and burning smell on board (including JAL Boston, Ethiopian London and JAL Tokyo events)*. URL <http://avherald.com/h?article=45c377c5&opt=0>. – Aktualisierungsdatum: 2014-06-19
- [3] CABLE NEWS NETWORK: *Airline: Dreamliner fuel leak due to an open valve*. URL <http://edition.cnn.com/2013/01/08/travel/dreamliner-fuel-leak/> – Überprüfungsdatum 2014-06-23
- [4] SVEIN TERJE STEFFENSEN: *Norwegian Boeing 787 verliert Treibstoff*. URL [http://www.nordlys.no/nyheter/article7113814.ece?ns\\_campaign=article&ns\\_mchannel=recommend\\_button&ns\\_source=facebook&ns\\_linkname=facebook&ns\\_fee=0](http://www.nordlys.no/nyheter/article7113814.ece?ns_campaign=article&ns_mchannel=recommend_button&ns_source=facebook&ns_linkname=facebook&ns_fee=0) – Überprüfungsdatum 2014-01-22
- [5] *Final Investigation Report on Engine Fire Serious Incident to M/S Nacil(A), B747400 Aircraft, VT-ESM at Mumbai Airport on 4th Sep'2009*
- [6] KOMMISSION DER EUROPÄISCHEN GEMEINSCHAFTEN: *Anhang III zur Verordnung (EG) Nr. 859/2008 zur Änderung der Verordnung (EWG) Nr. 3922/91 des Rates in Bezug auf gemeinsame technische Vorschriften und Verwaltungsverfahren für den gewerblichen Luftverkehr mit Flächenflugzeugen: OPS 1: Gewerbsmäßige Beförderung in Flugzeugen (EU-OPS 1)* (in Kraft getr. am 20. 8. 2008) (2008-08-20)
- [7] DIN 14011. *Begriffe aus dem Feuerwehrwesen*
- [8] VEREINIGUNG ZUR FÖRDERUNG DES DEUTSCHEN BRANDSCHUTZES E. V.: *Leitfaden Ingenieurmethoden des Brandschutzes*. 3. Auflage November 2013. Altenberge, Braunschweig, 2013
- [9] EUROPEAN AVIATION SAFETY AGENCY: *Annex to ED Decision 2013/010/R: Certification Specifications and Acceptable Means of Compliance for Large Aeroplanes (CS-25)*
- [10] KLUßMANN, Niels ; MALIK, Arnim: *Lexikon der Luftfahrt*. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2012
- [11] AIRBUS S.A.S.: *Flight Operations Briefing Notes: Cabin Operations Unplanned Ground Evacuation*
- [12] MENSEN, Heinrich: *Handbuch der Luftfahrt*. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2013
- [13] INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION: *Convention on International Civil Aviation* (in Kraft getr. am 7. 12. 1944) (1944-12-07). URL [http://www.icao.int/publications/Documents/7300\\_orig.pdf](http://www.icao.int/publications/Documents/7300_orig.pdf) – Überprüfungsdatum 2014-06-22
- [14] INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION: *Member States*. URL <http://www.icao.int/MemberStates/Member%20States.English.pdf> – Überprüfungsdatum 2014-06-22
- [15] EUROPEAN AVIATION SAFETY AGENCY: *Annex to Decision 2010/014/R: Definitions and abbreviations used in Certification Specifications for products, parts and appliances (CS-Definitions)*
- [16] SCHUBERDT, Christian-Heinz: *Handbuch zur Flugunfalluntersuchung*. Berlin : Springer, 2005
- [17] DIN 18232-2. November 2007. *Rauch- und Wärmefreihaltung – Teil 2: Natürliche Rauchabzugsanlagen (NRA); Bemessung, Anforderungen und Einbau*

- [18] SCHNEIDER, Ulrich: *Anforderungen an Brandschutzkonzepte für Sonderbauten*. URL [http://www.thm.de/bau/images/stories/File/fachgebiete/entwerfen\\_gebaeudekunde/paper\\_sonderbauten\\_2000.pdf](http://www.thm.de/bau/images/stories/File/fachgebiete/entwerfen_gebaeudekunde/paper_sonderbauten_2000.pdf) – Überprüfungsdatum 2014-06-07
- [19] DIN EN ISO 13943. Februar 2011. *Brandschutz - Vokabular*
- [20] LOHS, Karlheinz: *Fachlexikon Toxikologie*. 4., überarb. Aufl. Berlin : Springer, 2009
- [21] STACHOWIAK, Herbert: *Allgemeine Modelltheorie*. Wien, New York : Springer-Verlag, c1973
- [22] KUCHLING, Horst: *Taschenbuch der Physik : Mit zahlreichen Bildern und Tabellen*. 19. Aufl. München : Fachbuchverl. Leipzig im Carl-Hanser-Verl., 2007
- [23] OERTEL, Herbert, jr. ; BÖHLE, Martin ; REVIOL, Thomas: *Strömungsmechanik : Grundlagen - Grundgleichungen - Lösungsmethoden - Softwarebeispiele* : Vieweg + Teubner Verlag, 2011
- [24] LECHELER, Stefan: *Numerische Strömungsberechnung*. Wiesbaden : Vieweg+Teubner, 2011
- [25] WALLASCH, Karl-Heinz ; STOCK, Boris: *Das Fire Dynamics Simulator Handbuch : Brandsimulationen mit FDS*. 1. Aufl. Norderstedt : Books on Demand, 2008
- [26] McGRATTAN, Kevin ; HOSTIKKA, Simo ; McDERMOTT, Randall ; FLOYD, Jason ; WEINSCHENK, Craig ; OVERHOLT, Kristopher: *Fire Dynamics Simulator Technical Reference Guide Volume 4: Configuration Management*
- [27] McGRATTAN, Kevin ; HOSTIKKA, Simo ; McDERMOTT, Randall ; FLOYD, Jason ; WEINSCHENK, Craig ; OVERHOLT, Kristopher: *Fire Dynamics Simulator User's Guide*
- [28] AIRBUS S.A.S.: *A320 Family: A318, A319, A320, A321 - A320 photos, pictures, A320 videos, A320 3D view / Airbus | Airbus, a leading aircraft manufacturer*. URL <http://www.airbus.com/aircraftfamilies/passengeraircraft/a320family/> – Überprüfungsdatum 2014-06-20
- [29] AIRBUS S.A.S.: *A320 AIRCRAFT CHARACTERISTICS AIRPORT AND MAINTENANCE PLANNING*. URL [http://www.airbus.com/fileadmin/media\\_gallery/files/tech\\_data/AC/Airbus-AC-A320-Jun2012.pdf](http://www.airbus.com/fileadmin/media_gallery/files/tech_data/AC/Airbus-AC-A320-Jun2012.pdf) – Überprüfungsdatum 2013-11-22
- [30] RODEWALD, Gisbert: *Brandlehre*. 6. Aufl. Stuttgart : Kohlhammer, 2007
- [31] HÄUPL, Peter ; HOMANN, Martin ; KÖLZOW, Christian ; RIESE, Olaf ; MAAS, Anton ; HÖFKER, Gerrit ; NOCKE, Christian ; WILLEMS, Wolfgang: *Lehrbuch der Bauphysik*. Wiesbaden : Springer Fachmedien Wiesbaden, 2013
- [32] DIN 33402-2. Dezember 2005. *Ergonomie □ Körpermaße des Menschen □ Teil 2: Werte*
- [33] SCHNEIDER, Klaus ; HASSAUER, Martin: *Überprüfung der maßgerechten Übertragung (Scaling) von Schadstoffdosen aus Tierversuchen auf den Menschen (Interspeziesextrapolation)*. Freiburg im Breisgau
- [34] FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION: *Advisory Circular No. 25.795-4 Passenger Cabin Smoke Protection*. URL [http://www.faa.gov/documentLibrary/media/Advisory\\_Circular/AC\\_25.795-4.pdf](http://www.faa.gov/documentLibrary/media/Advisory_Circular/AC_25.795-4.pdf) – Überprüfungsdatum 2014-06-20
- [35] LUFTHANSA TECHNIK AG: *Atmen in 10.000 Metern Höhe Die Luftversorgung der Flugzeugkabine*. URL <http://www.lufthansa-technik.com/de/cabin-air-circulation> – Überprüfungsdatum 2014-06-23
- [36] GALEA, Edwin Richard ; WANG, Zhaozhi ; JIA, Fuchen: *Exploring the appropriateness of the aviation industry evacuation certification requirements using fire and evacuation simulation*. In: *Conference Proceedings of the Thirteenth International Interflam Conference (2013)*, S. 1035–1047

- [37] NAGAI, Ryoichi ; FUKAMACHI, Masahiro ; NAGATANI, Takashi: *Evacuation of crawlers and walkers from corridor through an exit*. In: *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications* 367 (2006), S. 449–460
- [38] INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION: *Annex 14 to the Convention on International Civil Aviation Aerodromes Volume I Aerodromes Design and Operations* (idF v. Juli 2009)

## **Anhang A: DVD-Anhang**

Bestandteil dieser Arbeit ist ein DVD-Anhang. Die DVD enthält:

### **Bachelorarbeit\_Schroeter\_Eike.pdf**

Diese Bachelorarbeit als PDF-Datei.

### **Auswertung** (Dateiordner)

Dieser Ordner enthält für alle Szenarien jeweils eine Exceldatei. Sie enthalten alle zu Auswertung der Simulation verwendeten Berechnungen und eine Kopie der Ergebnisse aller Messpunkte.

### **FDS** (Dateiordner)

Dieser Ordner enthält für jede Simulation einen Ordner, der alle Ausgabedateien von FDS sowie die Eingabedatei enthält. Die Eingabedateien sind jeweils mit dem Namen des Szenarios und der Endung \*.fds benannt. Die Dateien, mit dem Namen Bachelorarbeit\_Schroeter\_XX\_devc.csv (wobei XX die Nummer des Szenarios ist) enthalten die Ergebnisse der Messpunkte.

Das Dateiformat PDF kann mit jedem PDF-Programm, wie z. B. Adobe Reader, gelesen werden. Die Berechnungsdateien mit der Dateiendung \*.xlsx können mit jedem Tabellenkalkulationsprogramm, das das Office Open XML-Format unterstützt, gelesen werden. Es wird die Verwendung von Microsoft Excel 2010 oder neuer empfohlen, da die Dateien mit diesem Programm erstellt wurden. Die FDS-Ausgabedateien sowie die FDS-Eingabedateien mit den Endungen \*.out, \*.csv, \*.info und \*.fds können mit jedem einfachen Texteditor geöffnet werden. Zur Betrachtung der 3D-Simulation mit Smokeview (Dateiendung \*.smv) ist eine Installation von Smokeview erforderlich. Dieses kann kostenfrei unter <https://code.google.com/p/fds-smv/> heruntergeladen werden.