
Untersuchung des Zusammenhangs von Einsatzkräfteanzahl und Einsatzerfolg bei Flugzeugunfällen mittels kybernetischer Risikoanalyse

Marc Münch
Dissertation 2015



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Untersuchung des Zusammenhangs von
Einsatzkräfteanzahl und Einsatzerfolg bei
Flugzeugunfällen mittels kybernetischer Risikoanalyse

genehmigte Dissertation von
Dipl.-Ing. Brandassessor Marc Münch
aus Mainz

zur Erlangung der Würde eines
Doktors der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)

an der Technischen Universität Darmstadt
Fachbereich Bau- und Umweltingenieurwissenschaften

Erstreferent: Prof. Dr.-Ing. J. Stefan Bald
Zweitreferent: Prof. Dr.-Ing. Uwe Rüppel

Tag der Einreichung: 15. Jan. 2014
Tag der mündlichen Prüfung: 21. Mrz. 2014

Darmstadt 2015
D 17



Widmung

Gewidmet allen Feuerwehrkameraden, die stets bereit sind,
bei Brand und Gefahr dem Nächsten Hilfe zu leisten.

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich allen danken, die mich bei meiner Arbeit unterstützt, beraten, gefördert und begleitet haben. Davon gilt einigen mein besonderer Dank:

Zu vorderst ist hier mein Doktorvater

Prof. Dr. J. Stefan Bald

zu nennen, der mir immer ein guter Betreuer und Ratgeber war und all jene wertvollen Eigenschaften besitzt, die mit dem Begriff „Doktorvater“ verbunden sind.

Großer Dank gilt auch

Karl-Christian Hahn,

dem ich die Idee zu dieser Arbeit verdanke und der mich mit vielen Unterlagen, seinem großen Wissen und vielen Kontakten unterstützt hat.

Mit besonderem Dank möchte ich auch die

Erich-Becker-Stiftung

erwähnen, die diese Arbeit finanziell gefördert hat und somit insbesondere zu dem Wissensaustausch mit den asiatischen Flughäfen beigetragen hat.

Mein Dank gebührt auch der

Fraport AG,

die der Bearbeitung dieser Dissertation stets wohlwollend gegenüberstand.

Ausdrücklich möchte ich mich auch bei meiner geliebten Frau

Sinicca Münch-Kieren

bedanken, die diese (weitestgehend) externe Promotion mitgetragen hat und mir stets mit Rat und Tat zur Seite stand.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1	
2. Ausgangslage	4	
2.1	Diskussion der Aufgabenstellung	4
2.2	Statistische Analyse von Flugzeugunfällen	4
2.2.1	Vermeidbarkeit von Flugzeugunfällen	5
2.2.2	Räumliche Verteilung von Flugzeugunfällen	9
2.3	Internationale Standards der Flugzeugbrandbekämpfung	10
2.3.1	Personelle Anforderungen	10
2.3.2	Technische Anforderungen	12
2.3.3	Anforderungen bezüglich der Eingreifzeit	13
2.4	Risikowahrnehmung und -akzeptanz	14
2.4.1	Risikowahrnehmung	14
2.4.2	Risikoakzeptanz	16
3. Grundlagen	20	
3.1	Grundbegriffe	20
3.1.1	International Civil Aviation Organization (ICAO)	21
3.1.2	Flughafen	21
3.1.3	Ereignis	22
3.1.4	Schaden	22
3.1.5	Flugzeugunfall	22
3.1.6	Risiko	24
3.2	Schadenslage „Flugzeugunfall“	28
3.2.1	Rahmenbedingungen und Einflussgrößen	28
3.2.2	Brandschutz und Menschenrettung bei Flugzeugunfällen	30
3.3	Risikoanalyse	36
3.3.1	Entstehung der Risikoanalyse	36
3.3.2	Grundlagen der Risikoanalyse	38
3.3.3	Ansätze der Risikoanalyse	40
3.4	Methoden und Grundlagen der Modellbildung	48
3.4.1	Morphologischer Kasten / Zwicky-Box	48
3.4.2	Zelluläre Automaten	50

Inhaltsverzeichnis

3.4.3	Kybernetik	54
3.4.4	Monte Carlo-Methode	55
3.4.5	Gesetz der großen Zahlen	55
3.4.6	Computational Fluid Dynamics (CFD)	57

4. Methodik

59

4.1	Kybernetische Risikoanalyse	60
4.1.1	Definition der dynamischen Elemente	63
4.1.2	Definition der statischen Elemente (Parameter)	64
4.2	Systematik der Computersimulation	65
4.3	Untersuchungsraum und Systemgrenzen	72
4.3.1	Definition des Untersuchungsraums	72
4.3.2	Von der Betrachtung ausgeschlossene Einzelaspekte	75
4.3.3	Risikoanalyse als Grundstein der Entscheidungsfindung	77

5. Simulation

78

5.1	Raster	78
5.1.1	Zeitliches Raster	78
5.1.2	Räumliches Raster	80
5.1.2.1	Rahmenbedingungen der Flugzeugmodellierung	80
5.1.2.2	Flugzeugmodellierung in der Simulation	82
5.2	Dynamische Elemente	93
5.2.1	Passagiere	93
5.2.1.1	Verhalten der Passagiere	93
5.2.1.2	Einflüsse auf den Gesundheitszustand	98
5.2.1.3	Verletzungsmuster im Modell	98
5.2.1.4	Veränderung des Gesundheitszustands	106
5.2.1.5	Eingeschränkte Fortbewegungsfähigkeit	112
5.2.1.6	Passagiervektor zur rechnerischen Umsetzung	115
5.2.2	Einsatzkräfte	116
5.2.2.1	Taktisches Vorgehen der Einsatzkräfte	116
5.2.2.2	Anzahl der verfügbaren Angriffstrupps	122
5.2.2.3	Leistungsfähigkeit der Angriffstrupps	128
5.2.2.4	Variationen in der Simulation	134
5.2.2.5	Einsatzkraftvektor zur rechnerischen Umsetzung	138

Inhaltsverzeichnis

5.2.3	Medizinisches und soziales Personal	139
5.2.4	Brand	140
5.2.4.1	Außenbrand in der Fläche	141
5.2.4.2	Außenbrand an Bauteilen	150
5.2.4.3	Innenbrand	151
5.2.4.4	Schwelbrand	155
5.2.4.5	Atemgift	156
5.3	Statische Elemente (Parameter)	163
5.3.1	Theoretische Merkmale von Flugzeugunfällen	164
5.3.2	Anzahl der Unfall- und Berechnungsvarianten	176
5.3.3	Gewählte Merkmale für die Simulation	183
5.4	Problematik paralleler Berechnungen und Gleichzeitigkeit der Abläufe	199
5.4.1	Passagiere	199
5.4.2	Einsatzkräfte	203
5.4.3	Brandausbreitung	208

6. Ergebnisse

211

6.1	Darstellung und Analyse der Ergebnisse	211
6.2	Verifizierung der Ergebnisse	219
6.2.1	Verifizierung mittels rechnerischer Abschätzung	219
6.2.2	Verifizierung mittels Variation der Rechenmodelle	222
6.3	Schlussbetrachtung	230
6.4	Ausblick	233

7. Zusammenfassung

235

Anhang + Verzeichnisse

237

Anhang	237
Abbildungsverzeichnis	265
Tabellenverzeichnis	269
Begriffs- und Abkürzungsverzeichnis	271
Literaturverzeichnis	273
Verzeichnis der Expertengespräche	279

1. Einleitung

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit Flugzeugunfällen. Im Mittelpunkt der Betrachtung stehen dabei die Abläufe, die sich an einen Unfall anschließen, insbesondere die Maßnahmen der Einsatzkräfte. Angestrebtes Ziel ist dabei die Entwicklung einer Methode, die es ermöglicht, den Einfluss der Anzahl der Einsatzkräfte auf den Einsatzerfolg rechnerisch zu ermitteln.

Sowohl national als auch international existieren bisher keine schlüssig hergeleiteten und nachvollziehbaren Aussagen über die notwendige bzw. optimale Anzahl an Einsatzkräften bei Flugzeugunfällen. Weder Behörden noch wissenschaftliche Einrichtungen haben bisher Forschungsarbeiten zu dieser Fragestellung vorgestellt.

Ergebnis dieser Arbeit ist ein Instrument, das in der Auseinandersetzung zwischen wirtschaftlichen Interessen (eines Unternehmens oder einer behördlichen Dienststelle) einerseits und dem gesetzlichen und individuellen Anspruch auf optimale Rettung von Menschenleben andererseits eine objektive und wissenschaftlich fundierte Antwort auf die Frage nach der optimalen Anzahl an Einsatzkräften gibt. Maßgeblich ist dabei die sichere Bewältigung von Unfällen bei gleichzeitiger wirtschaftlicher Vertretbarkeit.

Zur Bearbeitung dieser Aufgabenstellung wurde folgende Vorgehensweise gewählt:

Kapitel 2 – Ausgangslage

In Kapitel „Ausgangslage“ werden die Hintergründe, die zu dieser Arbeit geführt haben, dargestellt:

- Zu Beginn wird die Relevanz der Aufgabenstellung hinterfragt.
- Zur Beantwortung dieser Fragestellung werden Flugzeugunfälle bezüglich des Entstehungszeitpunktes, der Ursache und der Häufigkeit betrachtet.
- Ebenso werden die international verbindlichen Anforderungen an den Flugzeugbrandschutz erörtert.
- Abschließend erfolgt eine kurze Einführung in die Themen Risikowahrnehmung und -akzeptanz.

Kapitel 3 – Grundlagen

In Kapitel „Grundlagen“ wird eine Bestandsaufnahme der derzeitigen Erkenntnisse und Verfahren, die in Zusammenhang mit der Aufgabenstellung von Bedeutung sind, durchgeführt. Dieser Wissensstand dient im Verlauf der Arbeit als Grundlage für weitere Ausführungen:

- Zunächst werden die wichtigsten Grundbegriffe erklärt, die im Rahmen dieser Arbeit von Bedeutung sind.
- Als nächstes werden die Flugzeugunfälle der Vergangenheit hinsichtlich der einsatzrelevanten Erkenntnisse ausgewertet.
- Im Folgenden werden die einsatztaktischen Grundzüge der Flugzeugbrandbekämpfung erörtert.

1. Einleitung

- Danach werden die Grundlagen der Risikoanalyse erläutert.
- Zum Abschluss des Kapitels werden weitere methodische Ansätze und Grundlagen beschrieben, die neben der Risikoanalyse bei der Modellbildung zur Anwendung kommen.

Kapitel 4 – Methodik

Da die Möglichkeit einer rein statistischen Auswertung auf Grund der zu geringen Anzahl an Flugzeugunfällen (Kapitel 2.2.1) und der fast vollständig fehlenden Dokumentation der Einsatzabläufe entfällt, ist es erforderlich, ein anderes Verfahren zur Erreichung der oben beschriebene Zielsetzung zu entwickeln. Die Kombination aus Risikoanalyse und zellulären Automaten ist ein geeignetes Werkzeug. Sie bildet den methodischen Kern der Arbeit. In Kapitel 4 „Methodik“ wird ein Ansatz entwickelt, der die Modellierung von Schadensfällen erlaubt, die nicht ausschließlich auf technischen Regelkreisläufen basieren, sondern dynamische Abläufe wie menschliches Handeln (z. B. Taktik der Einsatzkräfte, Verhalten der Flugzeuginsassen) und den Schadensverlauf (z. B. Ausbreitung von Feuer und Rauch) abbilden kann:

- Zunächst wird hierzu beschrieben, wie die bestehenden Verfahren der Risikoanalyse für die vorliegende Aufgabenstellung ergänzt und modifiziert werden. Das Ergebnis ist ein kybernetisches System, das Elemente enthält, die (zum Teil) entscheidungsfähig sind, lageabhängig agieren und sich wechselseitig beeinflussen.
- Danach wird das grundlegende Konzept der Computersimulation, die als Lösungsansatz gewählt wurde, dargestellt und die Systematik erläutert. Das Instrument einer Computersimulation wird gewählt, da die Wechselwirkungen zwischen den möglichen Schadenslagen eines Flugzeugunfalls, dem Einsatz der Einsatzkräfte und dem Verhalten der Flugzeuginsassen sowie dem Fortschreiten der Ereignisse auf diese Weise am besten für alle denkbaren Konstellationen berücksichtigt werden können.
- Abschließend werden die Systemgrenzen und der Untersuchungsraum beschrieben. Hier wird exakt definiert, welche Einsatzszenarien in der Computersimulation modelliert und welche Sonderfälle nicht berücksichtigt werden.

Kapitel 5 – Simulation

In diesem Kapitel wird beschrieben, wie das Computerprogramm zur Simulation der Abläufe nach einem Flugzeugunfall konkret umgesetzt wird. Hier werden die mathematischen Zusammenhänge und Modelle im Einzelnen dargestellt:

- Es wird ein Modell für den Gesundheitszustand und die Überlebenswahrscheinlichkeit der Flugzeuginsassen entwickelt. Dadurch kann simuliert werden, wie sich der zeitliche Verlauf des Einsatzes und damit auch der Zeitpunkt des Beginns der medizinischen Versorgung auf den Gesundheitszustand der einzelnen Flugzeuginsassen auswirkt.

1. Einleitung

Hierbei erfolgt eine nach Verletzungsgrad differenzierte Betrachtung. Die Einflüsse von Feuer, Wärme und Brandrauch finden ebenfalls Berücksichtigung.

- Des Weiteren werden alle Abläufe, Verhaltensregeln und Entscheidungsoptionen der Einsatzkräfte erörtert und mittels mathematischer Formeln abgebildet.
- Analog zur vorherigen Modellbildung wird ein abstraktes Flugzeug-Modell entwickelt. Hierbei wird untersucht, wie die aus einsatztechnischer Sicht wichtigsten Elemente im Brandfall zueinander in Beziehung stehen. Ziel ist es, Aussagen darüber zu treffen, in welche Richtung und mit welcher Geschwindigkeit sich ein Brand in einem Flugzeug ausbreitet. Auch die Ausbreitung von Brandrauch im Flugzeug sowie die Auswirkungen von Wärmestrahlung werden hierbei erfasst und miteinbezogen.
- Im nächsten Schritt der Untersuchung werden alle relevanten Parameter eines Flugzeugunfalls definiert und systematisiert aufgeführt. Dies beinhaltet Aspekte der Schadenslage (z. B. Standort), des Unfallobjektes (z. B. Flugzeugtyp, Passagierzahl) und der Einsatzbedingungen (z. B. Wetter, Tageszeit). Daneben werden ihre Eintrittshäufigkeiten und die möglichen Auswirkungen auf den Einsatzverlauf quantifiziert.
- Abschließend werden Probleme bei der Simulation paralleler Abläufe erörtert und die gewählten Lösungsansätze dargestellt.

Kapitel 6 – Ergebnisse

Das Kapitel „Ergebnisse“ widmet sich den Daten, die mit Hilfe der in Kapitel 4 beschriebenen und in Kapitel 5 spezifizierten Simulation erzielt werden. Drei Schwerpunkte sind hier zu benennen:

- Die Darstellung der erzielten Daten aus der Computersimulation,
- die Verifizierung der Ergebnisse
- sowie deren sich anschließende Interpretation.

Kapitel 7 – Zusammenfassung

- Im letzten Kapitel wird ein kurzer Rückblick auf die Arbeit und eine Zusammenfassung der Ergebnisse gegeben.
- Abschließend werden Möglichkeiten für die Anwendung der erzielten Ergebnisse sowie Anknüpfungspunkte für weitere Forschungsprojekte und fachliche Vertiefungen skizziert.

2. Ausgangslage

Im vorliegenden Kapitel erfolgt eine Darstellung bisheriger Flugzeugunfälle hinsichtlich Ursache, Anzahl und räumlicher Verteilung sowie eine Analyse der internationalen Standards der Flugzeugbrandbekämpfung. Des Weiteren findet eine Betrachtung der Thematik Risikowahrnehmung und -akzeptanz statt. Diese Ausführungen dienen dazu, die Hintergründe der vorliegenden Arbeit darzulegen und zugleich die Frage nach der Relevanz der Aufgabenstellung zu beantworten.

2.1 Diskussion der Aufgabenstellung

Zu Beginn jeder Arbeit stellt sich die Frage nach ihrer Sinnhaftigkeit. Dies soll verhindern, dass unnötig Zeit, Mittel und Engagement in ein später wenig benötigtes Ergebnis investiert werden. Die vorliegende Arbeit nimmt sich bei dieser Selbstprüfung nicht aus. Ob die Bearbeitung des Themas „Untersuchung des Zusammenhangs von Einsatzkräfteanzahl und Einsatzerfolg bei Flugzeugunfällen mittels kybernetischer Risikoanalyse“ sinnvoll ist, lässt sich in drei Fragen fassen:

- **Frage 1**

Ist es sinnvoll, die Bewältigung von Flugzeugunfällen zu untersuchen anstatt deren Ursachen?

- **Frage 2**

Ist es bei den weitreichenden und weltumspannenden Flugstrecken auch nur ansatzweise wahrscheinlich, dass sich ein Unfall gerade an der einzigen Stelle ereignet, an der spezielle Einsatzkräfte für Flugzeugunfälle vorgehalten werden, nämlich an einem Flughafen?

- **Frage 3**

Besteht ein gesellschaftliches Interesse an der Thematik „Sicherheit im Luftverkehr“ im Allgemeinen, zu der auch die Risikobewertung der Folgen eines Flugzeugunfalls gehört?

Es sei vorweggenommen, dass sich alle drei Fragen mit „Ja“ beantworten lassen. Die ausführliche Begründung hierzu folgt im Anschluss in den drei Kapiteln:

- Analyse von Flugzeugunfällen (Kapitel 2.2)
- Internationale Standards der Flugzeugbrandbekämpfung (Kapitel 2.3)
- Risikowahrnehmung und -akzeptanz (Kapitel 2.4)

2.2 Statistische Analyse von Flugzeugunfällen

Die Analyse bisheriger Flugzeugunfälle gibt Aufschluss über die kritischen Punkte im Luftverkehr. Mit der Beantwortung der beiden im vorherigen Kapitel gestellten Fragen wird deutlich, warum eine Auseinandersetzung mit dem Themenbereich Unfallfolgen im Luftverkehr von Interesse ist.

2. Ausgangslage

2.2.1 Vermeidbarkeit von Flugzeugunfällen

Zu Beginn wird die Möglichkeit der Vermeidung von Flugzeugunfällen (Antwort auf die Frage 1) betrachtet. Das Ziel aller Anstrengungen der Risikoforschung ist letztendlich die Verringerung von Unfallschäden. Dies kann auf zweierlei Arten erreicht werden. Einerseits durch die Reduzierung der Anzahl an Unfällen durch präventive Maßnahmen und andererseits durch operative Schadensbegrenzung, die zur Verringerung der Schäden in Folge eines Unfalls führt. Die präventive Schadensbegrenzung ist per se die Wirkungsvollere. Als Beispiel für Unfallprävention kann die Einführung von Verkehrsregeln (wie Vorfahrtsregeln, Geschwindigkeitsbegrenzungen etc.) genannt werden. Auch aus ethischen Gründen ist die Vermeidung von Unfällen immer einer Schadensbegrenzung vorzuziehen. Da sich Unfälle aber nie vollständig vermeiden lassen („man kann nie so dumm denken, wie es kommt“), ist auch die operative Schadensbegrenzung von großer Bedeutung. Eine Maßnahme zur Verminderung von Unfallschäden - ohne die Anzahl an Ereignissen zu beeinflussen - ist beispielsweise die Einführung von Sicherheitsgurten und Airbags im Straßenverkehr. Beide Methoden haben letztlich das gleiche Ziel. Die Summe aller Unfallschäden soll reduziert werden. Nur in wenigen Fällen gelingt dies aber durch eine Methode allein. In der kombinierten Anwendung beider Vorgehensweisen liegt in der Regel der größte Erfolg. Dies trifft natürlich auch für den komplexen Bereich der Flugzeugunfälle zu. Im Folgenden wird ausführlich dargelegt, warum die operative Schadensbegrenzung für den Luftverkehr von großer Wichtigkeit ist. Insofern wird die Frage beantwortet, ob die Betrachtung der Folgeereignisse von Flugzeugunfällen sinnvoll ist.

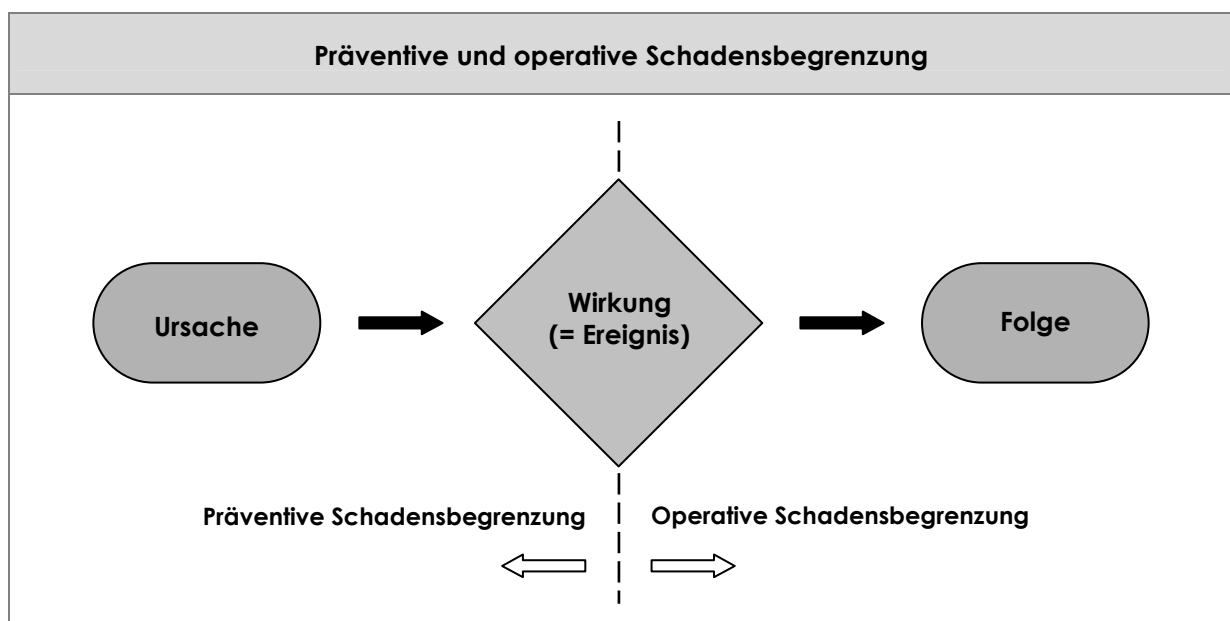


Abbildung 1: Präventive und operative Schadensbegrenzung

2. Ausgangslage

Die Zahl der Unfälle pro Flugbewegung ist – mit leichten Schwankungen aber letztlich kontinuierlich – seit den 50er Jahren gesunken, wie in Abbildung 2 dargestellt ist [EASA 2010, S. 11 u. EASA 2012, S. 12]. Trotz des bereits sehr niedrigen Unfallniveaus in den 1990er Jahren lässt sich nochmals eine beachtliche Steigerung der Sicherheit im Zeitraum von 1986 bis 2011 verzeichnen (Abbildung 3). Die Wahrscheinlichkeit für einen Flugzeugunfall mit Toten lag zwischen 2005 und 2009 bei ca. 5 : 10 Millionen. Die Unfallraten (mit Todesfolgen) weisen aber starke regionale Unterschiede auf. Jeweils bezogen auf 10 Mio. Starts reichen sie von 2,0 in den Staaten der EU und 2,1 in Nordamerika über 4,8 in Asien, 8,1 in Zentralamerika und 9,2 in Ozeanien bis zu 14,3 in West-/Zentralasien und 16,9 in Südamerika sowie 21,7 in europäischen Nicht-EU-Staaten und 35,3 in Afrika [EASA 2013, S. 13].

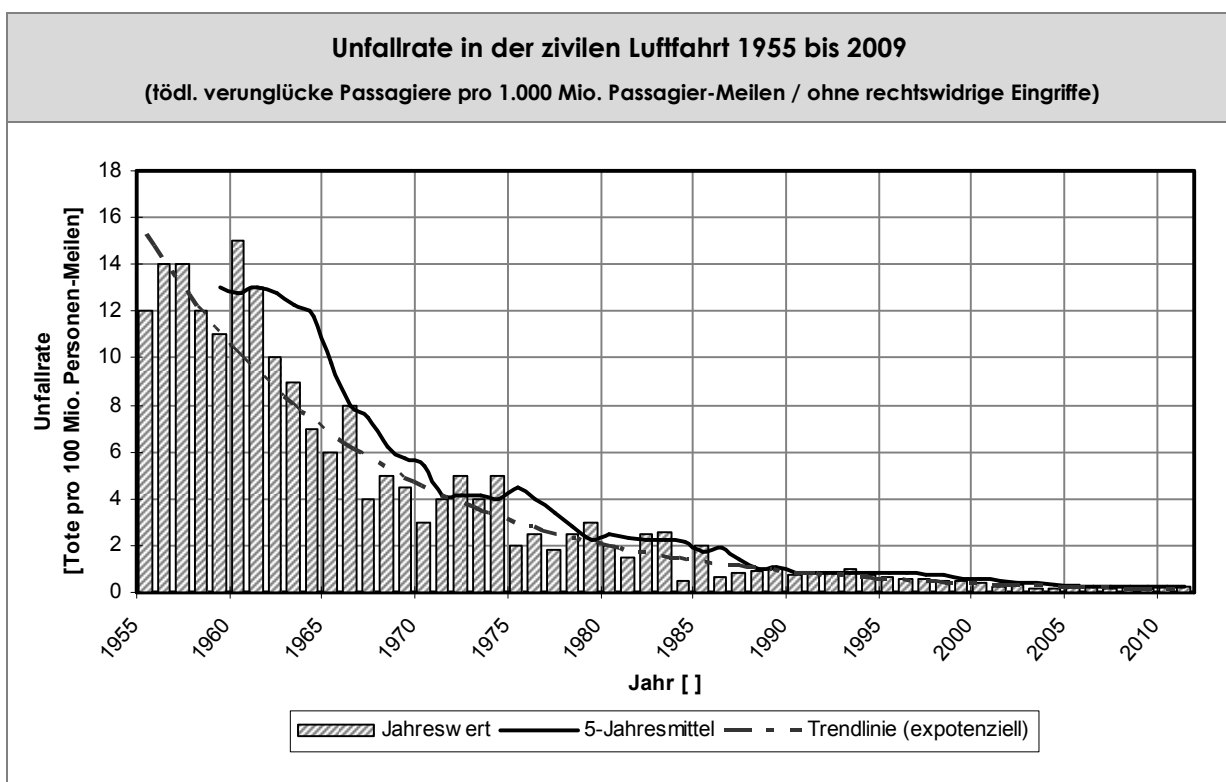


Abbildung 2: Unfallrate in der zivilen Luftfahrt 1955 bis 2011

Quelle: EASA 2010, S. 11

Anmerkung: Die Unfallzahlen weichen je nach Quelle teilweise stark voneinander ab. Diese Unterschiede sind durch die ungleichen Definitionen des Ereignisses „Unfall“ (Kapitel 3.1.5) oder die unterschiedlichen Bezugsgröße zu erklären.

In absoluten Zahlen beträgt die Anzahl der weltweit bei Flugzeugunfällen umgekommenen Personen zwischen 2003 und 2012 insgesamt 6.996 Tote. Daraus ergibt sich ein Durchschnittswert von jährlich ca. 700 Toten [FSF o. J.a]. Die Betrachtung des Verlaufs des 5-Jahresmittels der Unfallrate in Abbildung 2 und deutlicher noch in Abbildung 3 legt die Vermutung nahe, dass die Unfallrate nun offensichtlich gegen einen unteren Grenzwert strebt.

2. Ausgangslage

Das Potenzial für präventive Maßnahmen, die zu einem deutlichen Zuwachs an Sicherheit führen, scheint weitgehend ausgeschöpft zu sein. Eine weitere Verringerung der weltweiten Unfallrate kann fast nur noch durch eine Steigerung der Sicherheit in den Staaten der GUS, in Afrika und in Teilen Asiens erfolgen. Für die westlichen und ostasiatischen Industriestaaten dürften die Möglichkeiten zur Erhöhung der Flugsicherheit nahezu erschöpft sein. Die Gründe hierfür sind ersichtlich:

- Eindimensionale Unfallursachen lassen sich relativ gut ermitteln und beseitigen. Dies erfolgt meist in einer kurzen Phase nach der Einführung neuer Techniken (z. B. Triebwerk Airbus A380). Es ist daher äußerst unwahrscheinlich, dass nach mehreren Jahrzehnten der zivilen Luftfahrt solche Lücken in der Sicherheit noch nicht gefunden und beseitigt wurden.
- Eine Analyse der schweren Flugzeugunfälle der letzten Jahrzehnte zeigt, dass die Unfälle in aller Regel nicht eine Ursache hatten, sondern oftmals erst mehrere sehr unwahrscheinliche Unregelmäßigkeiten in ungünstiger Kombination zum Unglücksfall führten. Hieraus lässt sich jedoch nur in den seltensten Fällen Verbesserungspotenzial ableiten.

Wenn die Unfallrate trotz jahrzehntelanger Weiterentwicklung und Verbesserung der sicherheitsrelevanten Einrichtungen gegen einen Grenzwert konvergiert, kann diese Zahl als Restrisiko für den Verkehrsträger Flugzeug bezeichnet werden. Für die Zukunft bedeutet dies, dass die absolute Anzahl an Unfällen fast linear mit dem Wachstum der Branche Luftverkehr steigen wird. Die Frage nach Maßnahmen zur operativen Schadensbegrenzung ist die logische Konsequenz dieser Feststellung.

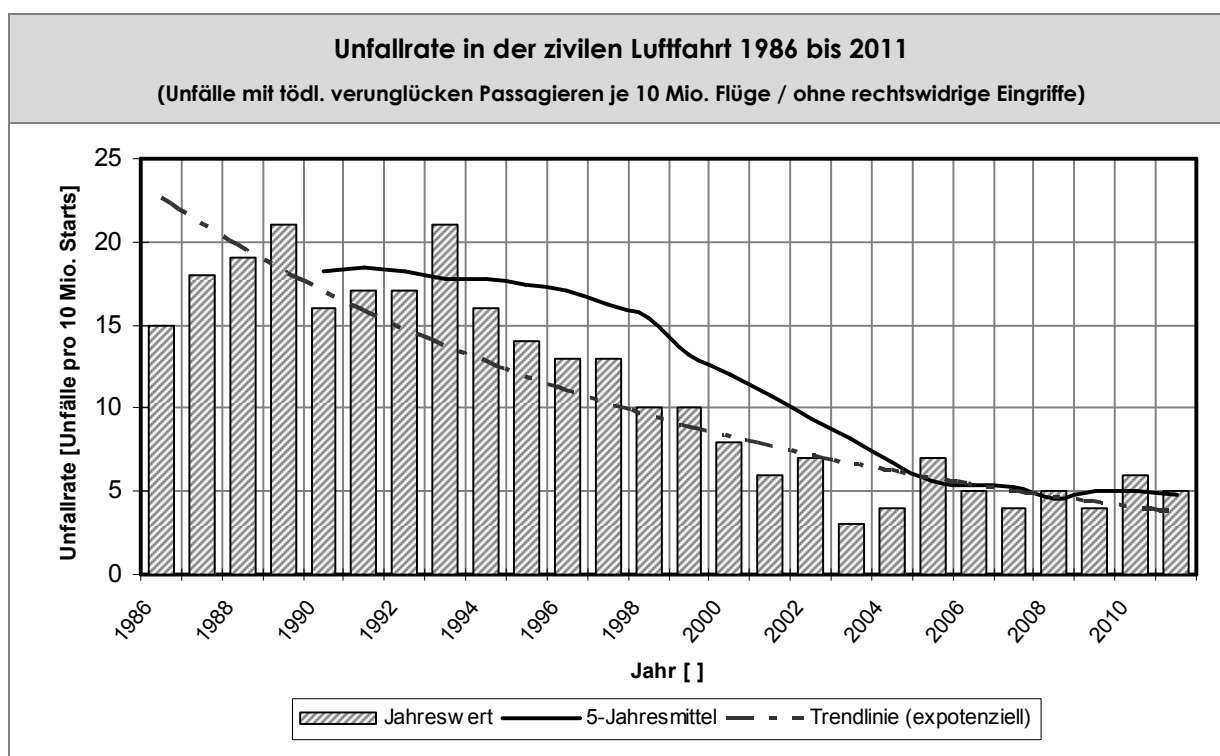


Abbildung 3: Unfallrate in der zivilen Luftfahrt 1986 bis 2011

Quelle: EASA 2007, S. 7 / EASA 2012, S. 12

2. Ausgangslage

Bei der Betrachtung der Unfallursachen im Luftverkehr fällt auf, dass menschliches Versagen mit mehr als der Hälfte (57% = 50% Pilot + 7% Sonstige) die weitaus größte Fehlerquelle darstellt (Abbildung 4). Dies beinhaltet Fehlentscheidungen sowohl der Besatzung als auch der Flugsicherung. Anzumerken ist hier noch, dass knapp die Hälfte der Pilotenfehler (21% = 16% Pilot, wetterbedingt + 5% Pilot, technisch bedingt) ihre primäre Ursachen in äußeren Einflüssen hat, auf die die Pilot dann falsch reagieren. Diese Zahlen mögen auf den ersten Blick erschrecken, doch sind sie durchaus nachvollziehbar. Der Mensch zeichnet sich normalerweise dadurch aus, dass er einen Großteil seiner Entscheidungen durch den bewussten Einsatz seines Verstandes trifft. Da er jedoch keine Maschine ist, kommt es unweigerlich auch zu Fehlern in der Entscheidung. Sie können durch Unachtsamkeit, Unwissenheit, Fehlinterpretationen etc. hervorgerufen werden.

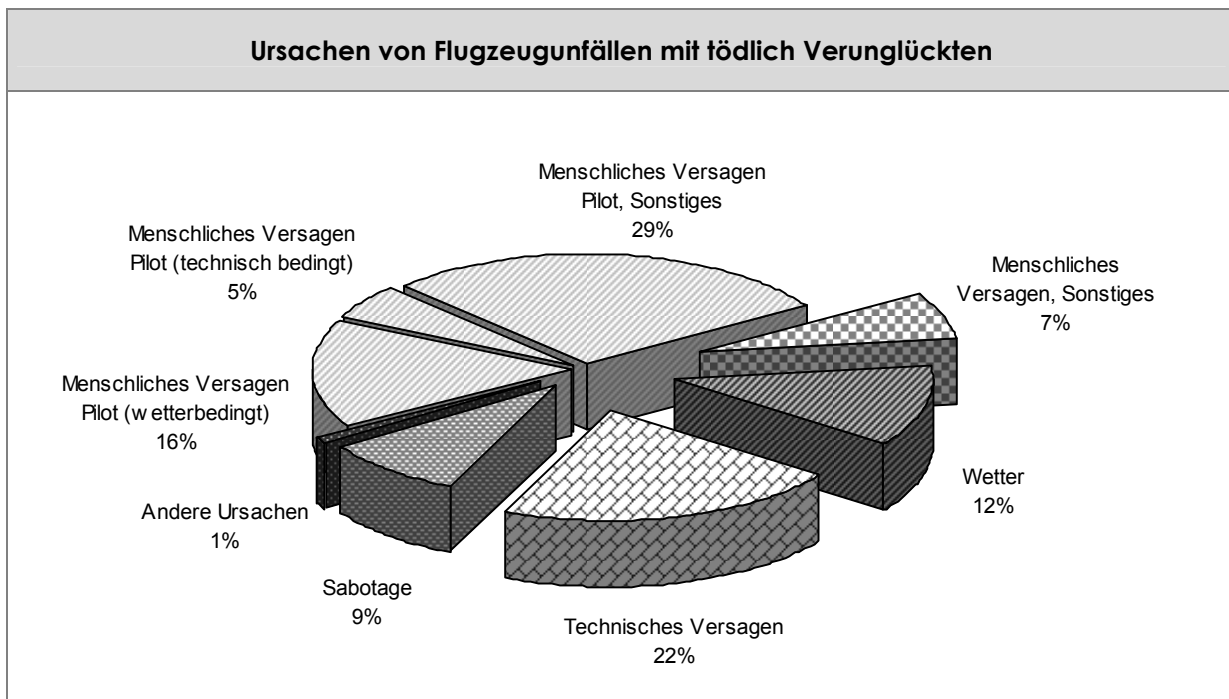


Abbildung 4: Ursachen von Flugzeugunfällen mit tödlich Verunglückten

Quelle: PlaneCrashInfo o. J.

Dies unterscheidet den Menschen mitsamt seiner Wahrnehmung und seinem Denkvermögen von einem technischen Regelkreislauf. Solange er Konstrukteur, Anwender, (LFZ-)Führer und Lotse der Luftfahrt zugleich ist, wird er als Hauptfehlerquelle nie ausscheiden. Deshalb soll an dieser Stelle betont werden, dass der Mensch der Beeinflussbarkeit und Unvollkommenheit seines Geistes letztendlich auch seine Kreativität und sein Lernvermögen verdankt. Darüber hinaus gibt es leider keine Statistik darüber, wie oft Flugzeugführer durch bewusstes Eingreifen oder Improvisationsgabe Unfälle verhindern, wenn sich plötzlich Situationen ergeben, die in der Planung nicht vorgesehen wurden. Da der Mensch also einerseits den Mittelpunkt der technischen Nutzung des Luftverkehrs darstellt und andererseits in seinen Fähigkeiten letztlich unvollkommen ist, bedeutet dies, dass hier nie eine hundertprozentige Sicherheit erreicht werden kann. Ähnliches gilt auch für die anderen Unfallursachen.

2. Ausgangslage

Unfälle mit rein technischem Hintergrund sind zwar deutlich seltener (22%), auszuschließen sind solche Ereignisse jedoch nie. Materialermüdungen oder der plötzliche Ausfall aller redundanten Systeme können immer eintreten. Die Wahrscheinlichkeit für die ungünstige Verkettung mehrerer Fehler und damit für den Eintritt eines Unfalls ist aber bereits so gering, dass kaum noch eine Möglichkeit zur Verbesserung besteht. Beispielsweise beträgt die durchschnittliche Häufigkeit für einen Flugzeugunfall mit Todesfolgen aufgrund technischen Versagens ca. 1 zu 23 Millionen (Abb. 3: tödlicher Flugunfall mit 1 : 5 Mio. geteilt durch Abb. 4: technisches Versagen in 22% der Fälle). Das Wetter als alleinige Unfallursache (12%) entzieht sich generell dem Einfluss des Menschen. Wie sehr Arbeitsabläufe und technische Systeme auch perfektioniert werden, es wird dennoch nicht gelingen, Unfälle vollständig zu vermeiden. Diese Erkenntnis ist sehr wichtig für die Bewertung von Unfallfolgenbekämpfung, folgt doch daraus, dass bei aller Prävention dennoch auch Ressourcen für Schadensfälle vorgehalten werden müssen. Eine wissenschaftliche Auseinandersetzung mit diesem Thema ist somit durchaus von Interesse.

2.2.2 Räumliche Verteilung von Flugzeugunfällen

Mit der Untersuchung der räumlichen Verteilung von Flugzeugunfällen wird die Antwort auf Frage 2 nach der Wahrscheinlichkeit des Unfalleintritts am Flughafen gegeben. Betrachtet man die Statistik der Flugzeugunfälle, so erkennt man, dass sich diese nicht gleichmäßig entlang der Flugstrecken verteilen, sondern dass es an den Ausgangs- und Endpunkten (beides natürlich Flughäfen) vielmehr zu einer deutlichen Konzentration von Unfällen kommt:

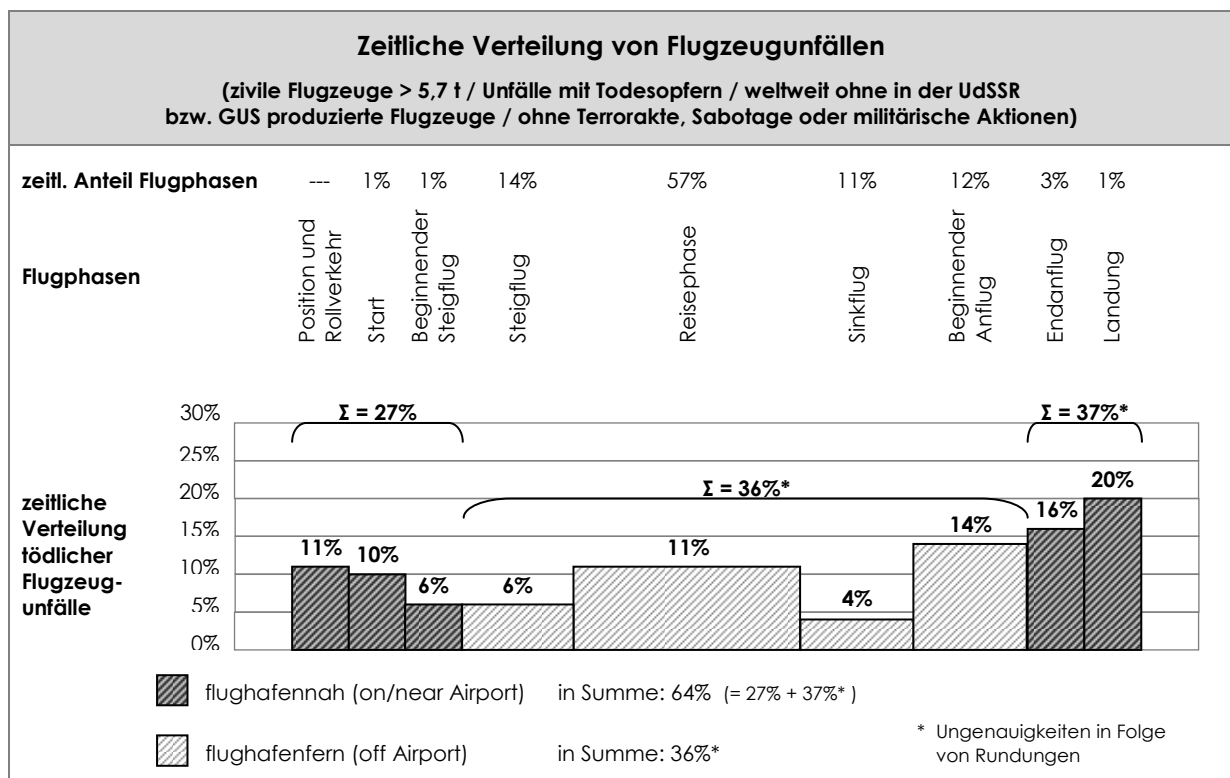


Abbildung 5: Zeitliche Verteilung von Flugzeugunfällen

Quelle: Boeing 2012, S. 20

2. Ausgangslage

Die durchschnittlichen Häufigkeiten während der verschiedenen Flugphasen sind in Abbildung 5 dargestellt. Wird der Beginn des Steigflugs und das Ende des Anflugs mitgerechnet, so ereignen sich 64% aller Flugzeugunfälle auf Flughäfen oder in ihrer unmittelbaren Nähe (on/near Airport) [Boeing 2012, S. 20]. Verantwortlich hierfür sind sehr unterschiedliche Faktoren wie die hohe mechanische Belastung des Flugzeugs bei Start- und Landevorgängen, die Durchführung zahlreicher Bedienungsvorgänge in kurzer Zeit sowie der kritische Zeitpunkt des Übergangs vom Fahren zum Fliegen und damit verbunden die Nähe zu physikalischen Hindernissen einschließlich der Erdoberfläche selbst. Demnach ergibt sich aus der Unfallverteilung nahezu zwangsläufig, dass die Einsatzkräfte für das Ereignis Flugzeugunfall an den Flughäfen vorgehalten werden.

Zusammenfassend lässt sich Folgendes festhalten. Solange sich der Mensch der Technik bedient, kommt es zwangsläufig auch zu negativen Begleiterscheinungen wie technisches Versagen oder falsche Anwendung, die nie vollständig vermieden werden können. Die seit vielen Jahren relativ konstante Unfallrate muss als verbleibendes Restrisiko für die Luftfahrt angesehen werden. Eine gleich bleibende Unfallrate und ein anhaltendes Wachstum des Flugverkehrs führen in der Summe zu einer zunehmenden Zahl an Unfällen, die sich im Bereich der Flughäfen konzentrieren.

2.3 Internationale Standards der Flugzeugbrandbekämpfung

Die International Civil Aviation Organization (ICAO) (Kapitel 3.1.1) legt den Standards für die Dimensionierung von Flughafenfeuerwehren folgenden Bemessungsfall zugrunde: Infolge eines Flugzeugunfalls kommt es zu einem Flächenbrand mit der maximalen Menge an Treibstoff, der sich unter und um das Flugzeug herum erstreckt. Es ist den Flugzeuginsassen zu diesem Zeitpunkt nicht möglich, das Flugzeug zu verlassen. Das Flugzeug ist voll besetzt [ICAO 1990, S. 6f.].

Die ICAO sieht (im Gegensatz zur Auffassung in Deutschland) die Hauptaufgabe der Flughafenfeuerwehren nicht in der (direkten) Rettung von Menschenleben, sondern in der Brandbekämpfung. Dadurch wird einerseits den Flugzeuginsassen eine eigenständige Evakuierung aus dem Flugzeug und andererseits den Einsatzkräften (die in anderen Ländern nicht zwangsläufig von der Feuerwehr gestellt werden, sondern auch der Polizei oder anderen Organisationen angehören können) der Zugang zum Flugzeug ermöglicht. Hieraus erklärt sich auch die Festlegung der Anforderungen an den Flugzeugbrandschutz, die sich fast ausschließlich auf Löschtechnik konzentrieren, wie die folgenden Ausführungen zeigen.

2.3.1 Personelle Anforderungen

Die ICAO gibt international verbindliche Richtlinien für die technische Ausstattung zur Flugzeugbrandbekämpfung vor, die Aussagen über die erforderliche Anzahl an Fahrzeugen und die benötigte Wassermenge (Kapitel 2.3.2) enthalten.

2. Ausgangslage

Wenngleich diese Werte der Annahme einer sehr einfachen statischen Schadenslage entstammen und nicht wissenschaftlich oder empirisch ermittelt wurden, so geben sie doch verbindliche Größen vor. In dem entscheidenden Punkt der Personalmenge jedoch bleiben die ICAO-Richtlinien sehr allgemein:

„9.2.41 Recommendation.- In determining the number of personal required to provide for rescue, consideration should be given to the types of aircraft using the aerodrome.“ [ICAO 2009, S. 9-4]

(Empfehlung: Zur Bestimmung der Personalmenge, die für die Sicherstellung von Rettungsmaßnahmen erforderlich ist, sollten die Flugzeugtypen, die den Flughafen nutzen, beachtet werden.)

Bei dieser Passage handelt es sich nur um eine Empfehlung und nicht um eine verbindliche Anforderung. Zudem ist die Aussage in sich zwar sinnvoll und folgerichtig, doch für die vorliegende Fragestellung nur sehr wenig hilfreich. Sie enthält letztendlich keinerlei konkrete Hinweise darauf, wie viele Einsatzkräfte für die verschiedenen Flughafen-Kategorien jeweils vorgehalten werden müssen. Auch in den weiteren Ausführungen der ICAO finden sich keine Konkretisierungen dieser Forderung.

Die derzeitige Situation in Deutschland unterscheidet sich hiervon nicht wesentlich. Es existieren zwar eine Reihe von Regelungen und Empfehlungen, die Aussagen zur Anzahl der Einsatzkräfte enthalten, jedoch beziehen sie sich immer auf Detailspekte. Exemplarisch seien hier die FwDV 3 „Der Trupp geht im Gefahrenbereich grundsätzlich gemeinsam vor.“ [AFKzV, 2008, S. 16] oder die FwDV 7 „An jeder Einsatzstelle muss für die eingesetzten Atemschutztrupps mindestens ein Sicherheitstrupp [...] zum Einsatz bereit stehen.“ [AFKzV, 2005, S. 10] genannt. Aussage über die Gesamtanzahl an Einsatzkräften ermöglichen diese Detailregelungen jedoch nicht. Einzig die Deutsche Flugsicherung (DFS) macht in ihren „Nachrichten für Luftfahrer“ konkrete Angaben zur erforderlichen (Mindest-)Anzahl an Einsatzkräften [DFS 2000, S. 414]. Sie beschränkt sich herbei aber auf die Flughäfen der Kategorie 7 und niedriger. Die großen Verkehrsflughäfen der Kategorien 8 bis 10 bleiben unberücksichtigt. Eine weitere Herkunft von Personalvorgaben sind behördliche Auflagen. Flughafenbetreiber erhalten i. d. R. Auflagen, die sie zur Vorhaltung einer jeweils fest definierten Anzahl an Einsatzkräften verpflichten (meist im Rahmen der Anerkennung als Werkfeuerwehr). Diese Vorgaben basieren jedoch primär auf Einschätzungen der Aufsichtsbehörden statt auf nachvollziehbaren wissenschaftlichen oder statistischen Erkenntnissen.

Fast unberücksichtigt bleibt bei allen Vorgaben zur Personalmenge jedoch die Relation zum möglichen Schadensereignis und vor allem der Grad des möglichen Einsatzerfolges in Abhängigkeit von der Einsatzkräfteanzahl. Gerade die Frage nach der notwendigen bzw. optimalen Personalstärke ist jedoch von besonderer Bedeutung. Es besteht generell Einigkeit darüber, dass der Einsatzerfolg bei einem Flugzeugunfall, also die Anzahl der geretteten Flugzeuginsassen, in starkem Maße von der Personalstärke der Einsatzkräfte abhängt, wenngleich sich der Zusammenhang der beiden Größen bisher nicht beziffern lässt. Die naheliegende Schlussfolgerung, möglichst viel Personal zur Bewältigung solcher Ereignisse vorzuhalten, stößt jedoch sehr schnell an die Grenze der Realisierbarkeit.

2. Ausgangslage

Im Rahmen dieser Arbeit wird sich überdies zeigen, dass eine höhere Anzahl an Personal nicht zu einem linearen Zugewinn an Sicherheit führt. Gerade Sicherheitseinrichtungen müssen sich heutzutage verstärkt der Frage nach ihrer Wirtschaftlichkeit stellen. Ein Flughafenbetreiber ist in diesem Punkt ein Unternehmen wie jedes andere auch und aus wirtschaftlichen Gründen verständlicherweise daran interessiert, kostengünstig zu arbeiten. Brisanz erlangt die Frage nach der Personalmenge dadurch, dass insbesondere die Vorhaltung von (Rettungs-) Personal im 24-Stunden-Betrieb für seltene Ereignisse hohe laufende (Personal-) Kosten verursacht.

2.3.2 Technische Anforderungen

Die ICAO schreibt für alle Flughäfen vor, welche Löschmittel in den Fahrzeugen der Flughafenfeuerwehr mitgeführt werden und welche Ausstoßrate die Fahrzeuge erbringen müssen.

Mindestanforderung an Löschmittel und -technik nach ICAO								
Flughafen- kategorie	Schaum, Leistungsstufe A (Proteinschaum)		Schaum, Leistungsstufe B (AFFF oder Fluorproteinschaum)		Zusatzmittel (alternative Möglichkeiten)			Fahrzeuge für Lösch- u. Rettungs- arbeiten
	Wasser [Liter]	Ausstoß [Liter/min]	Wasser [Liter]	Ausstoß [Liter/min]	oder Pulver [kg]	oder Halon [kg]	oder CO ₂ [kg]	
gemäß Bemessungs- flugzeug								
1	350	350	230	230	45	45	90	1
2	1.000	800	670	550	90	90	180	1
3	1.800	1.300	1.200	900	135	135	270	1
4	3.600	2.600	2.400	1.800	135	135	270	1
5	8.100	4.500	5.400	3.000	180	180	360	1
6	11.800	6.000	7.900	4.000	225	225	450	2
7	18.200	7.900	12.100	5.300	225	225	450	2
8	27.300	10.800	18.200	7.200	450	450	900	3
9	36.400	13.500	24.300	9.000	450	450	900	3
10	48.200	16.600	32.300	11.200	450	450	900	3

Tabelle 1: Mindestanforderung an Löschmittel und -technik nach ICAO

Quelle: ICAO, 2009, S. 9-6

Maßgebend hierfür ist das so genannte „Bemessungsflugzeug“. Hierbei handelt es sich um das größte Flugzeug, das auf dem entsprechenden Flughafen regulär starten und landen soll. Es dient als Grundlage für die Dimensionierung vieler Einrichtungen und Anlagen. Neben den zentralen Einrichtungen wie Start- und Landebahn oder Taxiwegen werden auch die Anforderungen an den Flugzeugbrandschutz nach dem Bemessungsflugzeug festgelegt.

2. Ausgangslage

Die Einteilung von Flughäfen auf Basis des Bemessungsflugzeugs erfolgt nach Vorgabe der ICAO gemäß der nachfolgenden Tabelle 2. Beurteilt werden hierbei die Spannweite des Flugzeugs und der Rumpfdurchmesser. Fallen die beiden Kriterien in zwei unterschiedliche Kategorien, gilt die höhere Kategorie. Zur Veranschaulichung werden exemplarisch bekannte deutschen Flughäfen in den jeweiligen Kategorien genannt.

Flughafen-Kategorien nach ICAO			
Flughafen-Kategorie	Spannweite [m]	Rumpfdurchmesser [m]	Internationale deutsche Flughäfen
1	0 < 9	2	---
2	9 < 12	2	---
3	12 < 18	3	---
4	18 < 24	4	---
5	24 < 28	4	---
6	28 < 39	5	Friedrichshafen
7	39 < 49	5	Baden-Baden (in 60 min aufrüstbar auf 10), Dortmund, Erfurt, Paderborn/Lippstadt, Weeze
8	49 < 61	7	Bremen, Berlin-Tegel, Dresden, Münster/Osnabrück, Saarbrücken
9	61 < 76	7	Berlin-Schönefeld, Düsseldorf, Hahn, Hannover, Nürnberg
10	76 < 90	8	Berlin-Brandenburg (zukünftig), Frankfurt/Main, Hamburg, Köln/Bonn, Leipzig/Halle, München, Stuttgart

Tabelle 2: Flughafen-Kategorien nach ICAO

Quelle 1: ICAO, 2009, S. 9-4

Quelle 2: Rudlof, 2012, S. 1

Quelle 3: Auskunft des jeweiligen Flughafens

2.3.3 Anforderungen bezüglich der Eingreifzeit

Eine sehr strikte Vorgabe der ICAO ist die Eingreifzeit. Hierunter wird der Zeitraum von der Alarmierung der Flughafenfeuerwehr (also der Alarmauslösung) bis zum Beginn wirksamer Löschmaßnahmen verstanden. Die Eingreifzeit darf für alle Punkte im Start- und Landebahnsystem nicht mehr als 3:00 Minuten betragen [ICAO 2009, S. 9-6]. Zusätzlich spricht die ICAO die unverbindliche Empfehlung aus, einen Wert von 2:00 Minuten einzuhalten [ICAO 2009, S. 9-7]. Für deutsche Flughäfen ist der Wert von 2:00 Minuten verbindlich, da das Bundesverkehrsministerium mit Schreiben vom 23. Juli 1981 festgelegt hat, dass (auch) die Empfehlungen der ICAO anzuwenden sind [BMV 1981, S. 1981]. In der Eingreifzeit muss sich die Flughafenfeuerwehr ausrüsten, die Fahrzeuge besetzen, zum Schadensort fahren und mit Löschmaßnahmen beginnen. Hierbei ist es unerheblich, ob der Flughafen über eine 2.000-Meter-Bahn oder eine 4.000-Meter-Bahn verfügt. Diese Forderung gilt jedoch nur für gute Fahrbedingungen, d.h. für gute Sicht und sichere Fahrbahnverhältnisse. Bei schlechten Bedingungen darf es zu Abweichungen kommen, ohne dass für diesen Fall weitere Regelungen bestehen.

2. Ausgangslage

2.4 Risikowahrnehmung und -akzeptanz

Als Antwort auf die Frage 3 kann hier festgehalten werden, dass eine große öffentliche Aufmerksamkeit gegenüber Flugzeugunfällen besteht, die in keinem rational begründeten Verhältnis zu deren tatsächlicher Bedeutung steht. Ein Beispiel soll dies verdeutlichen. Nach Angaben der Vereinten Nationen sterben jährlich ca. 1,3 Millionen Personen im Straßenverkehr [WHO, 2013, S. VII]. Dies entspricht durchschnittlich mehr als 3.500 Toten pro Tag. Obwohl also täglich fünfmal so viele Menschen im Straßenverkehr umkommen wie im Luftverkehr weltweit in einem Jahr, wird der Luftverkehr mit jährlich ca. 700 Toten [FSF o. J.a] allgemein als „gefährlicher“ eingeschätzt und findet mehr öffentliche Beachtung. Die Tatsache, dass Risikowahrnehmung und -akzeptanz keiner logisch-mathematischen Gesetzmäßigkeit folgen, sollte also nicht außer Acht gelassen werden, wenn über Risikomanagement im Luftverkehr nachgedacht wird. Flugzeugunfälle können neben den direkten Unfallschäden folglich auch einen Imageverlust der beteiligten Unternehmen mit ggf. massiven wirtschaftlichen Auswirkungen zur Folge haben. Die Ursachen, warum es zu diesem Missverhältnis von gefühlter zu realer Gefährdung kommt, und die Verhaltensmuster, die die Bereitschaft zur hoher oder – wie im vorliegenden Fall – geringer Risikoakzeptanz prägen, werden im Folgenden dargestellt.

2.4.1 Risikowahrnehmung

Der Mensch ist zwar ein vernunftfähiges Wesen, aber nicht uneingeschränkt. Gerade beim Umgang mit Risiken zeigt sich dies immer wieder. Hier reagiert er oft mit zwei gegensätzlichen Verhaltensweisen, die bei rationaler Betrachtung gleichermaßen unangebracht sind: Verdrängung sowie Unter- oder Überbewertung. Hinzu kommt eine starke Beeinflussung durch mediale Präsenz oder aber durch fehlende Berichterstattung gemäß dem Motto „aus dem Auge, aus dem Sinn“.

- **Verdrängung und Unterbewertung**

Weder Raucher noch Motorradfahrer wollen das erhöhte Risiko, dem sie sich aussetzen, wahr haben. Deswegen wird dies oftmals verdrängt. Unbequeme Wahrheiten finden selten Gehör und werden gerne ignoriert. Die Wissenschaft bezeichnet dieses Verhalten als „selektive Wahrnehmung zur Vermeidung kognitiver Dissonanzen“ [Festinger, 1957, S. 3]. Dies ist eine allzu menschliche Eigenschaft. Einerseits ermöglicht dieses Verhalten zwar ein Leben ohne ständige Furcht (was durchaus auch als Segen angesehen werden darf), andererseits aber verschleiert es den unverstellten Blick auf die Realität und verhindert somit oftmals angemessenes Handeln. Dieses Verhalten tritt vor allem bei „schleichenden“ Risiken im persönlichen Einfluss- und Wahrnehmungsbereich auf [Hosemann 1989, S. 111ff]. Ebenso führen tägliche Risiken, die gleichförmige Schäden aufweisen, durch eine über Jahre kontinuierliche Zahl an Verlusten zu einem Gewöhnungseffekt, der eine Unterbewertung der Risiken zur Folge hat [Renn 1989, S. 180]. Verdrängung und Unterbewertung treten oft bei den selben Risiken parallel auf. Gute Beispiele sind hierfür Rauchen, hoher Alkoholkonsum oder ungesunde Ernährung.

2. Ausgangslage

- **Überbewertung**

Jeder Mensch ist permanent einer Vielzahl von technischen Risiken ausgesetzt, die im schlimmsten Fall zu letalen Folgen führen können [Krebs et al. 2000, S. 817]. Unter normalen Umständen haben diese in der Regel alle nur eine sehr geringe Eintrittswahrscheinlichkeit und werden daher kaum wahrgenommen. Konzentriert sich die Aufmerksamkeit zu stark auf ein Risiko, rücken Schadensverlauf und Schadenshöhe vermehrt ins Bewusstsein. Eine objektive Gewichtung mit der Eintrittswahrscheinlichkeit findet nicht mehr statt. Besonders tritt dieses Phänomen bei Risiken mit katastrophalem Schaden aber sehr geringer Eintrittswahrscheinlichkeit auf [Lübbe 1989, S. 30]. Zu dieser Art von Ereignissen gehören auch Flugzeugunfälle. Als Ergebnis kommt es zu einer erhöhten und (mathematisch gesehen) unbegründeten Furcht vor Unfällen im Luftverkehr.

- **Berichterstattung**

Die Wahrnehmung von Risiken hängt zunächst von den verfügbaren Informationen ab. In unserer heutigen Informationsgesellschaft kann davon ausgegangen werden, dass jedem Einzelnen nahezu alle Informationen also auch über Risiken zugänglich sind. Viel eher wird man jedoch mit der Situation konfrontiert, dass man widersprüchliche Aussagen findet und sich selbst ein Bild machen muss. Stärker aber noch als das (theoretische) Vorhandensein von Informationen prägt die praktische mediale Präsenz die Wahrnehmung [Schnabel 2008, S. 40f]. Oft werden Risiken, die bei nüchterner Betrachtung im Verhältnis zu den alltäglichen Gefahren fast bedeutungslos sind, von den Medien hochstilisiert, da sich diese auf die Schwere des Schadens konzentrieren [Kepplinger 2009]. Dies kann dazu führen, dass Gefahrenpotenziale überbewertet und insbesondere technische Risiken falsch (zu hoch) eingeschätzt werden [Lübbe 1989, S. 40].

Das mediale (und i. d. R. auch das individuelle) Interesse an einem Ereignis steigt überproportional mit der Anzahl der Betroffenen. Insbesondere bei Unfällen mit Todesfolgen ist dies zu beobachten da, Wohlstandsgesellschaften schlechte Nachrichten („only bad news is good news“) bevorzugen [Franck, 1989, S. 88]. Folglich konzentriert sich die Berichterstattung verstärkt auf diese Ereignisse. Viele Unfälle mit Reisebussen und nahezu jeder Flugzeugunfall weltweit werden in den Medien erwähnt, obgleich die Summe der Opfer des Individualverkehrs die Anzahl der Betroffenen von Bus- und Flugunfällen deutlich übersteigt [Lübbe 1989, S. 30]. So starben in der gesamten EU im Jahr 2011 ca. 1.000 Personen bei Verkehrsunfällen mit Bussen [EU 2013, S. 2], während im selben Jahr im gesamten Straßenverkehr alleine in der Bundesrepublik Deutschland 4.009 Verkehrstote [BAST, 2012, S. 1] gibt, über die nur selten berichtet wird. Noch extremer gestaltet sich dies beim Luftverkehr. Über nahezu jeden Flugzeugabsturz wird in den Medien berichtet [Franck, 1989, S. 30], insbesondere wenn er sich in der „westlichen Welt“ ereignet. Dabei ist die Anzahl der Personen, die pro Jahr bei Flugzeugunfällen weltweit ums Leben kommen, mit durchschnittlich ca. 700 Personen [FSF o. J.a] um ein vielfaches niedriger als allein die Anzahl der Verkehrstoten in der Bundesrepublik Deutschland.

2. Ausgangslage

Trotzdem wird der folgende Satz wohl nie in den Nachrichten zu hören sein: „Auch diese Woche sind in Deutschland bei 50 Verkehrsunfällen wieder so viele Personen umgekommen wie bei einem eventuellen Flugzeugabsturz“. Diese zwar irrationale aber dennoch vorhandene Wahrnehmung ist ein Phänomen, das insbesondere Großschadensereignisse wie z. B. Luftverkehrsunfälle betrifft [Hosemann 1989, S. 111]. Es sei erwähnt, dass es auch den gegenteiligen Effekt von medialer Präsenz gibt. So führt (massive) Werbung für die positiven Effekte eines Objektes bzw. einer Nutzung zu höherer Akzeptanz des damit verbundenen Risikos z. B. Rauchen oder Pkw-Verkehr [Kollert 1993, S. 17].

2.4.2 Risikoakzeptanz

Als Maßstab für die Akzeptanz von technischen Risiken ist der Vergleich mit den natürlichen Risiken anzusetzen. Denn diesen ist der Mensch unweigerlich ausgesetzt. Sie entziehen sich weitestgehend seiner willentlichen Einflussnahme. Zwar kann er sich mehr oder weniger vorsichtig verhalten, doch deren Eintreten kann er kaum vermeiden, sondern höchstens in ihren Folgen durch Vorsorge sowie angemessenes Verhalten mindern. Die Wahrscheinlichkeit, durch natürliche Risiken zu Tode zu kommen, beträgt $2 \cdot 10^{-4}$ Todesfälle pro Personennjahr für Personen im „sichersten“ Lebensabschnitt (vom 5. und 15. Lebensjahr). Im Gegensatz dazu sind technische Risiken durch den Menschen selbst verursacht. Ihr Vorhandensein muss in einem sinnvollen Verhältnis zum Nutzen stehen. Das Sicherheitskriterium „Minimale Endogene Mortalität“ (MEM) postuliert, dass die Summe aller technischen Risiken nicht mehr als das natürliche Risiko und ein einzelnes technisches Risiko höchstens 5% des natürlichen Risikos betragen darf [Krebs et al. 2000, S. 816f]. Damit ergibt sich eine Obergrenze des Sterberisikos von 10^{-5} . Dies ist unter normalen Bedingungen die Voraussetzung, damit der Nutzen das Risiko übersteigt. Bei Risiken, die sich ausschließlich auf materielle Güter beziehen, lässt sich zur Beurteilung problemlos eine Kosten-Nutzen-Analyse aufstellen. Wesentlich schwieriger wird die Beurteilung bei Risiken, die Personenschäden oder den Verlust von Menschenleben zur Folge haben. Dies führt letztlich unweigerlich zur Frage, wie viel ein Menschenleben wert ist. Auf diese Frage wird es aber aus verständlichen Gründen von keiner Stelle jemals eine offizielle Antwort geben. Daher wird die Lösung in der Regel darin bestehen, ein Restrisiko zu definieren, das als akzeptabel bewertet wird.

Eine Reihe von Faktoren tragen maßgeblich zur Akzeptanz oder zur Ablehnung von Risiken bei. Die im Folgenden genannten Punkte sind einfache Begrifflichkeiten, mit denen sich dies gut veranschaulichen lässt. Sie gehen teilweise ineinander über oder beeinflussen sich wechselseitig. Nichtsdestotrotz stellen sie wesentliche Kriterien dar, die (oft unbewusst) die Risikoakzeptanz beeinflussen.

- **Erhöhte Akzeptanz bei Einflussnahmemöglichkeit**

Kann ein Individuum Einfluss auf den Ablauf von Vorgängen nehmen („aktives Risiko“), steigt dadurch in der Regel die Risikoakzeptanz [Lübbe 1989, S. 27]. Dies resultiert aus der Annahme des Individuums, den Vorgang selbst zu beherrschen und mögliche Gefahrensituationen durch eigenes Können zu meistern. Das beste Beispiel hierfür bietet der Individualverkehr. Kaum ein Autofahrer hält sich für die mögliche Fehlerquelle des nächsten Unfalls.

2. Ausgangslage

Im Gegensatz dazu ist ein höheres Misstrauen oder Unbehagen in Bezug auf „passive Risiken“ vorhanden, die sich der Einflussnahme des Einzelnen entziehen [Hosemann 1989, S. 113] wie z. B. die Verkehrssysteme Aufzug, Seilbahn [Meyer 2000, S. 6] und eben auch Flugzeug.

- **Erhöhte Akzeptanz bei freiwilliger Exposition**

Risiken, denen sich Personen freiwillig aussetzen, werden in wesentlich höherem Maße akzeptiert [Hosemann 1989, S. 113]. Viele Fälle aus der Arbeitswelt zeigen dies. Oftmals wird freiwillig und vorsätzlich gegen Arbeitsschutzbestimmungen verstoßen, die eigens dem Zweck dienen, den Beschäftigten zu schützen. Noch deutlicher wird die Risikobereitschaft bei Freizeitaktivitäten wie z. B. Extremsportarten wie Fallschirmspringen, Bergsteigen etc. Hier ist das erlebte Risiko zum Teil sogar das eigentliche Ziel [Renn 1989, S. 172].

- **Erhöhte Akzeptanz bei natürliche Risiken**

Risiken, denen der Mensch von Natur aus ausgesetzt ist, werden meist eher als gegeben akzeptiert als technische Risiken [Lübbe 1989, S. 27]. Vor allem bei Risiken, bei denen der Tod in Verbindung mit Krankheiten und Alter oder mit Naturgewalten eintritt, ist die Akzeptanz wesentlich höher. Hier sind die Grenzen zwischen natürlichem Verlauf und negativer Beeinflussung durch äußere Faktor zum einen fließend und zum anderen schwer erkennbar. Der Erste Weltkrieg mit ca. 10 Millionen Toten ist ein Sinnbild für millionenfaches sinnloses und menschenverachtendes Vernichten von Menschenleben [Zeitverlag 2005, S. 166]. In der moralischen Bewertung mag dies unstrittig sein. Wesentlich unbekannter ist die Tatsache, dass nach dem ersten Weltkrieg in nur zwei Jahren zwischen 25 und 50 Millionen Menschen der so genannten Spanischen Grippe zum Opfer fielen [Johnson et al. 2002, S. 108ff.]. Gemessen an der Zahl der Toten war diese Grippepandemie für die Menschheit also wesentlich schwerwiegender als der Erste Weltkrieg. Dies entspricht jedoch in keiner Weise der öffentlichen Wahrnehmung und Bewertung beider Ereignisse.

- **Erhöhte Akzeptanz bei Nicht-Entscheiden / Nicht-Handeln (Wahrung des Status quo)**

Oft ergeben sich Situationen, in denen nur zwei Optionen zur Auswahl stehen: Duldung des Risikos A oder aktives Eingehen des Risikos B zur Vermeidung des Risikos A. Bei der Abwägung einer Impfung beispielsweise muss das Risiko von Impfkomplicationen mit dem Risiko eines Krankheitsausbruchs verglichen werden. Zögern oder Ablehnen des Risikos B (Impfung) vermeidet zwar Impfkomplicationen, führt aber unweigerlich zur Akzeptanz des Risikos A (Krankheit). Dies erfolgt oft in der (falschen) Annahme, dass sich das Risiko von Schäden durch das Vermeiden bestimmter Handlungen (z. B. Auslandsreisen in Risikogebiete) generell verhindern lässt. Ähnlich verhält es sich bei Unfällen mit bewusstlosen Motorradfahrern. Das Abnehmen des Helms wie auch der Verzicht auf diese Maßnahme haben unterschiedliche Risiken zur Folge. In falscher Einschätzung der Gefahren entscheiden sich viele Ersthelfer dafür, nichts zu tun. Der Mensch neigt offensichtlich bevorzugt zu Risiken, die in Folge von Unterlassenen statt durch aktives Handelns auftreten.

2. Ausgangslage

Dies mag durchaus mit der moralischen Komponente bei der Bewertung von Handeln und der damit verbundenen Gefahr von Fehlern zusammenhängen. Sinnvoll im Allgemeinen oder förderlich im Rahmen der Gefahrenabwehr ist dies jedoch nicht.

- **Verringerte Akzeptanz bei unfreiwilliger und unbeeinflussbarer Risikoexposition**

Die Akzeptanz von Risiken sinkt, sobald sich der Mensch diesen bewusst aber unfreiwillig aussetzen soll, insbesondere wenn er den Verlauf des Geschehens nicht aktiv beeinflussen kann [Hosemann 1989, S. 113]. Es steht also bereits im Voraus fest, dass sich der Verlauf in jedem Fall der Einflussnahme entzieht (z. B. Verkehrsunfälle von Fußgängern, Kernkraft). Die beiden Aspekte „unfreiwillig“ und „unbeeinflussbar“ bilden oft ein Paar. Die Unfreiwilligkeit besteht in diesem Fall nicht darin, zu einer Risikoexposition als solche sondern zur Duldung der fehlenden Einflussnahme gezwungen zu sein (z.B. Seilbahn, Flugzeug).

- **Verringerte Akzeptanz trotz geringer Eintrittswahrscheinlichkeit**

Risiken mit geringer Eintrittswahrscheinlichkeit, also vor allem Großschadensereignisse, werden nahezu immer überschätzt, insbesondere wenn es sich um technische Risiken handelt [Lübbe 1989, S. 40]. Scheinbar fällt es dem Menschen schwer, Wahrscheinlichkeiten und Zahlen richtig zu bewerten, deren Größenordnung er aus seinem täglichen und konkret erfahrbaren Alltag nicht kennt [Hosemann 1989, S. 111]. Ein sehr passendes Beispiel für diesen irrationalen Umgang mit Wahrscheinlichkeiten ist das Lotto-Spiel (wenngleich es sich hier um ein „positives“ Risiko handelt). Die Eintrittswahrscheinlichkeit für „sechs Richtige“ aus 49 beträgt bekanntlich ca. 1 : 14 Millionen. Gäbe es das Lottospiel schon seit Christi Geburt, und eine Familie hätte seit 2.000 Jahren Generation für Generation einmal pro Woche gespielt, würde der Erwartungswert für den berühmten Sechser immer noch 1 : 134 betragen. Trotz dieser geringen Aussichten erfreut sich Lotto einer großen Beliebtheit.

- **Verringerte Akzeptanz bei abstrakten Risiken**

Abstrakte Risiken, also Gefahren, die nicht der direkten Erfahrung des Alltagslebens entstammen, werden oft überbewertet. So hält fast niemand eine Autofahrt mit sich selbst am Steuer für ein ernstliches Risiko [Meyer 2000, S. 7]. Dieses Phänomen lässt sich schlecht erklären, ist jedoch immer wieder zu beobachten. Vermutlich ist es das Resultat mehrerer Einflüsse. Einerseits werden bekannte alltägliche Gefahrenquellen unterbewertet gemäß dem Motto „Gefahr erkannt, Gefahr gebannt“, da sie einem Gewöhnungseffekt unterliegen. Andererseits weckt Unbekanntes oftmals mehr unbegründete Ängste als Vertrautes. Sehr treffend lässt sich diese Verhaltensweise mit dem geflügelten Wort „die Angst des Rauchers vor dem Schlangenbiss“ [Etzold 2001, S. 40] beschreiben. Zudem erschwert der laienhafte (wenn nicht gar dilettantische) Umgang mit den Wahrscheinlichkeiten eine sinnvolle Einschätzung der tatsächlichen Risikolage. Viele Menschen haben beispielsweise Angst davor, beim Flug in den Urlaub mit dem Flugzeug abzustürzen und zu Tode zu kommen. Verglichen mit den ca. 7.900 Toten in Deutschland infolge von Unfällen im privaten Haushalten [Statistisches Bundesamt 2012, S. 2.5.1] verwundert diese Einschätzung.

2. Ausgangslage

Alles in allem scheint der Mensch nur sehr bedingt in der Lage zu sein, Risiken realistisch einschätzen zu können. Für den Luftverkehr kann zudem noch festgehalten werden, dass die Aufmerksamkeit, die dem Thema Sicherheit im Luftverkehr von Seiten der Medien und der Öffentlichkeit entgegengebracht wird, relativ hoch ist. Gleichzeitig treffen auf den Verkehrsträger Flugzeug mehrere Kriterien zu, die eine wirklichkeitsnahe Einschätzung des vorhandenen Risikos und eine Akzeptanz desselben erschweren. All dies verdeutlicht, wie berechtigt die Forderung an die Gesellschaft ist, sich von der primären Gefahrenbetrachtung zu lösen und zu einer rationalen Risikobeurteilung zu gelangen [Gethmann 1994, S. 6]. Es werden also dringlich objektive Methoden benötigt, um Unfallwahrscheinlichkeiten und Schadenshöhen quantifizieren zu können. Nur unter dieser Voraussetzung ist es möglich, Risiken rational zu bewerten und Maßnahmen zur Schadensminderung in einer sachlichen Diskussion mit dem Ziel zu erörtern, eine angemessene Akzeptanz oder eine gerechtfertigte Ablehnung zu erreichen.

3. Grundlagen

Im vorliegenden Kapitel erfolgt eine Darstellung der bestehenden Erkenntnisse aus verschiedenen Fachgebieten. Der Wissensstand von Forschung und Technik sowie die derzeitigen Richtlinien und Verfahren sind Gegenstand der Untersuchung. Hierzu werden verschiedene Themenbereiche erörtert, die zunächst nicht in einem direkt Zusammenhang zueinander stehen, aber für die weitere Bearbeitung der Aufgabenstellung relevant sind. An dieser Stelle also zunächst unverbunden nebeneinander stehend bilden sie dennoch gemeinsam die Basis für diese Arbeit. Konkret werden in diesem Kapitel folgende Themenbereiche betrachtet:

- Zu Beginn werden die relevanten Grundbegriffe dieser Arbeit definiert.
- Es schließt sich ein Unterkapitel mit Erfahrungen aus Flugzeugunfällen an. Im Gegensatz zu Kapitel 2.2 sind hier aber nicht Ursache und Entstehung von Flugzeugunfällen Inhalt, sondern einsatzrelevante Erkenntnisse wie die möglichen Schadenslagen und die Verteilung von Verletzungsmustern.
- Im Folgenden werden die Grundlagen der Einsatztaktik bezüglich Brandbekämpfung und Menschenrettung bei Flugzeugunfällen dargestellt.
- Des Weiteren werden die Grundlagen der Risikoforschung dargestellt und erläutert.
- Zuletzt erfolgt eine kurze Darstellung der Methoden zur Modellbildung. Dies sind der morphologische Kasten zur Strukturierung mehrdimensionaler Fragestellungen und die zellulären Automaten zur Modellierung dynamischer Systeme. Daneben werden noch die Prinzipien der Kybernetik und der Monte Carlo-Methode sowie das Gesetz der großen Zahlen erläutert.

3.1 Grundbegriffe

Zum Verständnis und zur Klarheit von wissenschaftlichen Arbeiten ist ein einheitlicher Gebrauch von Begriffen und Fachtermini notwendig. Sind unterschiedliche Bedeutungen gebräuchlich, kommt es schnell zu Fehlinterpretationen oder Verständnisschwierigkeiten. Durch die Definition von Fachausdrücken werden gleiche Begrifflichkeiten geschaffen. Dies dient der besseren Verständlichkeit und hilft zugleich, Missverständnisse auszuschließen, vor allem wenn Begriffe umgangssprachlich „anders“ verwendet werden. Aus diesem Grund wird in diesem Kapitel für die wichtigsten Begriffe eine kurze Definition gegeben. Eine Ausnahme besteht jedoch für den Begriff „Risikoanalyse“. Da es sich um den Schlüsselbegriff schlechthin der vorliegenden Arbeit handelt, soll er in einem eigenen Kapitel ausführlicher erklärt werden. Eine detaillierte Definition dieses Begriffs und eine Beschreibung der zugrunde liegenden Systematik ist daher in Kapitel 3.3 zu finden.

3. Grundlagen

3.1.1 International Civil Aviation Organization (ICAO)

Bei der International Civil Aviation Organization (ICAO) handelt es sich um die internationale zivile Luftfahrt-Organisation. Sie ist eine Unterorganisation der Vereinten Nationen mit Sitz in Montreal, Kanada. Die wesentlichen Ziele der ICAO bestehen darin, verbindliche Vereinbarungen für den Luftverkehr zu treffen, damit international gleiche (Verkehrs-)Regeln und verbindliche Sicherheitsstandards in der Luftfahrt gelten [ICAO 2006, S. 1].

3.1.2 Flughafen

Die amtliche Bezeichnung für alle behördlich zugelassenen Start- und Landebahnen ist „Flugplatz“. Dieser gliedert sich auf in:

- Flughafen (voller Bauschutzbereich gemäß §12 LuftVG d.h. Sicherheitsflächen um die Start- u. Landebahn herum sowie Baubeschränkungen auch außerhalb des Flughafengeländes)
- Landeplatz (eingeschränkter Bauschutzbereich gemäß §12 LuftVG)
- Segelfluggelände (keine oder stark eingeschränkte Nutzung von Motorflugzeugen)

Sowohl die Flughäfen als auch die Landeplätze sind beide nochmals unterteilt in Verkehrs- und Sonderflughäfen bzw. -landeplätze. Verkehrsflughäfen und -landeplätze dienen dem regulären Transport von Passagieren und Fracht. Sonderflughäfen und -landeplätze weisen eine besondere Art der Nutzung auf wie z. B. die werkseigene Start- und Landebahn eines Unternehmens.

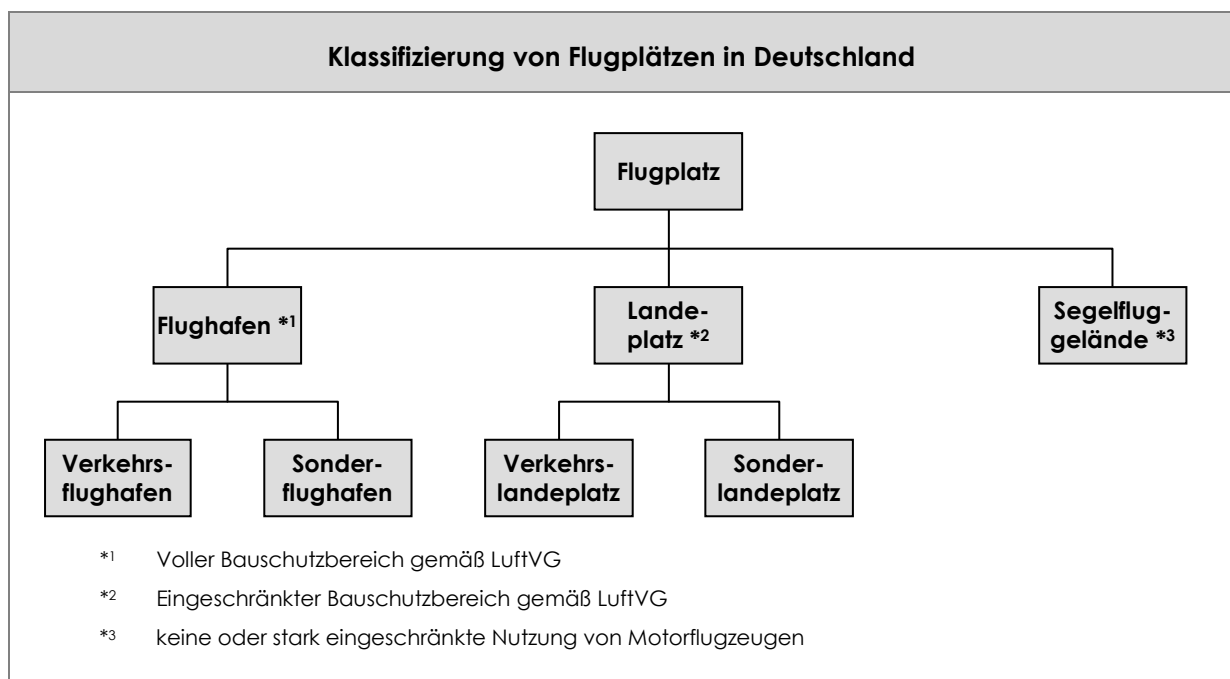


Abbildung 6: Klassifizierung von Flugplätzen in Deutschland

Quelle: BMJ 2007, S. 6ff

3. Grundlagen

In den (englischsprachigen) Richtlinien der ICAO wird einheitlich der Begriff „Airport“ verwendet. Der Einfachheit halber wird daher in Anlehnung an die ICAO durchgängig der Begriff „Flughafen“ verwendet, nicht zuletzt da die Verkehrsflughäfen die primäre Zielgruppe dieser Arbeit sind, erfolgt über sie doch der kommerzielle nationale und internationale Luftverkehr.

3.1.3 Ereignis

„Ereignisse“ sind Situationen oder Vorgänge, bei denen es zu Störungen der regulären Abläufe oder zu Schäden kommt oder bei denen die Eintrittswahrscheinlichkeit hierfür deutlich erhöht ist (= konkrete Gefahr). In der vorliegenden Arbeit wird der Begriff „Ereignis“ in diesem Sinne verwendet. Der Vollständigkeit halber sei erwähnt, dass der Begriff „Ereignis“ im mathematischen Sinne eine abweichende Bedeutung besitzt. In der Stochastik wird immer dann von einem Ereignis gesprochen, wenn der Ausgang einer Situation zuvor als solches definiert wurde. Jeder mögliche Ausgangszustand kann demnach je nach Betrachtung und Fragestellung als Ereignis bezeichnet werden. Der Begriff wird hierbei wertneutral verwendet. Abschließend lässt sich festhalten: Ein „Ereignis“ ist in der Mathematik gleichbedeutend mit „zuvor definierter (End-)Zustand“.

3.1.4 Schaden

Unter „Schaden“ wird die Summe aller negativen Auswirkungen verstanden, die ein Ereignis hervorruft. Hierbei ist es unerheblich, in welcher Größe der Schaden gemessen wird. So werden durch ein Ereignis oft materielle Schäden (i. d. R. gemessen in einer Währung) und Personenschäden (z. B. Anzahl Verletzte/Tote) zugleich hervorgerufen. Weitere Maßeinheiten sind denkbar. Insbesondere im Bereich der Umweltgefahren kommen vor allem physikalische Einheiten (z. B. m^3 verunreinigtes Trinkwasser) vor. Ebenso möglich ist es, andere zweckdienliche Einheiten zu verwenden wie z. B. „zerstörte Wohneinheiten“ bei Erdbeben.

3.1.5 Flugzeugunfall

Ein Flugzeugunfall ist zunächst einmal ein Ereignis, von dem jedermann eine bildhafte Vorstellung besitzt. Bei näherer Betrachtung zeigt sich jedoch, dass – je nach Untersuchungsziel – der Begriff verschieden ausgelegt und die Daten unterschiedlich erhoben werden. Insbesondere beim Gebrauch von Statistiken und Zahlenmaterial ist folglich die jeweilige Definition zu beachten, da sie über eine Vergleichbarkeit und Aussagefähigkeit der Zahlen entscheidet. Gebräuchlich sind u. a. die folgenden Definitionsmerkmale:

- Schaden: Jeder Unfall eines Flugzeugs oder Totalverlust eines Flugzeugs
- Menschen: Gesamtanzahl der tödlich Verunglückt / Anzahl an Unfällen mit Toten
- Bezugsgröße: Flugzeugstarts oder Flugzeug-km oder Passagier-km (ggf. auch in Meilen statt km)
- Flugzeug: alle Luftfahrzeuge (incl. Hubschrauber, Zeppeline etc.) oder nur Flugzeuge (alle oder nur bestimmte Arten z. B. $>5,7t$ oder $> 2,25t$)

3. Grundlagen

Ein wesentliches Unterscheidungsmerkmal ist zudem noch, ob es sich um ein ziviles oder militärisches Flugzeug handelt. In der Regel werden militärische Flugzeuge nicht betrachtet. Oft entfallen auch Terrorakte, wenn z. B. die technische Zuverlässigkeit im Fokus der Betrachtung steht. Auch der Ausschluss von bestimmten Flugzeugarten ist möglich. Die beiden letztgenannten Exklusionen liegen bei der Boeing-Statistik vor, die die Quelle zu Abbildung 5 darstellt. Bei Unfallangaben mit Passagieren (Verletzte oder Tote) wird zudem jeder betroffene Flug gezählt, unabhängig davon, wie viele Personen betroffen sind.

Die ICAO definiert Flugzeugunfälle wie folgt:

“Accident

An occurrence associated with the Operation of an aircraft which takes place between the time any person boards the aircraft with the intention of flight until such time as all such persons have disembarked, in which:

a) A person is fatally or seriously injured as a result of:

- being in the aircraft; or*
- being in direct contact with any part of the aircraft, including parts which have become detached from the aircraft; or*
- being in direct exposure to jet blast;*

except when the injuries are from natural causes, self-inflicted or inflicted by other persons, or when the injuries are to stowaways hiding outside the areas normally available to the passengers and crew; or

b) the aircraft sustains damage or structural failure which:

- adversely affects the structural strength, Performance or flight characteristics of the aircraft; and*
- would normally require major repair or replacement of the affected component,*

except for engine failure or damage, when the damage is limited to the engine, its cowlings or accessories; or for damage limited to propellers, wing tips, antennas, tires, brakes, fairings, small dents or puncture holes in the aircraft skin; or

c) the aircraft is missing or is completely inaccessible.” [Quelle: ICAO 2010, S. 1-1]

(Unfall

Ein Ereignis im Zusammenhang mit dem Betrieb eines Flugzeugs, das zwischen dem Zeitpunkt, an dem Personen das Flugzeugs mit dem Vorsatz einer Flugreise betreten, und dem Zeitpunkt, an dem alle Personen von Bord gegangen sind, stattfindet, bei dem:

a) eine Person tödlich oder schwer verletzt wird infolge:

- eines Aufenthalts im Flugzeug; oder*
- eines direkten Kontaktes mit dem Flugzeug, einschließlich Teilen, die sich vom Flugzeug gelöst haben; oder*
- einer direkten Exposition gegenüber eines Triebwerkluftstrahls*

ausgenommen, wenn die Verletzung natürliche Ursachen hat, selbst oder von anderen Personen verursacht wurde oder wenn die Verletzungen bei blinden Passagieren dadurch auftreten, dass diese sich an Stellen verborgen halten, die normalerweise nicht für Passagiere oder Besatzungsmitglieder zugänglich sind;

3. Grundlagen

ODER

b) das Flugzeug eine Beschädigung oder einen Strukturschaden erleidet, der:

- die konstruktive Stabilität/Statik, das Leistungsvermögen oder die Flugeigenschaften des Flugzeugs nachteilig beeinflusst; und
- der normalerweise eine größere Reparatur oder den Austausch der betroffenen Bauteile erfordern würde,

ausgenommen Fehler oder Schäden der Triebwerke, wenn sich der Schaden auf ein Triebwerk, dessen Verkleidung oder Anbauteile beschränkt; oder der Schaden sich auf Propeller, Tragflächenspitzen, Antennen, Reifen, Bremsen, Verkleidung, kleine Dellen oder Löcher in der Flugzeughülle beschränkt.

ODER

c) das Flugzeug vermisst wird oder völlig unzugänglich ist.)

Für die vorliegende Arbeit wird die Definition der ICAO verwendet. Es werden jedoch Absatz a), Punkt 2 (Verletzungen von Personen durch das Flugzeug) und Absatz a), Punkt 3 (Verletzungen durch Triebwerksluftströme) ausgeschlossen, da es sich hierbei primär um Aspekte der Arbeitssicherheit und der Verkehrssicherheit handelt, deren Folgen nur sehr bedingt von der Anzahl der verfügbaren Einsatzkräfte abhängt.

Zusätzlich zu den Merkmalen der ICAO-Definition werden noch Situationen berücksichtigt, die ein Gefahrenpotenzial besitzen (Stichwort „konkrete Gefahr“), bei denen aber durch ein schnelles und richtiges Eingreifen der Einsatzkräfte Schäden weitestgehend verhindert werden können. Als Beispiele lassen sich hier überhitzte Bremsen oder Triebwerksbrände nennen. Eine ausführliche Erörterung, welche Situationen Bestandteil der Untersuchung sind, findet sich in Kapitel 4.3 „Untersuchungsraum und Systemgrenzen“.

3.1.6 Risiko

Der Begriff „Risiko“ ist in der vorliegenden Arbeit von zentraler Bedeutung und bedarf daher einer eindeutigen Begriffsbestimmung. Folgende Definition findet sich in der Literatur:

*„Risiko: Kombination der Wahrscheinlichkeit des Auftretens eines Schadens und des Schweregrades dieses Schadens.“
[ISO/IEC 1999, S. 2]*

Diese Definition ist zwar eine Einschränkung auf einen physikalisch und medizinisch geprägten Risikobegriff [Renn 2007, S. 26], aber im Rahmen der vorliegenden Aufgabenstellung ist eine technische Sichtweise angemessen und zielführend. Eine Definition ist auch insofern erforderlich, da der Begriff „Risiko“ zwar zum alltäglichen Sprachwortschatz gehört, in der Umgangssprache jedoch oftmals sehr unscharf und teilweise sogar falsch verwendet wird. An dem zugehörigen Adjektiv lässt sich dies gut verdeutlichen. So wird „riskant“ oft in der Bedeutung von „wenig wahrscheinlich“ im Zusammenhang mit einem positiven Ausgang verwendet.

3. Grundlagen

Ein Beispiel für scheinbar riskantes Verhalten ist, beim Roulettespiel auf eine Zahl zu setzen anstatt auf eine Farbe. Tatsächlich ist die Gewinnwahrscheinlichkeit beim Zahl-Spiel $P_G(\text{Zahl})$ deutlich niedriger und die Verlustwahrscheinlichkeit $P_V(\text{Zahl})$ erkennbar höher als bei einem Farb-Spiel. Unberücksichtigt bleibt hierbei jedoch die Höhe des möglichen Gewinns. Wird miteinbezogen, dass der mögliche Gewinn bei einem Zahl-Spiel das 18fache des Farbspiels beträgt, ergibt sich für beide Spielarten der gleiche Erwartungswert. Das Risiko eines Verlustes ist in beiden Fällen gleich groß und beträgt jeweils 2,7% des Einsatzes ($= 1/37$). Die Wahrscheinlichkeit eines Schadenseintritts allein sagt also noch nichts über das Risiko bzw. den durchschnittlich zu erwartenden Schaden aus.

Gewinnerwartung beim Roulettespiel		
Wahrscheinlichkeiten und Erwartungswerte	Farb-Spiel	Zahl-Spiel
Gewinnwahrscheinlichkeit P_G	$P_G(\text{Farbe}) = \frac{18}{37}$	$P_G(\text{Zahl}) = \frac{1}{37}$
Verlustwahrscheinlichkeit P_V (nur zum Vergleich – der Wert findet keine Verwendung in der weiteren Berechnung)	$P_V(\text{Farbe}) = 1 - P_G(\text{Farbe}) = \frac{19}{37}$	$P_V(\text{Zahl}) = 1 - P_G(\text{Zahl}) = \frac{36}{37}$
Gewinnhöhe G	$G(\text{Farbe}) = 2$	$G(\text{Zahl}) = 36$
Einsatz	1	1
Erwartungswert E (Durchschnittlich zu erwartender Gewinn, wobei ein negativer Wert hier ein Verlust bedeutet)	$E(\text{Farbe}) = \left(\frac{18}{37} \cdot 2\right) - 1 = -\frac{1}{37}$	$E(\text{Zahl}) = \left(\frac{1}{37} \cdot 36\right) - 1 = -\frac{1}{37}$

Tabelle 3: Gewinnerwartung beim Roulettespiel

Auch in der zweiten Bedeutung wird der Begriff wenig präzise verwendet. Oft wird „riskant“ auch als „gefährlich“ im Sinne von hohem Schaden oder Lebensgefahr gebraucht. Durch einen Schlangenbiss zu sterben wird als großes Risiko angesehen. Richtig ist zwar die Erkenntnis, dass Schlangenbisse oft zu lebensbedrohlichen Zuständen führen, es wird hierbei jedoch nicht berücksichtigt, dass die Wahrscheinlichkeit für ein solches Ereignis extrem niedrig ist, wenn man grob fahrlässiges Verhalten ausschließt.

Beide Beispiele zeigen, dass weder die Eintrittswahrscheinlichkeit noch die möglichen Auswirkungen eines Ereignisses allein dazu geeignet sind, ein Risiko hinreichend zu beschreiben, auch wenn beide wesentliche Bestandteile ebendieses sind. Die oben aufgeführte Definition hingegen bietet die zutreffende Lösung, indem sie die beiden Elemente „Eintrittswahrscheinlichkeit“ und „Schaden“ folgerichtig miteinander kombiniert. Mathematisch betrachtet besagt sie:

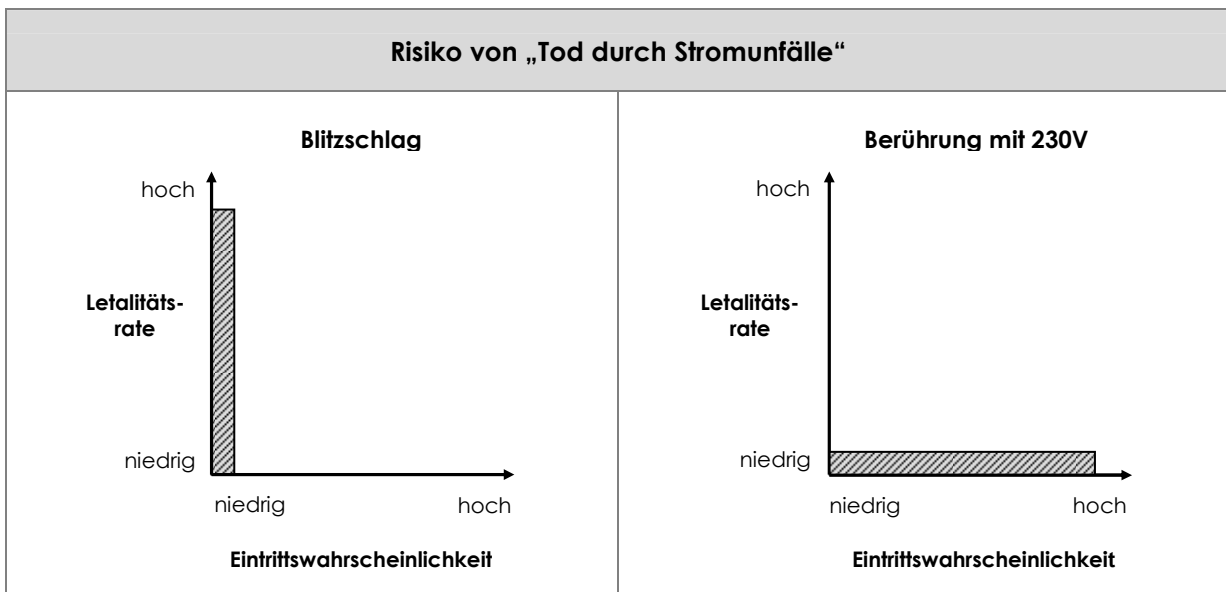
$$R_E = P_E \cdot S_E \quad (1)$$

mit:

3. Grundlagen

- R - Risiko
- P - Wahrscheinlichkeit (Eintritts~)
- S - Schaden (-shöhe)
- E - Ereignis

Mathematisch gesehen ist ein Risiko also nichts anderes als ein Erwartungswert, nämlich das Produkt aus der Eintrittswahrscheinlichkeit eines Ereignisses und dem dabei entstehenden Schaden. Ereignisse mit hoher Eintrittswahrscheinlichkeit und geringer Schadenshöhe können daher das gleiche Risiko aufweisen wie Ereignisse mit geringer Eintrittswahrscheinlichkeit und großer Schadenshöhe. Sehr anschaulich lässt sich dieser in Formel (1) beschriebene Zusammenhang von Wahrscheinlichkeit und Schaden am Beispiel „Tod durch elektrischen Strom“ darstellen. Hier werden die zwei Ereignisse „Blitz“ und „Berührung der Phase (230V)“ verglichen. Während die Wahrscheinlichkeit für einen Blitzschlag äußerst gering ist, ist der Schaden gemessen an der Letalitätsrate hierbei sehr hoch. Im Gegensatz dazu kommen viele Menschen aus Versehen mit stromführenden Teilen der Hauselektrik in Berührung und überstehen dies in aller Regel unbeschadet.



Risiko von „Tod durch Stromunfälle“

Ein Ereignis hat in aller Regel jedoch nicht immer das gleiche Schadensausmaß. Rutscht beispielsweise eine Person beim Laufen aus, können die Folgen von ein paar blauen Flecken über Knochenbrüche bis hin zum Tod bei einem sehr unglücklichen Sturz reichen. Der Schaden und die dazugehörigen Wahrscheinlichkeiten müssen also differenzierter betrachtet werden, um ein komplexes Risiko darstellen zu können. Hierzu wird der Schaden in verschiedene Schadensklassen aufgeteilt, die jeweils mit einer spezifischen Wahrscheinlichkeit eintreten. Daraus ergibt sich:

$$R_E = \sum_{i=0}^n P_{Ei} \cdot S_{Ei} \quad (2)$$

3. Grundlagen

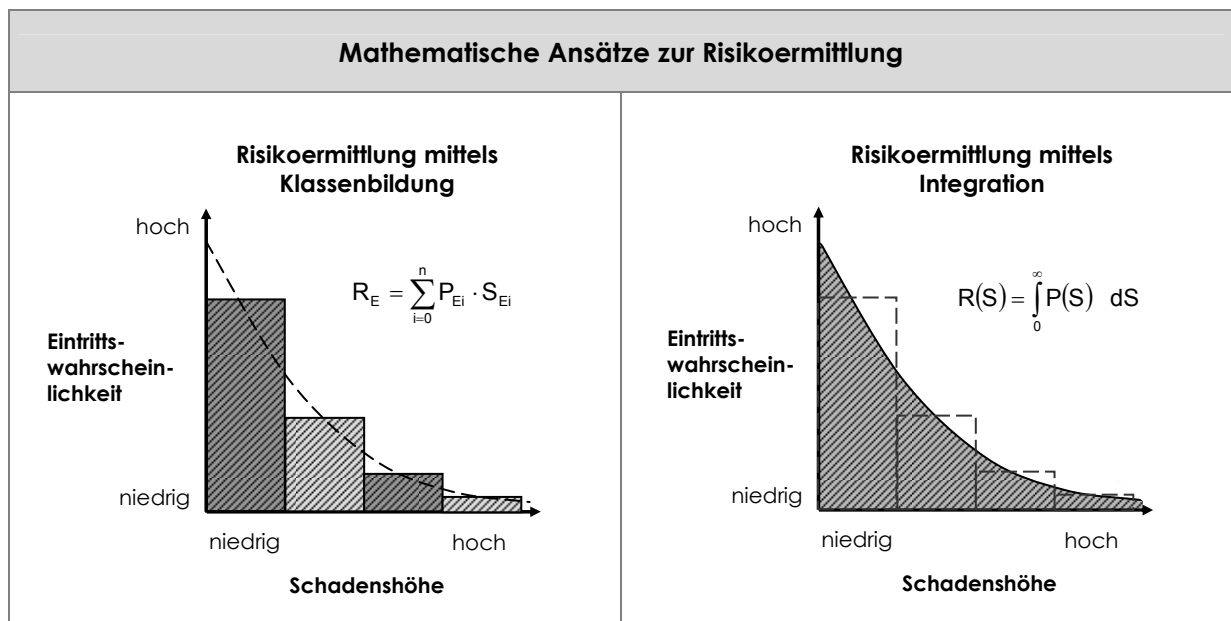
mit:

- R_E - Risiko bezogen auf das Ereignis E
- S_{Ei} - Schaden(-shöhe) des Schadens i beim Ereignis E
- P_{Ei} - Eintrittswahrscheinlichkeit P des Schadens i beim Ereignis E

Um die Berechnung mathematisch exakt durchzuführen, werden die Klassenbildung des Schadens und die klassenweise Multiplikation mit der jeweiligen Eintrittswahrscheinlichkeit ($P_{Ei} \cdot S_{Ei}$) durch eine Schadensfunktion und deren Integration ersetzt. Dadurch ergibt sich aus Formel (3) folgende präzisierte Formel:

$$R(s) = \int_0^{\infty} P(S) \, dS \quad (3)$$

Die Unterschiede zwischen Formel (2) „Risikoermittlung mittels Klassenbildung“ und Formel (3) „Risikoermittlung mittels Integration“ werden nachfolgend in Abbildung 8 dargestellt:



Mathematische Ansätze zur Risikoermittlung

3. Grundlagen

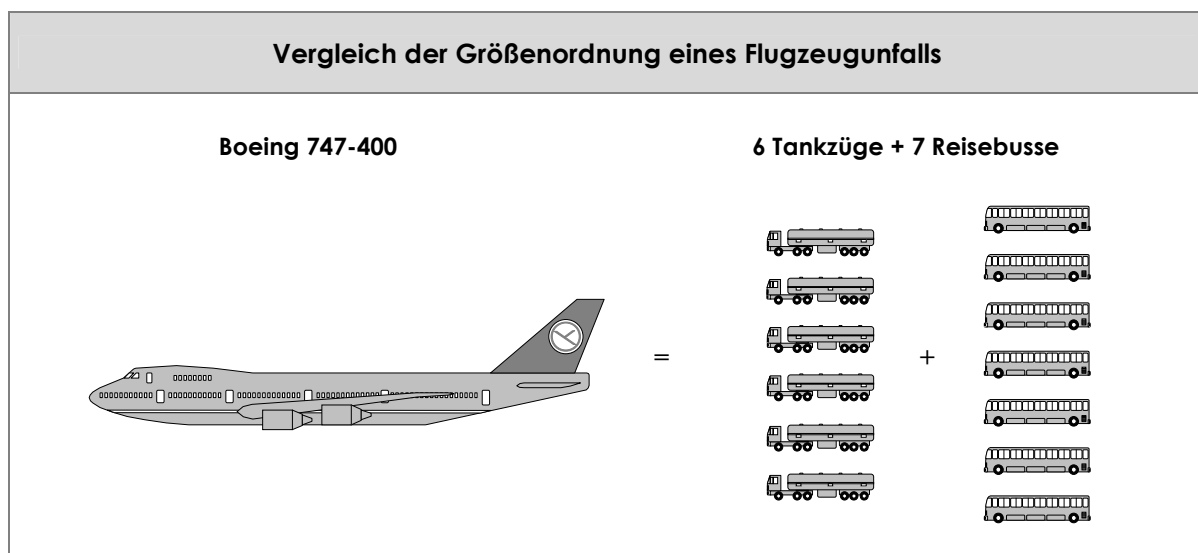
3.2 Schadenslage „Flugzeugunfall“

3.2.1 Rahmenbedingungen und Einflussgrößen

Die Rettung von Insassen aus Flugzeugen ist (vor allem in Verbindung mit Brandbekämpfung) ein sehr komplexer Vorgang. Alle Maßnahmen müssen inhaltlich aufeinander abgestimmt, zeitlich koordiniert und unverzüglich (oftmals aus dem Stehgreif heraus) erfolgen. Hinzu kommt, dass die grundsätzlichen Rahmenbedingungen bei Flugzeugunfällen objektiv betrachtet per se äußerst ungünstig sind:

- Flugzeuge besitzen außen wie innen eine sehr hohe Brandlast (Treibstoff, Gepäck, Bauteile aus Kunststoff etc.) und stellen somit für die Flugzeuginsassen und die Einsatzkräfte eine hohe Gefahrenquelle dar.
- Auf engstem Raum befindet sich eine große Anzahl von Menschen.
- Der den Flugzeuginsassen zur Verfügung stehende Raum ist sehr knapp und verfügt nicht über Ausweichflächen.
- Die Zeit, die für einen erfolgreichen Lösch- und Rettungseinsatz zur Verfügung steht, ist äußerst begrenzt, da der Flugzeugkörper nur einen zeitlich sehr begrenzten Schutz vor Feuer und Wärme zu bieten vermag. Der Einsatz muss daher beim ersten Angriff erfolgreich sein, da in der Regel für einen zweiten Versuch keine Zeit mehr bleibt.

Anhand eines kurzen Beispiels (Abbildung 9) soll verdeutlicht werden, um welche Größenordnungen es sich hierbei handelt.



Vergleich der Größenordnung eines Flugzeugunfalls

3. Grundlagen

Vergleicht man einen Flugzeugunfall einer voll betankten und voll besetzten „klassischen“ Boeing 747-400 (max. 524 Passagiere und 217.000 Liter Treibstoff) [Boeing o. J.] mit einem vergleichbaren Ereignis auf einer Autobahn, so entspricht dies einem Massenunfall mit ca. sieben voll besetzten Reisebussen und sechs Tanklastzügen. Bereits der Zusammenstoß nur eines Tankzuges mit nur einem Reisebus würde im Straßenverkehr als äußerst schwerer Verkehrsunfall gelten.

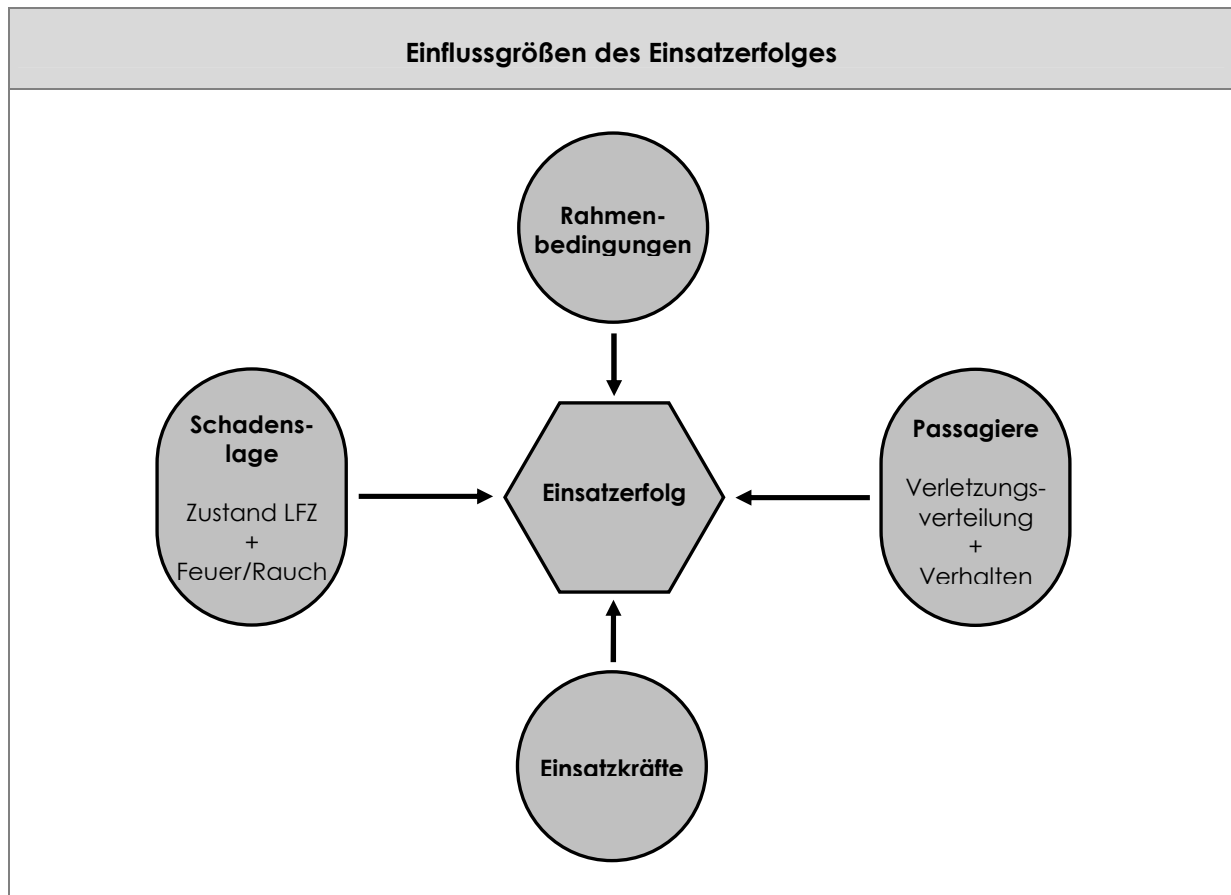


Abbildung 10: Einflussgrößen des Einsatzerfolges

Die beschriebenen Rahmenbedingungen machen deutlich, dass Rettungseinsätze bei Flugzeugunfällen am Boden nur dann Aussicht auf Erfolg haben, wenn von Anfang an die richtigen Maßnahmen getroffen werden. Die Schlüsselgrößen, auf die eine Flughafenfeuerwehr Einfluss nehmen kann, sind die Art und Anzahl der im Erstangriff eingesetzten Einsatzkräfte und Geräte sowie die Einsatztaktik. Alle anderen Faktoren wie Anzahl und Verhalten der Passagier, die Verletztenverteilung, der Zustand des Flugzeuges, die Brandausbreitung und Verrauchung sowie äußere Rahmenbedingungen (Wetter, Tageszeit, Gelände etc.) entziehen sich der Einflussnahme der Einsatzkräfte und müssen nolens volens von ihnen bewältigt werden.

3. Grundlagen

3.2.2 Brandschutz und Menschenrettung bei Flugzeugunfällen

In Deutschland ist das höchste Schutzziel der Feuerwehr das Menschleben. Die primäre Aufgabe besteht also immer in der Rettung desselben. Dies gilt auch für die Flughafenfeuerwehren. Die umfangreiche Löschtechnik wird hauptsächlich vor diesem Hintergrund vorgehalten. Die Flughafenfeuerwehr wird also versuchen, die Flugzeuginsassen mit allen ihr zur Verfügung stehenden Mitteln zu retten. Kommt es im Verlauf eines Flugzeugunfalls zum Ausbruch eines Feuers, verändern sich die Prioritäten der Einsatzmaßnahmen. Da der Brand den Flugzeuginsassen den Weg aus dem Flugzeug versperrt und zugleich deren Leben bedroht, ist der Löschangriff hier eine notwendige Voraussetzung für die Rettung.

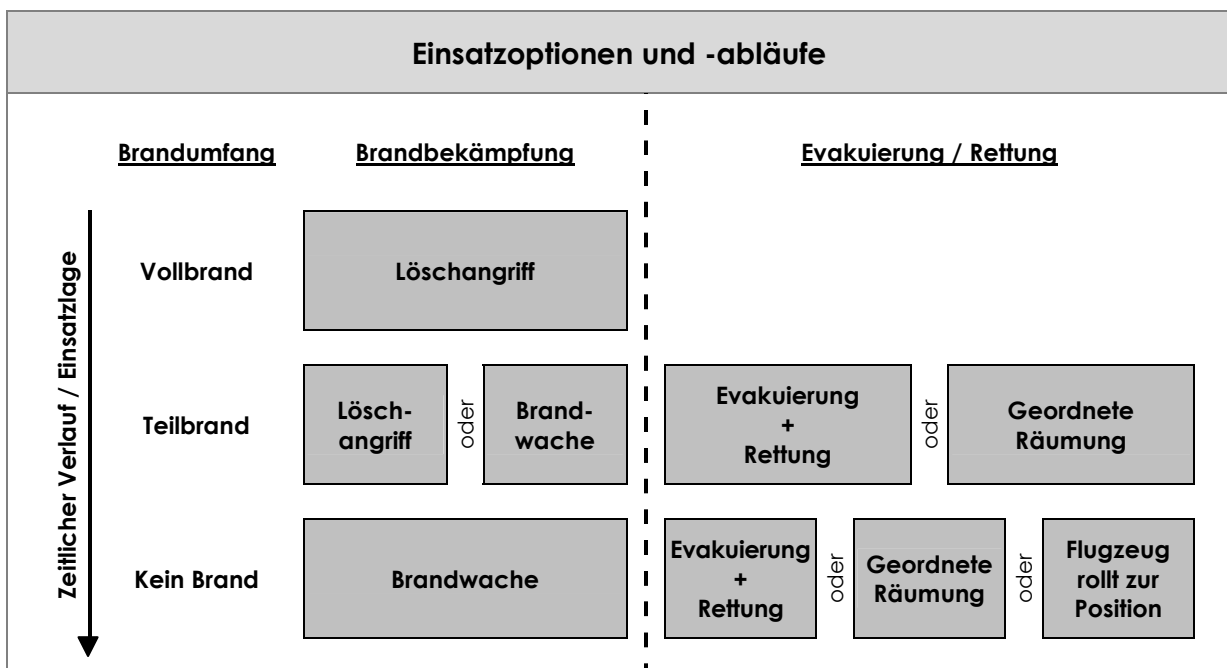


Abbildung 11: Einsatzoptionen und -abläufe

Für die Modellierung der Maßnahmen der Feuerwehr - insbesondere für die taktischen Entscheidungskriterien - werden die Erfahrungen der Flughafenfeuerwehr Frankfurt/Main und die dort gültigen Feuerwehr-Einsatzrahmenpläne [Hahn 2000, S. 1ff.] zugrunde gelegt. Natürlich können hier nicht alle einsatztaktischen Vorgaben aufgeführt werden, aber die Grundzüge und die wesentlichen Ideen sollen dargestellt werden. Die Beschreibung der erwarteten Szenarien und der daraus resultierenden Abläufe dient dazu, die einsatztaktischen Maßnahmen aufzuzeigen und zu erläutern. Hierauf aufbauend erfolgt im weiteren Verlauf der Arbeit die Modellierung der Rettungsmaßnahmen. Vereinfacht lässt sich die Einsatztaktik wie folgt zusammenfassen:

3. Grundlagen

Außenangriff und Flughafenlöschfahrzeuge

- Bei einem Vollbrand wird das Leben der Flugzeuginsassen akut durch das Feuer bedroht. Gleichzeitig besteht keine Möglichkeit einer Evakuierung von innen oder Rettungsmaßnahmen von außen. Ein Löschangriff ist folglich eine notwendige Voraussetzung, um Rettungs- und / oder Evakuierungsmaßnahmen durchführen zu können.
- Der Löschangriff erfolgt sofern möglich immer mit dem Wind bzw. die Aufstellung der Fahrzeuge erfolgt mit dem Wind im Rücken, da hierdurch die Wurfweite vergrößert wird.
- Die Löschmaßnahmen konzentrieren sich zum einen auf den Rumpf, um die Flugzeuginsassen so gut wie möglich zu schützen, und zum anderen auf eine Seite des Flugzeugs (i. d. R. links - aus Sicht des Piloten), um einen Fluchtweg zu schaffen. Ziel ist es, das Feuer vom Rumpf fern zu halten bzw. den Rumpf zu kühlen. Hierdurch soll die Einwirkung von Wärme auf die Flugzeuginsassen und die Außenhaut der Kabine reduziert werden.
- Die Flughafenlöschfahrzeuge fahren von vorne an das Flugzeug heran, da Flugzeuge in der Regel gegen den Wind landen. Zudem wird verhindert, dass Einsatzfahrzeuge bei der Anfahrt durch Trümmerteile behindert oder beschädigt werden oder dass Flugzeuginsassen, die aus dem Flugzeug geschleudert wurden, durch Kollision mit den Fahrzeugen zu Schaden kommen.
- Das erste Flughafenlöschfahrzeug steht bei sichtbarem Feuer auf der Schadensseite und versucht, die Flammen vom Rumpf fern zu halten, den Rumpf zu kühlen und die vom Schaden abgewandte Evakuierungsseite zu schützen. Ist kein Feuer zu sehen, positioniert sich das erste Flughafenlöschfahrzeug so, dass es die linke Flugzeugseite, also die Evakuierungsseite, schützen kann. Die Aufstellung der weiteren Flughafenlöschfahrzeuge ist nachfolgend in Tabelle 4 und Abbildung 12 bis Abbildung 14 zu ersehen.
- Verfügt ein Flughafen über mehr als drei Flughafenlöschfahrzeuge, so positionieren sich die weiteren Fahrzeuge fortlaufend hinter den ersten drei Fahrzeugen, um deren Funktion zu übernehmen, wenn der Wasservorrat verbraucht ist.
- Ein nicht brennendes Flugzeug wird bezüglich der Aufstellung der Flughafenlöschfahrzeuge immer wie ein brennendes Flugzeug behandelt, um bei einem möglichen Auftreten eines Brandes bereits die optimale Stellung bezogen zu haben und sofort effektiv eingreifen zu können.

3. Grundlagen

Aufstellung der Flughafenlöschfahrzeuge			
Anzahl verfügbare Flughafenlöschfahrzeuge	Eintreffendes Fahrzeug	Lage	Aufstellung (jeweils in Fahrtrichtung des Flugzeugs)
1	1. Fahrzeug	Brand	Schadenseite
		Kein Brand	Mittig leicht nach links versetzt
2	1. Fahrzeug	Brand	Schadenseite
		Kein Brand	Links
	2. Fahrzeug	Brand	Mittig leicht zur Evakuierungsseite versetzt
		Kein Brand	Rechts
3	1. Fahrzeug	Brand	Schadenseite
		Kein Brand	Links
	2. Fahrzeug	Brand	Mittig
		Kein Brand	Rechts
	3. Fahrzeug	Brand	Evakuierungsseite
		Kein Brand	Mittig

Tabelle 4: Aufstellung der Flughafenlöschfahrzeuge

Quelle: Hahn 2001, S. 1ff

Die in der Tabelle 4 beschriebenen Aufstellungen sind im Folgenden noch einmal grafisch dargestellt.

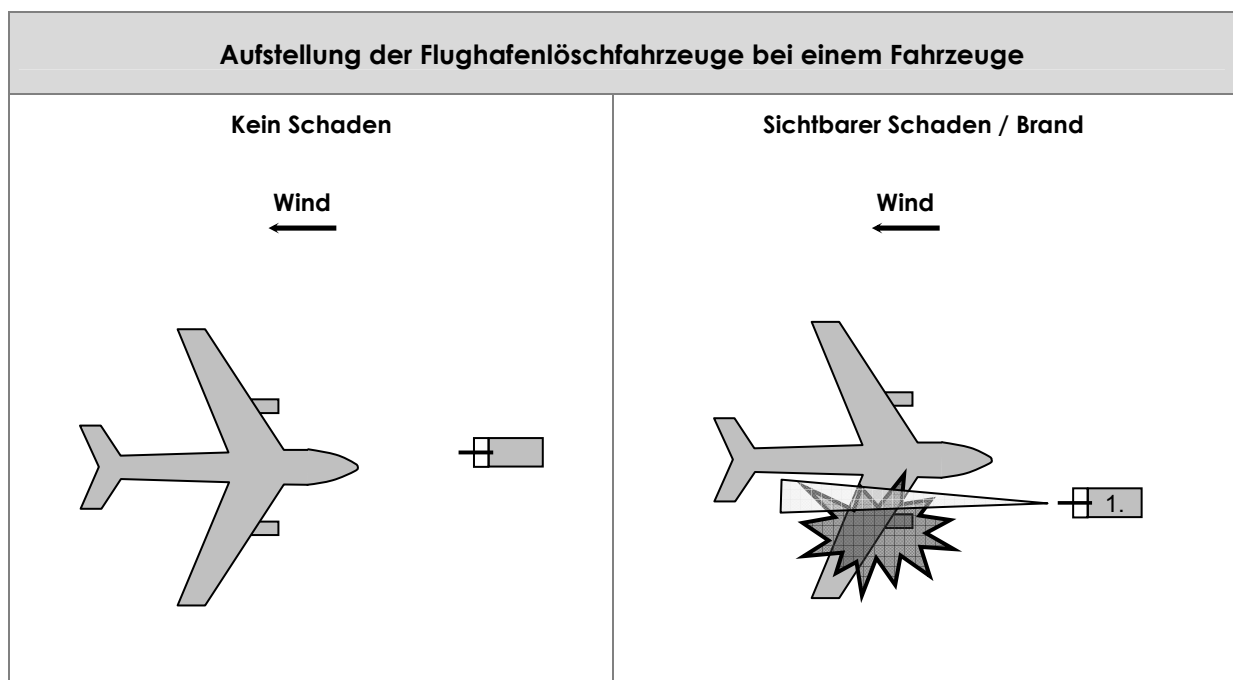


Abbildung 12: Aufstellung der Flughafenlöschfahrzeuge bei einem Fahrzeug

Quelle: Hahn 2001, S. 1ff

3. Grundlagen

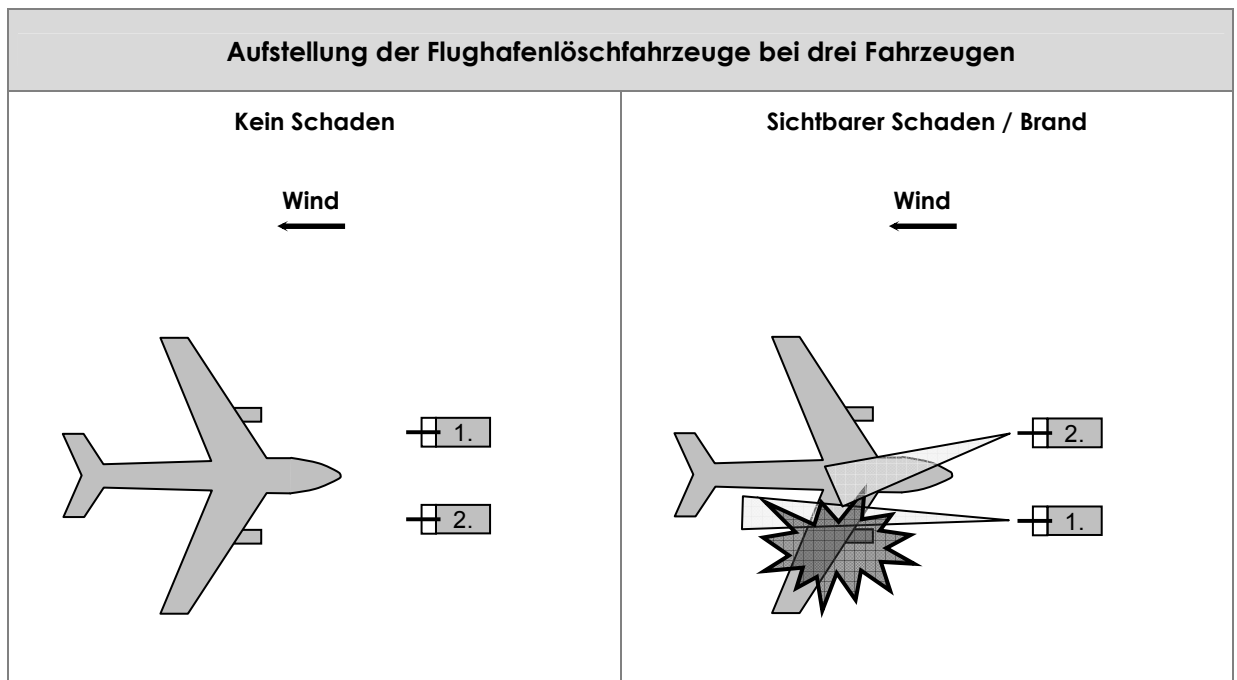


Abbildung 13: Aufstellung der Flughafenlöschfahrzeuge bei zwei Fahrzeugen Quelle: Hahn 2001, S. 1ff

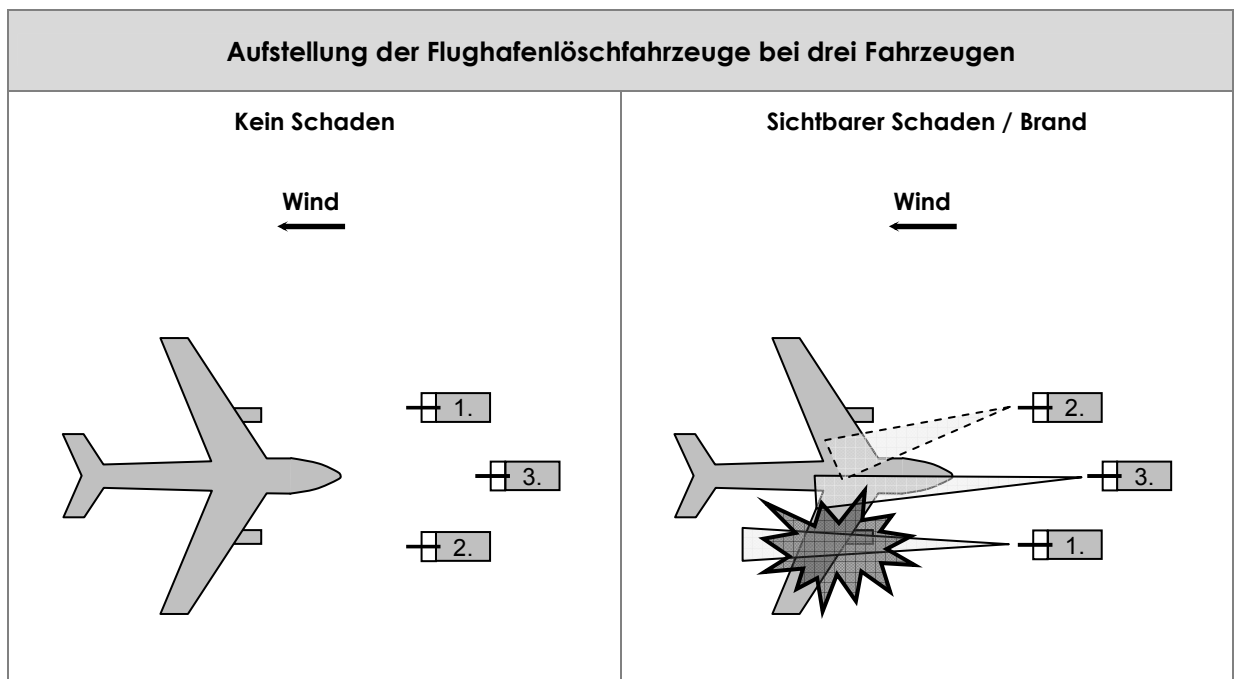


Abbildung 14: Aufstellung der Flughafenlöschfahrzeuge bei drei Fahrzeugen Quelle: Hahn 2001, S. 1ff

3. Grundlagen

- Kleinere Feuer an Fahrwerken und Triebwerken werden von der Besatzung des Löschfahrzeugs per Hand gelöscht. Dies ist notwendig, da diese Stellen von den Flughafenlöschfahrzeugen mit einem parabelförmigen Löschstrahl nicht erreicht werden können. Insbesondere Brände im Fahrwerksschacht müssen per Hand gelöscht werden. Da bei Bränden im Triebwerk die Verkleidung geöffnet werden muss, ist auch hier nur ein Einsatz per Hand möglich.

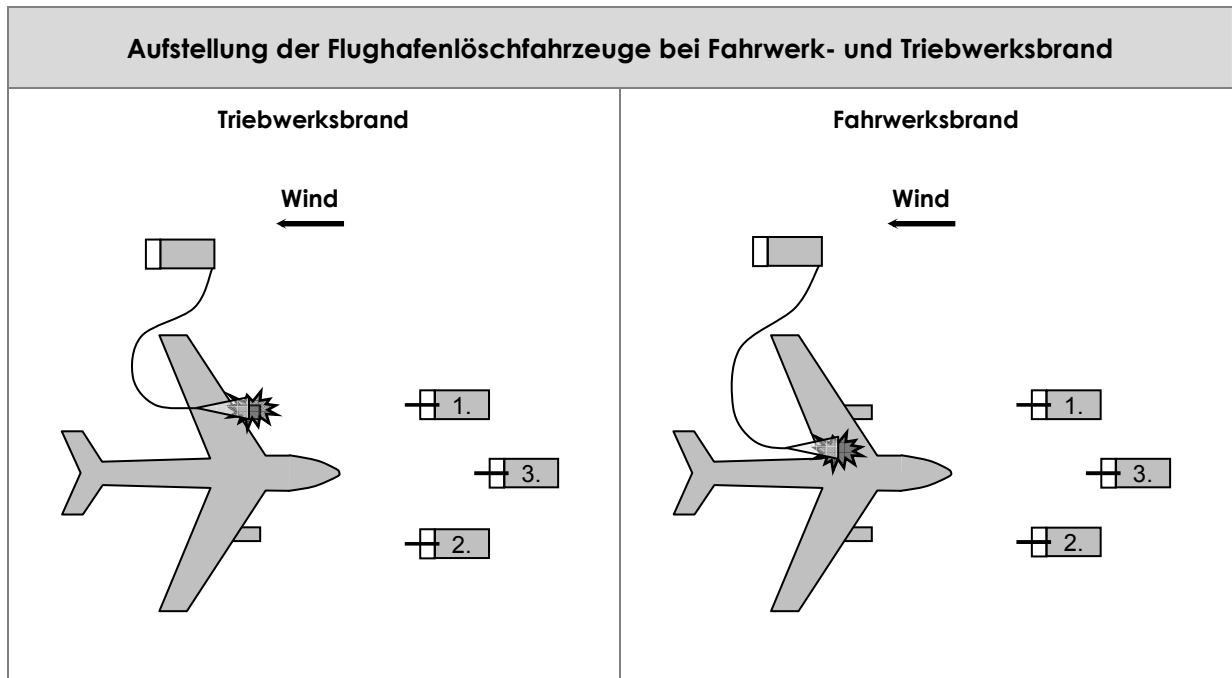


Abbildung 15: Aufstellung der Flughafenlöschfahrzeuge bei Fahrwerk- und Triebwerksbrand

Quelle: Hahn 2001, S. 1ff

- Weit vom Rumpf entfernte Brände werden zunächst nicht gelöscht, damit genügend Wasser zur Verfügung steht, um den Rumpf zu kühlen oder Brände in direkter Nähe zu löschen. Eine Ausnahmesituation wäre ein Entstehungsbrand auf einer großflächigen Treibstofffläche. Hier ist ein sofortiges Eingreifen erforderlich.
- Eine Führungskraft versucht, mit dem Piloten Kontakt aufzunehmen. Dies erfolgt entweder per Sichtkontakt oder, sofern keine akute Brandgefahr besteht, mit Hilfe des Interphons am Bugrad.

Innenangriff und Angriffstrupps

- Vorrangige Aufgabe aller Einsatzkräfte - mit Ausnahme der Besatzung der Flughafenlöschfahrzeuge und der übergeordneten Führungskräfte - ist die Menschenrettung. Hierzu werden alle verfügbaren Einsatzkräfte in Trupps eingeteilt.

Anmerkung: Ein Trupp besteht im deutschen Feuerwehrewesen gemäß Feuerwehr-Dienstvorschrift aus zwei Personen mit je einem Truppführer und einem Truppmann.

3. Grundlagen

Jeder Trupp, der direkt für Lösch- und Rettungsarbeiten eingesetzt wird, wird als Angriffstrupp bezeichnet. Da dies im Folgenden auf alle Trupps zutrifft, können die Begriffe „Trupp“ und „Angriffstrupp“ gleichbedeutend verwendet werden..

- Sobald möglich, begeben sich die verfügbaren Angriffstrupps ins Flugzeug, um die Lage zu erkunden, die Maschine nach verletzten, bewusstlosen, desorientierten und eingeklemmten Personen abzusuchen und diese aus dem Flugzeug zu retten.
- Die vorgehenden Angriffstrupps sind aus Sicherheitsgründen immer mit umluftunabhängigen Atemschutzgeräten (PA) auszurüsten. Bis zur abschließenden Lagebeurteilung gehen die Trupps mit Wasser am Rohr vor. Dies dient dem Eigenschutz und der Notwendigkeit, mögliche Brandnester sofort bekämpfen zu können.
- Bei Bränden im Frachtraum werden die Türen zu diesem in der Regel erst geöffnet, wenn die Evakuierung der Flugzeuginsassen abgeschlossen ist. Dies dient dazu, eine Rückzündung (Backdraft) im Flugzeuginnenen zu verhindern, bis alle Personen von Bord sind.
- Im Rahmen der Menschenrettung werden zunächst der Rumpf und nahe liegende große Trümmerteile abgesucht. Erst danach werden kleinere und entferntere Teile durchsucht.
- Ist das Flugzeug in mehrere Teile zerbrochen oder kleinteilig zertrümmert, so sind die Einsatzkräfte nach Lage aufzuteilen. Auch hier gilt der Grundsatz: Brandschutz soweit erforderlich, um Menschenrettung zu ermöglichen. Ansonsten ausschließlich Menschenrettung.

Evakuierung und Passagiere

- Brennt es nur auf einer Seite des Flugzeugs, ergibt sich hieraus die Evakuierungs- und Rettungsseite.
- Wenn eine Evakuierung der Passagiere über die Rutschen stattfindet, stehen möglichst zwei Einsatzkräfte an jeder Rutsche, um ankommende Passagiere sofort zur Seite zu ziehen. Dies ist erforderlich, um Verletzungen durch Zusammenstöße mit nachfolgenden Passagieren, die mit hoher Geschwindigkeit die Rutsche hinuntergleiten, zu verhindern. Diese Hilfestellung ist insbesondere dann erforderlich, wenn Passagiere nach dem Rutschvorgang stolpern oder am Boden liegen bleiben.
- Personen, die eindeutige Todesanzeichen aufweisen, werden zunächst an Ort und Stelle belassen, um den Überlebenden die maximal mögliche Hilfe zukommen zu lassen.

3. Grundlagen

3.3 Risikoanalyse

Der Begriff der Risikoanalyse wird in der Regel in sehr unterschiedlicher Form gebraucht. Folglich unterscheiden sich die so bezeichneten Untersuchungen stark in Inhalt, Form und Qualität. Teilweise werden bereits die einfachsten Betrachtungen einer Gefahr als Risikoanalyse bezeichnet. Es ist daher an dieser Stelle angebracht, die Grundlagen der Risikoanalyse, die den Schlüsselbegriff der vorliegenden Arbeit darstellt, zu erläutern. Wichtig ist darüber hinaus die Abgrenzung der Risikoanalyse zu Risikobewertung und Risikomanagement. Die Risikoanalyse ist ganz allgemein ein Werkzeug zur Betrachtung von Gefahrenpotenzialen und zugleich die erste Stufe im bewussten Umgang mit Risiken. Generell lässt sich folgende Unterscheidung treffen [Mock 2002, S. 7]:

- **Risikoanalyse**

Die Fragestellung bei der Risikoanalyse lautet: „Wie sicher ist ein System?“. Es wird als Ergebnis objektiv dargestellt, wie groß das Risiko, das von einem System ausgeht, nach wissenschaftlichen und objektiv nachvollziehbaren Maßstäben tatsächlich ist.

- **Risikobewertung**

Die Risikobewertung basiert auf der Risikoanalyse und nutzt die dort erzielten Ergebnisse. Hierbei werden vor allem die Fragen „welches Risiko ist akzeptabel?“, „wie sicher muss ein System sein, um akzeptiert zu werden?“ und „welche sozio-ökonomischen Auswirkungen hat der Eintritt aber auch die Vermeidung eines Risikos?“ erörtert.

- **Risikomanagement**

Das Risikomanagement untersucht schließlich, welcher Umgang mit Risiken und welche Verteilung an Sicherheitsmaßnahmen im Gesamtsystem den größten Nutzen bringen. Die Fragen hierzu lauten „welche Risiken können oder müssen in Kauf genommen werden?“ und „wie viel Sicherheit ist rentabel?“.

Den Schwerpunkt der vorliegenden Arbeit bildet eine Risikoanalyse. Das Ergebnis ist eine Aussage zum Risiko, also zur Schadenshöhe und -häufigkeit bei Flugzeugunfällen gemessen an der Zahl der geretteten Passagiere in Abhängigkeit von der Einsatzkräfteanzahl. Auf Basis dieser Aussage kann die Bewertung und die Entscheidung über den Umgang mit dem bezifferten Risiko erfolgen.

3.3.1 Entstehung der Risikoanalyse

Nach dem zweiten Weltkrieg erlebten die westlichen Industriestaaten, insbesondere die Bundesrepublik Deutschland, einen ungeahnten wirtschaftlichen Aufschwung (in Deutschland das so genannte Wirtschaftswunder). Das Hauptaugenmerk lag über 20 Jahre lang auf der Steigerung der wirtschaftlichen Produktion. Seit Mitte der 60er Jahre gab es jedoch erste Diskussionen über die Folgen dieses Wachstums und der Entwicklung neuer Technologien.

3. Grundlagen

Neben den klassischen Bereichen der Chemie- und Schwerindustrie als Schlüsseltechnologien beginnt sich auch die Atomenergie zu etablieren. Mit ihrer Entwicklung entstand eine bis dahin nicht gekannte Dimension der Gefährdung. Ereignisse wie der katastrophale Chemieunfall im italienischen Seveso 1976, bei dem große Mengen Dioxin freigesetzt wurden, oder der Reaktorunfall in Harrisburg (USA) 1977 führten der breiten Öffentlichkeit die Gefahren dieser Großtechnologien vor Augen. Der Schutz der Umwelt (gemeint sind gleichermaßen Mensch und Natur) sowohl vor latenter Verschmutzung als auch vor den Folgen einzelner Störfälle ist seither eine allgemeine gesellschaftliche Forderung. Auch wenn über Art und Umfang durchaus heftig diskutiert wird, besteht über die prinzipielle Notwendigkeit Konsens. Infolgedessen nahm der Stellenwert von praktischen Schutz- und Sicherheitseinrichtungen, aber auch von wissenschaftlichen Folgenabschätzungen seit den 70er Jahren stark zu.

Um die Gefahrenpotenziale von Großanlagen zu bestimmen, wurde eine geeignete Methode gesucht. Dies führte zur Entwicklung der Risikoanalyse. Erstmals in großem Umfang wurde diese neue Methodik im deutschsprachigen Raum von der Gesellschaft für Reaktorsicherheit Ende der 70er Jahre eingesetzt, um die „Deutsche Risikostudie Kernkraftwerke“ zu erstellen [BMFT 1980].

Risikoanalysen sind anerkannte Methoden, um die Gefahren verschiedenster Systeme oder Vorgänge abzuschätzen. Ihre Anwendung geht heutzutage weit über Chemieanlagen und Kernkraftwerke hinaus. Im technischen Bereich reicht das Spektrum der Risikoanalysen von der Medizin über Verkehrstechnik einschließlich Luft- und Raumfahrt bis hin zur Softwareentwicklung.

3. Grundlagen

3.3.2 Grundlagen der Risikoanalyse

Die Risikoanalyse ist eine wissenschaftliche Methode, um die Sicherheit eines Verfahrens oder einer technischen Anlage zu ermitteln. Hierzu werden alle denkbaren Abläufe eines Systems aufgezeigt und für all diese Ablaufvarianten die Schadenshöhe und die Eintrittswahrscheinlichkeit ermittelt. Die Idee, die der Risikoanalyse hierbei zugrunde liegt, ist gleichermaßen einfach wie einleuchtend. Jedes System befindet sich in einem (wie auch immer gearteten) Zustand. Durch innere oder äußere Einflüsse kann es zu einer Veränderung des Zustandes kommen. Das System kann also von einem Zustand in den anderen wechseln. Zwischen zwei Zuständen liegt immer ein Vorgang. Er führt den Wechsel der Zustände herbei. Alle Abläufe lassen sich also als Kombination aus Zuständen und Vorgängen darstellen [Bald 1991, S. 40ff.]. Dies soll kurz am Beispiel einer Kraftfahrzeugreparatur bei einem Reifenschaden verdeutlicht werden. Der Ausgangszustand ist üblicherweise ein defekter Reifen. Der Endzustand ist ein fahrtüchtiges Kraftfahrzeug. Beide Zustände werden durch den Vorgang des Reifenwechsels miteinander verbunden.

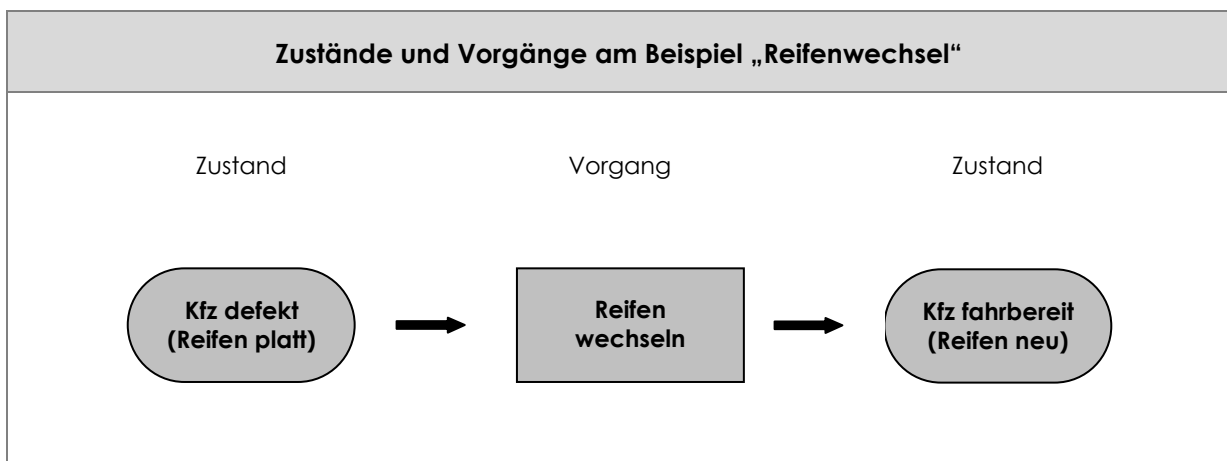


Abbildung 16: Zustände und Vorgänge am Beispiel „Reifenwechsel“

in Anlehnung an: Bald 1991, S. 107

Risikoanalysen zeichnen sich insbesondere durch drei Eigenschaften aus:

- **Transparenz**

Die Transparenz ist ein wesentliches Qualitätsmerkmal wissenschaftlicher Arbeiten. Durch das Offenlegen von Daten, Annahmen und Vorgehensweise und der damit verbundenen Möglichkeit, die Berechnungen nachzuvollziehen, sie ggf. zu replizieren und sie zu akzeptieren (oder aber zu verwerfen) kann sichergestellt werden, dass die Ergebnisse einer seriösen Quelle entstammen und als Grundlage für weitere Anwendungen und Forschungen dienen können. Es handelt sich eben nicht um eine „Blackbox“. Die Ergebnisse und die Grundannahmen, unter denen sie zustande kommen, sind bekannt.

3. Grundlagen

- **Strukturiertes Vorgehen**

Die Betrachtung verschiedener Unfälle zeigt, dass oft erst die Verknüpfung mehrerer ungünstiger Umstände zu einem Ereignis führt. Risikoanalysen versuchen daher, alle technisch-physikalisch möglichen Abläufe eines Systems aufzuzeigen und für alle entstehenden Ablaufvarianten die Schadenshöhe und die Eintrittswahrscheinlichkeit zu ermitteln. Durch dieses strukturierte Vorgehen wird sichergestellt, dass alle Aspekte einer Fragestellung erörtert werden und nicht aufgrund geringer Eintrittswahrscheinlichkeiten Abläufe und Wechselwirkungen aus der Betrachtung ausgeschlossen werden.

- **Modularer Aufbau**

Der modulare Aufbau der Risikoanalysen bietet den großen Vorteil, dass sich die Abläufe eines Ereignisses in beliebig viele Schritte aufteilen lässt. Es wird dadurch möglich, je nach Bedarf die notwendige oder gewünschte Detailtiefe zu erreichen. Das Prinzip der Untergliederung eines Vorgangs in weitere Zustände und Vorgänge soll an einem Beispiel verdeutlicht werden. Hierzu wird auf den oben bereits erwähnten Ablauf bei einem Reifenwechsel zurückgegriffen. Dieser beginnt wieder mit dem Zustand „Reifen platt“. Der Vorgang, der sich daran anschließt, ist das Anheben des Kfz zum Wechseln des Reifens. Dies führt zum Zustand „Kfz aufgebockt“. Auch hier schließt sich wieder ein Vorgang an. Die Schrauben werden gelöst, um das Rad mit dem defekten Reifen wechseln zu können. Der Ablauf endet schließlich damit, dass das Kfz abgelassen wird und wieder fahrbereit zur Verfügung steht.

Die besondere Stärke der Risikoanalyse liegt darin, komplexe Vorgänge klar zu strukturieren und darzustellen. Diese Möglichkeit ist gerade im Kontext des Luftverkehrs sehr hilfreich.

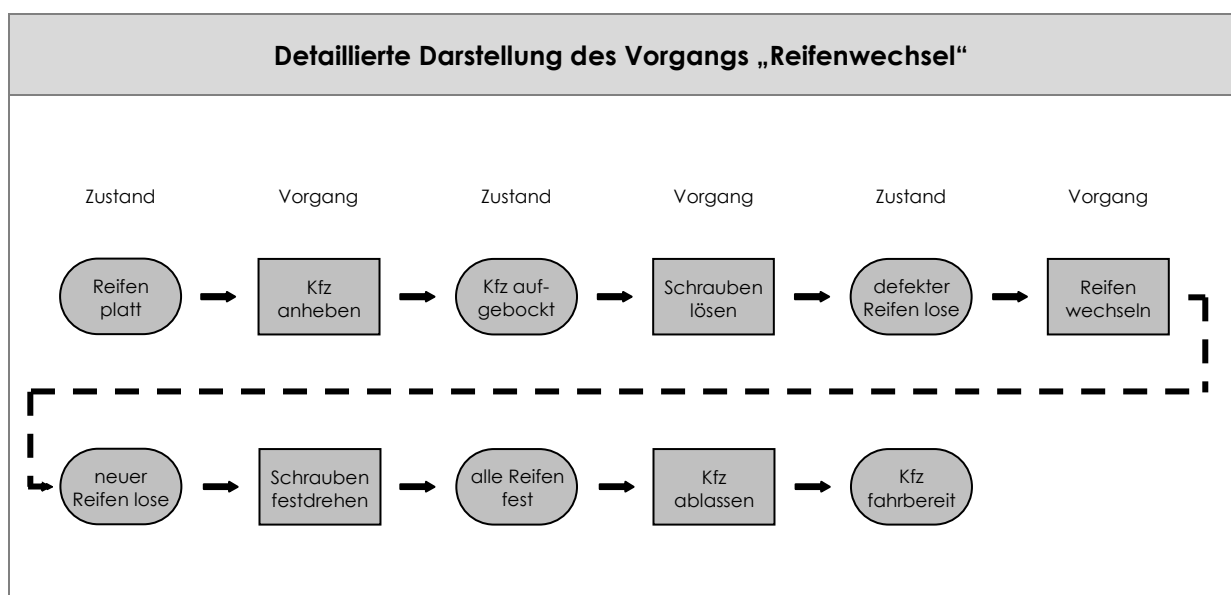


Abbildung 17: Detaillierte Darstellung des Vorgangs „Reifenwechsel“

in Anlehnung an: Bald 1991, S. 107

3. Grundlagen

Da im Luftverkehr ein ungünstiges Verhältnis von großer öffentlicher Wahrnehmung und geringer Akzeptanz von Flugzeugunfällen besteht, ist es erforderlich, das Vorhandensein von Risiken sachlich darzustellen und den Umgang mit diesen auf eine objektive Basis zu stellen, um die verfügbaren Ressourcen bestmöglich zu verwenden und diese Entscheidung zu begründen. Risikoanalysen bieten die Möglichkeit, das Maß an Sicherheit bzw. das Gefahrenpotenzial, das ein System oder ein Prozess beinhaltet, wissenschaftlich zu ermitteln und objektiv darzustellen. Sie sind aus diesem Grund ein geeignetes Mittel, um die breite Öffentlichkeit oder technisch weniger versierte Entscheidungsträger über tatsächliche, objektive Risiken, die mit bestimmten Technologien verbunden sind, aufzuklären.

3.3.3 Ansätze der Risikoanalyse

Es existiert kein universales Verfahren „Risikoanalyse“, das eine verbindliche Durchführung bis ins Detail festlegt. Der Begriff „Risikoanalyse“ ist im Sprachgebrauch folglich eher ein Sammel- bzw. Überbegriff für die (systematische) Erfassung von Risiken. Eine Vorgehensweise für alle denkbaren Probleme ist somit nicht gegeben. Diese muss jeweils entsprechend der Aufgabenstellung selbst gewählt werden. Dennoch existieren eine Reihe von Verfahren, die jeweils unter verschiedenen Gesichtspunkten Risiken analysieren. Es bietet sich daher an, eine Methode zu wählen, die optimal zum jeweiligen Untersuchungsziel passt. Mehrere Varianten der Risikobetrachtung haben sich etabliert und auch Einzug in die DIN gehalten. Drei sollen im Folgenden näher beschrieben werden. Dies sind die Fehlerbaumanalyse und die Ereignisablaufanalyse sowie die Ausfalleffektanalyse, die große Gemeinsamkeiten mit der „Hazard and Operability Study“ (HAZOP) aufweist [Brühwiler 2003, S. 157ff]:

- **Fehlerbaumanalyse**

Die Fehlerbaumanalyse ist ein etabliertes und vielfältiges Analysewerkzeug. Es dient dazu, für Ereignisse (meist unerwünschter Natur) die Entstehungszusammenhänge darzustellen und die Eintrittswahrscheinlichkeiten zu ermitteln. Ansatzpunkt der Analyse ist dabei der Endzustand eines Vorgangs. Von diesem Endzustand aus wird betrachtet, welche Voraussetzungen erfüllt sein müssen, damit die Abläufe zu einem bestimmten Endzustand führen. Die Kernfrage lautet daher: Wie kommt es zum Eintreten eines Ereignisses? Dabei entsteht ein Wahrscheinlichkeitsbaum, an dessen Spitze das betrachtete Ereignis steht und sich nach unten in verschiedene Äste verzweigt. Man spricht in diesem Zusammenhang auch davon, dass ein Ereignis „top-down“ (also von oben nach unten) betrachtet wird, wenngleich das Eintreten des Ereignisses in umgekehrter Richtung erfolgt. Die Grundlagen zur Erstellung von Fehlerbaumanalysen sind in der DIN 25 424 beschrieben.

3. Grundlagen

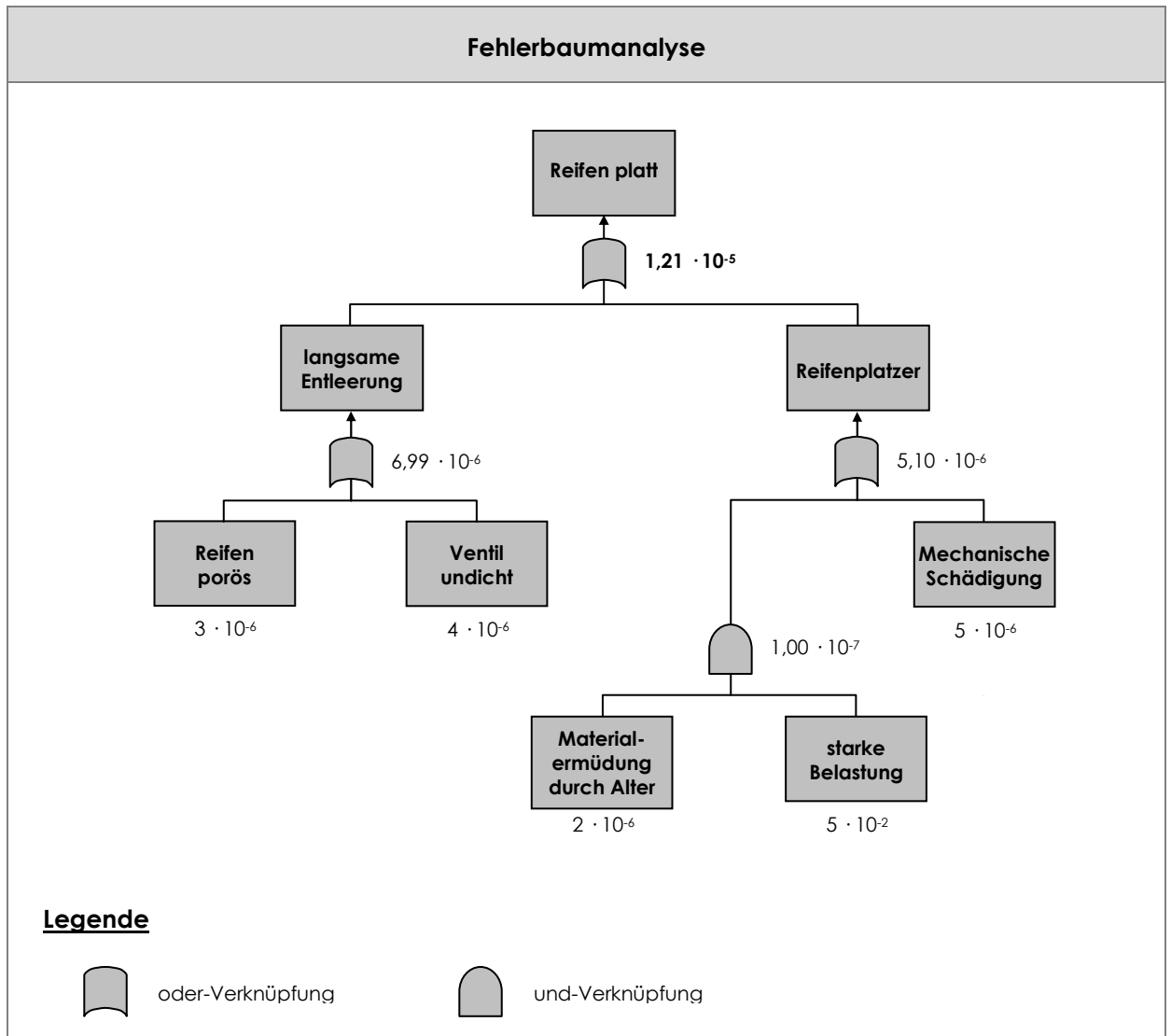


Abbildung 18: Fehlerbaumanalyse

Quelle: o. V. 2001, S. 9ff

3. Grundlagen

▪ Ereignisablaufanalyse

Die Ereignisablaufanalyse dient zur Darstellung von Störungsabläufen. Hierbei wird das gegenteilige Verfahren zur Fehlerbaumanalyse angewendet. Nicht der Endzustand dient hier als Ausgangspunkt, sondern eine Situation zu Beginn. Von dieser aus wird verfolgt, wie sich die Abläufe entwickeln können. Die Ereignisablaufanalyse wird daher vor allem zur Abschätzung der Folgen von Ereignissen verwendet. Die typische Fragestellung ist hier: Was passiert, wenn ein Ereignis eintritt? Die Ereignisablaufanalyse wird in der DIN 25 419 beschrieben.

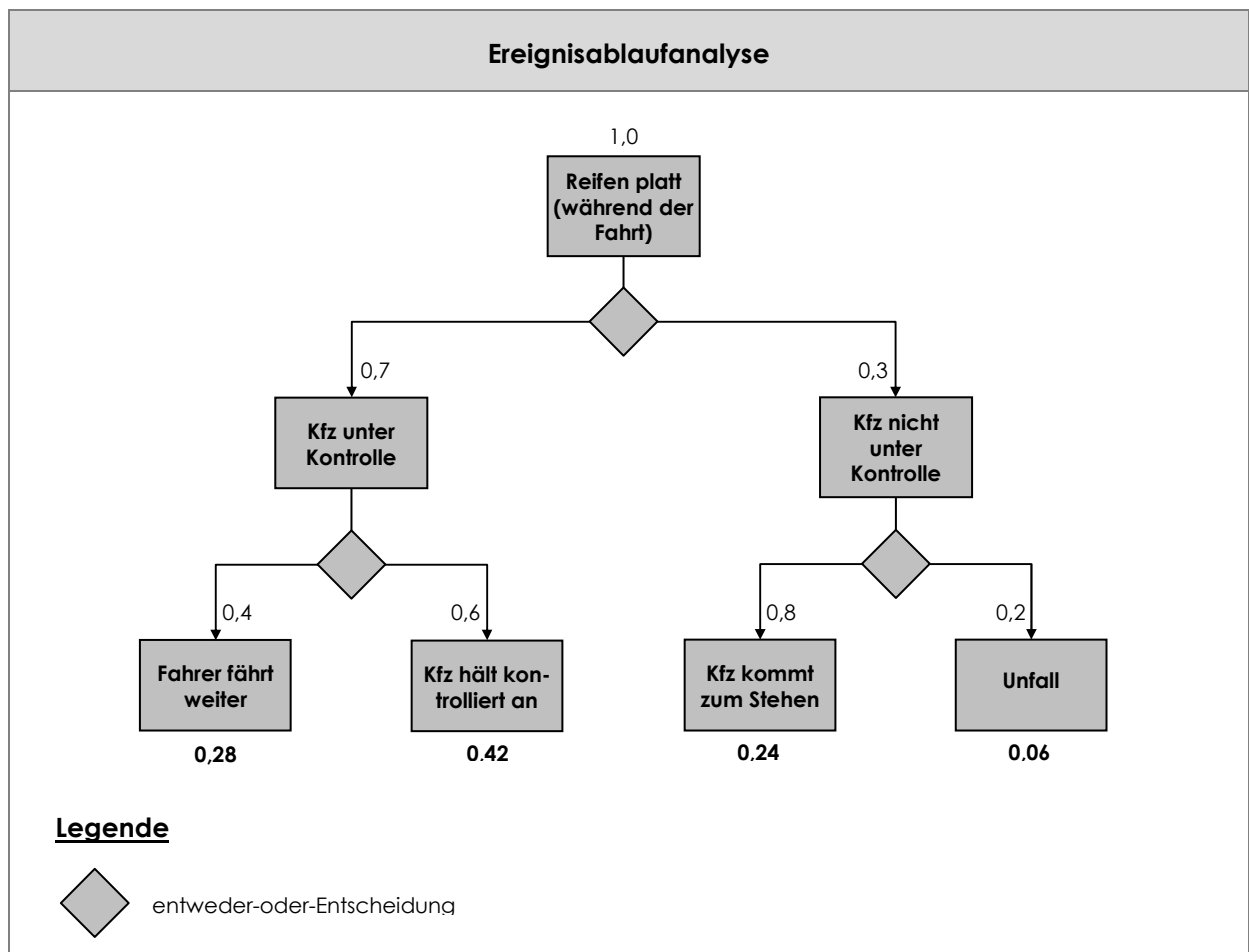


Abbildung 19: Ereignisablaufanalyse

Quelle: o. V. 2001, S. 9ff

Die Ereignisablaufanalyse und die Fehlerbaumanalyse stellen zwei verschiedene Betrachtungsweisen auf ein (Schadens-) Ereignis dar. Der Fehlerbaum beschreibt dessen Zustandekommen, die Ereignisablaufanalyse den weiteren Verlauf. Das Ereignis bildet den gemeinsamen Schnittpunkt und verknüpft beide Methoden miteinander. Sie werden in der Regel jedoch selten zusammen verwendet, da sie unterschiedliche Zielrichtungen verfolgen.

3. Grundlagen

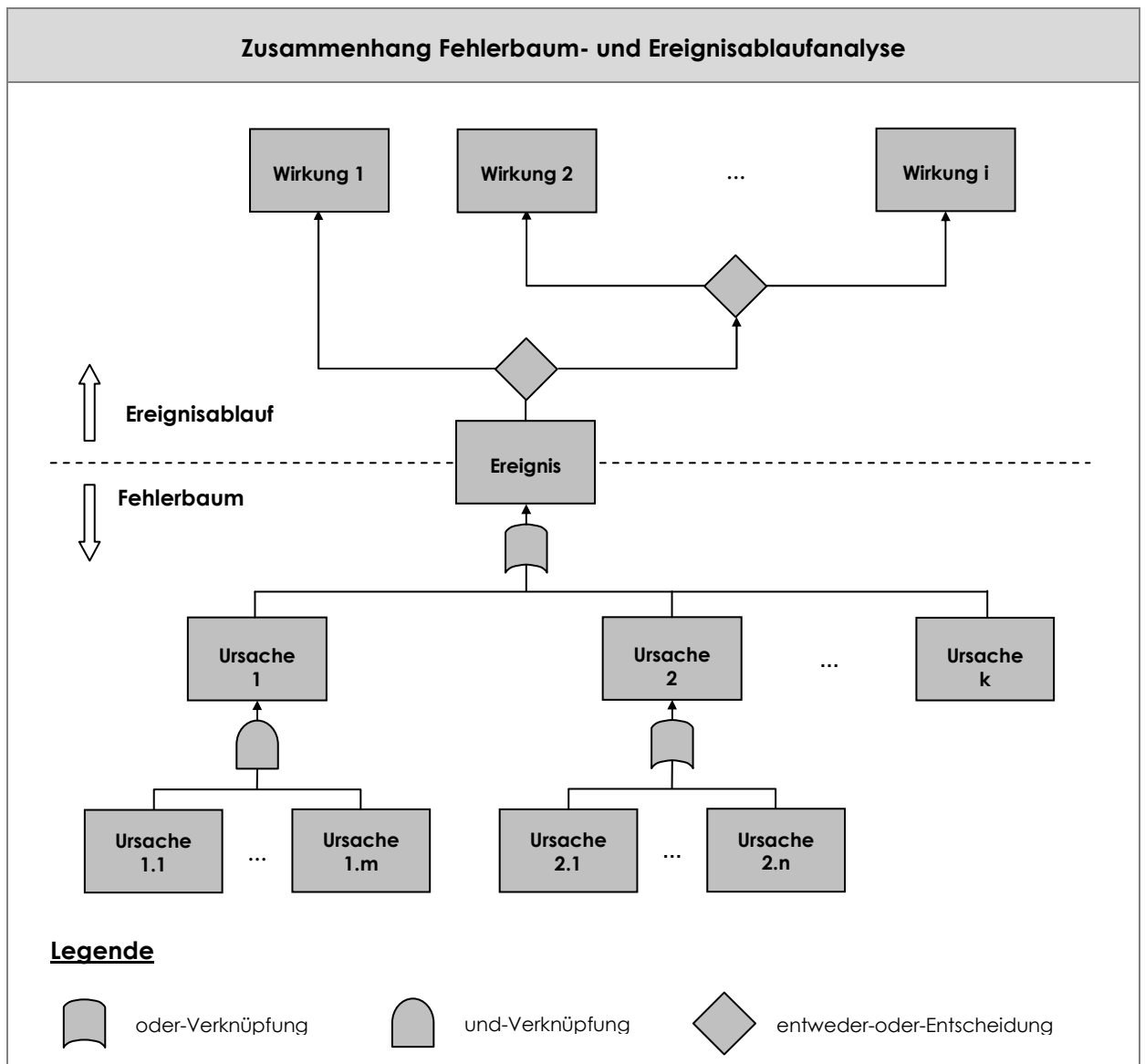


Abbildung 20: Zusammenhang Fehlerbaum- und Ereignisablaufanalyse

Quelle: o. V. 2001, S. 9ff

3. Grundlagen

▪ Ausfalleffektanalyse / HAZOP

Zwei weitere Analyseverfahren aus dem Bereich der Sicherheitstechnik, die in ihrer Systematik große Parallelen aufweisen, sollen hier kurz in ihren Grundzügen dargestellt werden:

- Die Ausfalleffektanalyse nach DIN 25 448, auch FMEA (von eng. „Failure Mode and Effect Analysis“) genannt.
- Die „Hazard and Operability Study“ (dt. Gefahren- und Machbarkeitsstudie), kurz HAZOP. Im Deutschen wird auch vom PAAG-Verfahren gesprochen (PAAG = Prognose eines möglichen Ereignisses, Auffinden der Ursachen, Abschätzen der Auswirkungen, Gegenmaßnahmen).

Die HAZOP ist eine Weiterentwicklung der Ausfalleffektanalyse und verwendet die wesentlichen Elemente derselben. Im Detail unterscheiden sich die beiden Verfahren zwar, aber grundsätzlich liegt ihnen eine gleiche Systematik zugrunde. Diese soll hier kurz beschrieben werden. Die Ausfalleffektanalyse wird bevorzugt unter der Fragestellung des Qualitätsmanagements und der Fehlervermeidung eingesetzt. Bei der HAZOP hingegen steht die Risikobewertung und Gefahrenreduktion im Vordergrund.

Die HAZOP und die Ausfalleffektanalyse haben die Untersuchung der Funktionen und möglicher Ausnahmestände der Komponenten und Bedienungsmaßnahmen eines Systems sowie deren Auswirkungen zum Inhalt. Sie werden zur Identifizierung von möglichen Schwachstellen und zu deren qualitativer Bewertung verwendet. Hierzu werden Bauteile oder Prozesse betrachtet und deren verschiedene mögliche Systemzustände (von z. B. voll funktionsfähig über erhöhte Fehlertoleranz bis Totalausfall) und die daraus resultierenden Auswirkungen auf andere Elemente oder Abläufe dargestellt. Ziel ist es also nicht, exakte Eintrittswahrscheinlichkeiten zu ermitteln oder genaue Schadenshöhen zu beziffern. Im Vordergrund steht letztlich, strukturelle Zusammenhänge und Funktionsbeziehungen aufzuzeigen, um kritische Punkte, die bei der Entstehung und Ausbreitung von Schäden eine Schlüsselrolle einnehmen, zu identifizieren [Brühwiler 2003, S. 182ff].

Am Beispiel eines chemischen Reaktors soll dies verdeutlicht werden. Um welche chemische Reaktion es sich genau handelt, ist dabei nicht von Bedeutung. Auch sollen die thermodynamischen und stoffspezifischen Aspekte der Reaktion nicht im Vordergrund stehen:

Die Stoffe A und B reagieren exotherm zu Produkt C. Die Stoffzufuhr und -entnahme erfolgt kontinuierlich. Der Prozess findet in einem Reaktor statt, der über ein Rührwerk und ein Sicherheitsventil verfügt. Das Rührwerk wird mit der für den Prozess optimalen Rührgeschwindigkeit betrieben. Die Reaktionstemperatur wird über einen Kühlkreislauf geregelt.

3. Grundlagen

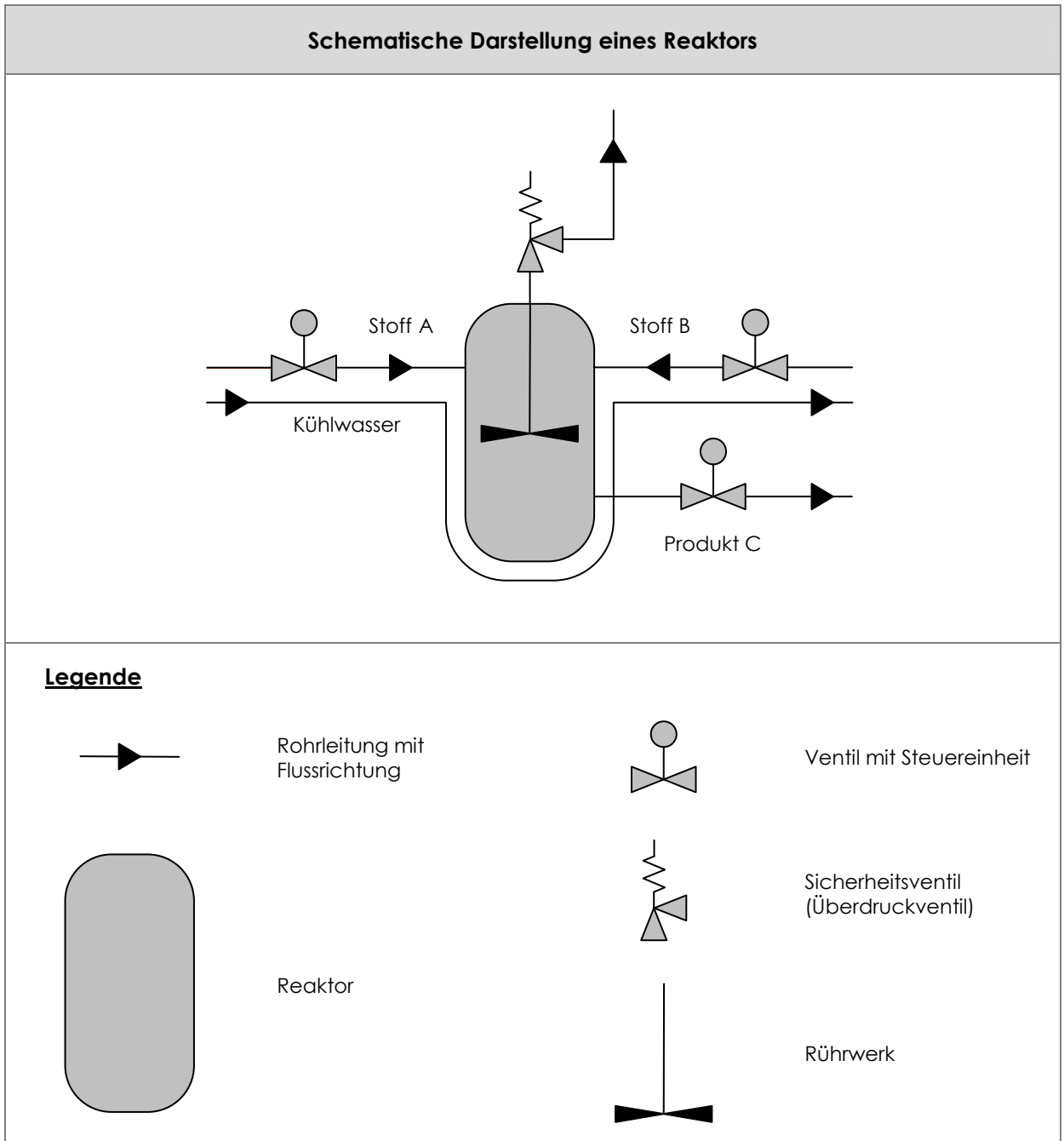


Abbildung 21: Schematische Darstellung eines Reaktors

Die Bauteile können verschiedene Zustände einnehmen. Die Abweichungen vom Regelprozess haben ihre Ursache in Funktionsstörungen aufgrund technischer Mängel oder in falscher Bedienung. Beides hat Auswirkungen auf den Produktionsprozess und kann die Sicherheit beeinträchtigen. Die Art der Fehlfunktion wird mit Hilfe so genannter Leitworte (z. B. „zu viel“ / „zu wenig“) beschrieben, die es ermöglichen, die Zusammenhänge sehr übersichtlich und nachvollziehbar darzustellen. Für den vorliegenden Fall sind die möglichen Fehlfunktionen nachfolgend in Tabelle 5 dargestellt.

3. Grundlagen

Bauteile und Fehlerfolgen des Beispiel-Reaktors			
Bauteil	Fehlfunktion	Auswirkung / Erläuterung	Folge
Ventile A / B	geschlossen	Reaktion kommt ganz zum Erliegen	⇒ kein oder fehlerhaftes Produkt C sowie Verunreinigung der nachfolgenden Bauteile und Stoffe
	zu wenig Stoff	Unvollständiges Reaktionsverhältnis	
	zu viel Stoff	Unvollständiges Reaktionsverhältnis	
Ventile C	geschlossen	Abfluss von Produkt C wird unterbrochen	⇒ kein Produkt C
	zu wenig	Reduzierter Abfluss von Produkt C	⇒ zu wenig Produkt C
	zu viel	Stoffgemisch fließt zu schnell ab und reagiert außerhalb des Reaktors weiter	⇒ fehlerhaftes Produkt C sowie Reaktionswärme und Druckanstieg in den nachfolgenden Bauteilen
Rührwerk	aus	Stoffe werden nicht vermischt und reagieren im Reaktor nicht vollständig	⇒ fehlerhaftes Produkt C sowie Reaktionswärme und Druckanstieg in den nachfolgenden Bauteilen
	zu langsam	Stoffe werden nicht ausreichend vermischt und reagieren im Reaktor nicht vollständig	
	zu schnell	Größere und schnellere Durchmischung von Stoff A und B. Reaktion läuft schneller ab	⇒ Druckanstieg und ggf. Öffnen des Sicherheitsventils
Kühlkreislauf	zu kühl	Die Reaktion wird verringert oder kommt ganz zum Erliegen.	⇒ fehlerhaftes Produkt C
	zu warm	Die Temperatur steigt. Dies führt zu einer schneller ablaufenden Reaktion, die einen weiteren Temperatur- und Druckanstieg zur Folge hat.	⇒ Druckanstieg und ggf. Öffnen des Sicherheitsventils
Sicherheitsventil	öffnet nicht	Bei normalen Betriebszuständen	⇒ keine Beeinträchtigung
	öffnet nicht	Bei Überdruck	⇒ Zerstörung des Reaktors und ggf. Umweltschäden
	schließt nicht	Produktaustritt	⇒ Verunreinigung der Anlage und ggf. Umweltschäden

Tabelle 5: Bauteile und Fehlerfolgen des Beispiel-Reaktors

Um die Bedeutung der möglichen Fehlfunktion zu beurteilen, wird eine Risikopotenzialzahl ermittelt. Dies ergibt sich aus dem Produkt der folgenden drei Faktoren:

- Wahrscheinlichkeit eines Fehlereintritts
- Wahrscheinlichkeit, den Fehler (rechtzeitig) zu bemerken
- Schadensausmaß

3. Grundlagen

Die drei Größen entsprechen dabei nicht den exakten Zahlenwerten. Die Wahrscheinlichkeiten und das Schadensausmaß werden kategorisiert und den Faktoren jeweils Werte zwischen eins und zehn zugewiesen. Während die beiden Wahrscheinlichkeiten bereits direkt vergleichbar sind, wird durch die Normierung eine direkte Vergleichbarkeit des Schadensausmaßes erzielt.

Faktoren der Risikopotenzialzahl bei der Ausfalleffektanalyse / FMEA					
Eintrittswahrscheinlichkeit		Schadensausmaß		Wahrscheinlichkeit, Fehler zu bemerken	
unwahrscheinlich	1	kaum wahrnehmbar	1	hoch	1
sehr gering	2-3	gering	2-3	mäßig	2-5
gering	4-6	mäßig	4-6	gering	6-8
mäßig	7-8	schwer	7-8	sehr gering	9
hoch	9-10	äußerst schwer	9-10	unwahrscheinlich	10

Tabelle 6: Faktoren der Risikopotenzialzahl bei der Ausfalleffektanalyse / FMEA in Anlehnung an: Brühwiler 2003, S. 182ff

Es sei angemerkt, dass die Faktoren zur Risikoeinschätzung bei der HAZOP (Eintrittswahrscheinlichkeit, Schadensausmaß und die Wahrscheinlichkeit, Fehler zu bemerken) auch in anderen Abstufungen eingeteilt sein können. Die Systematik basiert jedoch letztlich auf der gleichen Grundidee und soll daher an dieser Stelle nicht weiter betrachtet werden.

Wie in der Tabelle 5 „Bauteile und Fehler des Beispielreaktors“ zu sehen ist, haben viele Fehler eine direkte Auswirkung. Arbeiten Ventil A oder B falsch, stimmt das Reaktionsverhältnis zwischen den Stoffen A und B nicht. Die Folge ist ein fehlerhaftes Produkt C. Diese lässt sich relativ einfach für alle Bauteile und Vorgänge durchführen. Wesentlich diffiziler ist es, zu überprüfen, ob die Kombination mehrerer Fehler zu relevanten Auswirkungen führt. Die Kombination aus „Überdruck im Reaktor“ (als Folge eines Fehlers im Kühlkreislauf) und „Sicherheitsventil öffnet nicht“ ist unter Sicherheitsaspekten von besonderer Bedeutung. Ist aber nur das Sicherheitsventil blockiert, tritt keine negative Wirkung auf, solange der Produktionsprozess normal läuft, und der Fehler bleibt unter Umständen einige Zeit unentdeckt. Erst wenn es aufgrund anderer Fehlfunktionen wie dem Ausfall des Kühlkreislaufs zu einer Druckerhöhung im Reaktor kommt, wird dieser Umstand bedeutsam. Es ist daher sinnvoll, analog der Ereignisablaufanalyse zu untersuchen, inwieweit ein identifizierter Fehler innerhalb des Gesamtsystems Auswirkungen auf andere Bauteile und Vorgänge verursachen kann.

3. Grundlagen

3.4 Methoden und Grundlagen der Modellbildung

Als Basis für die Entwicklung des methodischen Lösungsansatzes in Kapitel 4 werden im Folgenden verschiedene Modelle zur Abbildung komplexer und dynamischer Systeme beschrieben, die mit Hilfe einfacher Regeln eine hohe Annäherung an die Realität erzielen. Darüber hinaus werden für die Ergebnisentwicklung zweckdienliche mathematische Ansätze und Prinzipien dargestellt

3.4.1 Morphologischer Kasten / Zwicky-Box

Der morphologische Kasten – nach seinem Erfinder auch Zwicky-Box genannt – wurde von dem Schweizer Physiker Fritz Zwicky entwickelt, um Entscheidungen strukturiert zu erarbeiten, bei denen mehrere Merkmalen mit verschiedenen Ausprägungen zu bewerten sind. Ziel dieser Methode ist es, aus einer Vielzahl von Möglichkeiten die relevanten Kombinationen herauszufiltern und ebenso durch systematisches Vorgehen zu verhindern, dass Kombinationen in einer Untersuchung übersehen werden [Bronner 1999, S. 64].

Die verschiedenen Merkmale mit ihren möglichen Ausprägungen werden hierzu in einer Matrix, deren Dimension der Anzahl der Merkmale entspricht, dargestellt. Zunächst werden alle Kombinationen gebildet. Diese werden dann auf ihre Sinnhaftigkeit und Realisierbarkeit überprüft. Danach erfolgt die weitergehende Untersuchung oder Verwendung der übrig gebliebenen Kombinationen. Die Bezeichnung „Kasten“ bzw. „Box“ entstammt dem Gedankenspiel, dass bei einer Fragestellung, die drei Merkmale berücksichtigt, die dabei entstehende Matrix sehr anschaulich als dreidimensionaler Graph dargestellt werden kann.

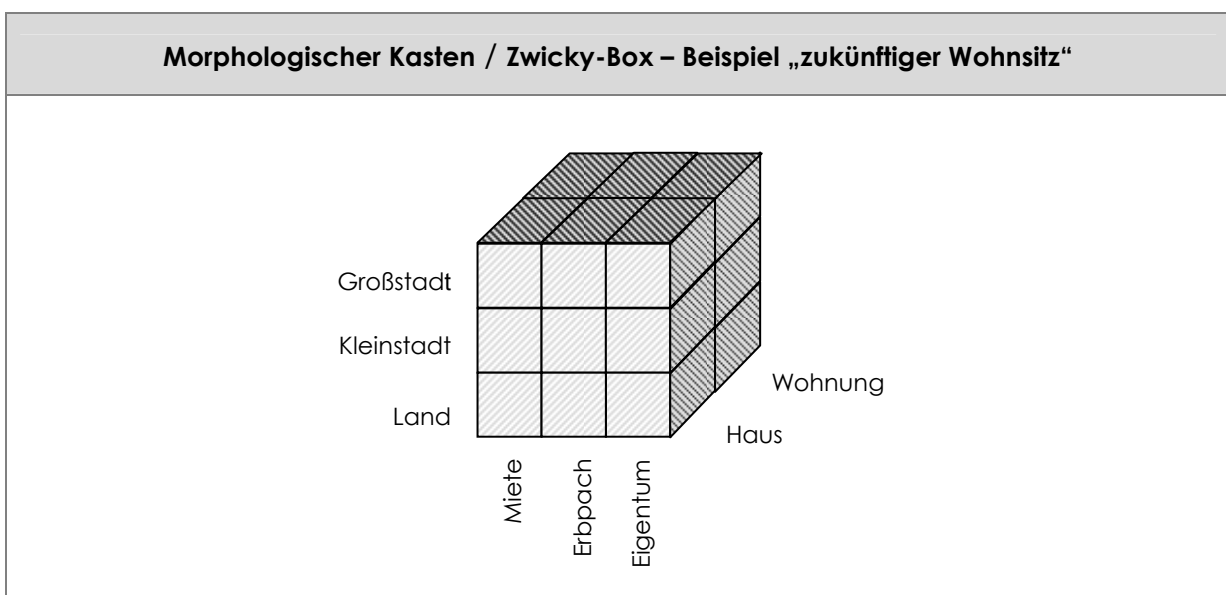


Abbildung 22: Morphologischer Kasten / Zwicky-Box
– Beispiel „zukünftiger Wohnsitz“

in Anlehnung an: Bronner 1999, S. 64

3. Grundlagen

Ein kleines Beispiel veranschaulicht die Methodik. Hierzu soll exemplarisch die Frage nach der Art des (zukünftigen) Wohnsitzes erörtert werden. Mit Hilfe von drei Merkmalen, die jeweils zwei bzw. drei Ausprägungen besitzen, lassen sich alle Kombinationen beschreiben:

- Eigentumsart (Miete, Erbpacht, Eigentum)
- Lage (Großstadt, Kleinstadt, Land)
- Objektart (Wohnung, Haus)

Die Anzahl der vorhandenen Kombinationen lässt sich wie folgt bestimmen:

$$n = \prod_{i=1}^m a_i = a_1 \cdot a_2 \cdot a_3 \cdot \dots \cdot a_m \quad (4)$$

mit:

- n - Anzahl aller möglichen Kombinationen []
- m - Anzahl der Merkmale []
- a_i - Anzahl der Ausprägungen des Merkmals i []

Es zeigt sich, dass die Anzahl der möglichen Kombinationen schnell einen sehr hohen Wert erreichen kann. In solchen Fällen ist es dann nicht mehr möglich, jede Kombination einzeln zu bewerten. Vielmehr müssen Ausprägungen, die als irrelevant oder unmöglich eingeschätzt werden, von der weiteren Betrachtung ausgeschlossen werden. Damit entfallen dann auch alle Kombinationen, die diese beinhalten.

3. Grundlagen

3.4.2 Zelluläre Automaten

„Zelluläre Automaten“ oder auch „Zelluläre“ ist ein Bereich der Mathematik, der sich mit der Modellierung von diskreten (also voneinander abgrenzbaren Elementen) dynamischen Systemen beschäftigt. Wesentliches Merkmal ist hierbei die Möglichkeit, aufgrund des jeweils aktuellen Zustandes eine Fortschreibung in der Zukunft vorzunehmen. In der Regel wird hierzu der Untersuchungsraum in ein 1- oder 2-dimensionales orthogonales Raster eingeteilt. Die entscheidenden Größen bei zellulären Automaten sind:

- Der Standpunkt einer Zelle (die betrachtet werden soll)
- Der Zustand der Zelle
- Die Zustände der Nachbarzellen
- Die Überföhrungsfunktionen (auch Zustandsübergangsregeln genannt)

Sind also die Lage und der Zustand einer Zelle sowie der Zustand der Nachbarzellen bekannt, so lässt sich mit Hilfe der Überföhrungsfunktion hieraus der Zustand der Zelle in der nächsten Zeiteinheit bestimmen. Die Entwicklung des Zellenzustandes von einer Zeiteinheit in die nächste lässt sich mit dieser Systematik beliebig in die Zukunft fortschreiben [Gerhardt/Schuster 1995, S. 17 ff].

Diese Beschreibung klingt zunächst sehr abstrakt und ein Zusammenhang zur vorliegenden Aufgabenstellung ist nicht sofort offenkundig. Das große Leistungsvermögen von zellulären Automaten besteht darin, Systeme durch Strukturierung mathematisch darstellbar zu machen. Hierzu muss der gesamte Untersuchungsraum (oftmals eine Fläche) in eine Vielzahl von gleich großen Zellen eingeteilt werden. Die naheliegendste Möglichkeit ist dabei ein rechtwinkliges Gitternetz. Dies bietet zugleich die Möglichkeit, das System mühelos in einer Matrix abzubilden. Den Zellen werden dann beliebige Werte, Zustände oder Eigenschaften zugewiesen. Des Weiteren müssen die Überföhrungsfunktionen klar definiert werden. Durch einfache Regeln wird beschrieben, welche Faktoren Einfluss auf den Zustand von Zellen haben und wie sich diese ändern können. Mit diesen Voraussetzungen lassen sich im weiteren Verlauf die vielfältigsten Abläufe darstellen. Da die Regeln für alle Zellen gelten, steht jede Zelle in Wechselwirkung mit dem Gesamtsystem. Hierdurch ist es möglich, komplexe Systeme in dynamischen Modellen abzubilden und so Entwicklungen und Abläufe mit Hilfe von Computern zu simulieren. Vor allem in Verbindung mit Computern ergibt sich mittels zellulärer Automaten ein interessantes Instrument, da mit geringem Aufwand sehr hohe Anzahlen an Zellen betrachtet und viele Zeitschritte berechnet werden können. Somit ist ein hohes Maß an Komplexität leicht darstellbar. Werden das Raster, die möglichen Zellzustände und die Überföhrungsfunktionen sorgfältig gewählt, lässt sich ein Modell erzeugen, das die Realität hinreichend genau abbilden kann, auch vor dem Hintergrund, dass es sich um eine rechtwinklige und in ihren Ausprägungen sehr endliche Welt handelt. Die Abbildung 23 verdeutlicht an einem geometrischen Beispiel, dass trotz einer Reduzierung auf wenige Eigenschaften und Formen die wesentlichen Inhalte und Aussagen erhalten bleiben können.

3. Grundlagen

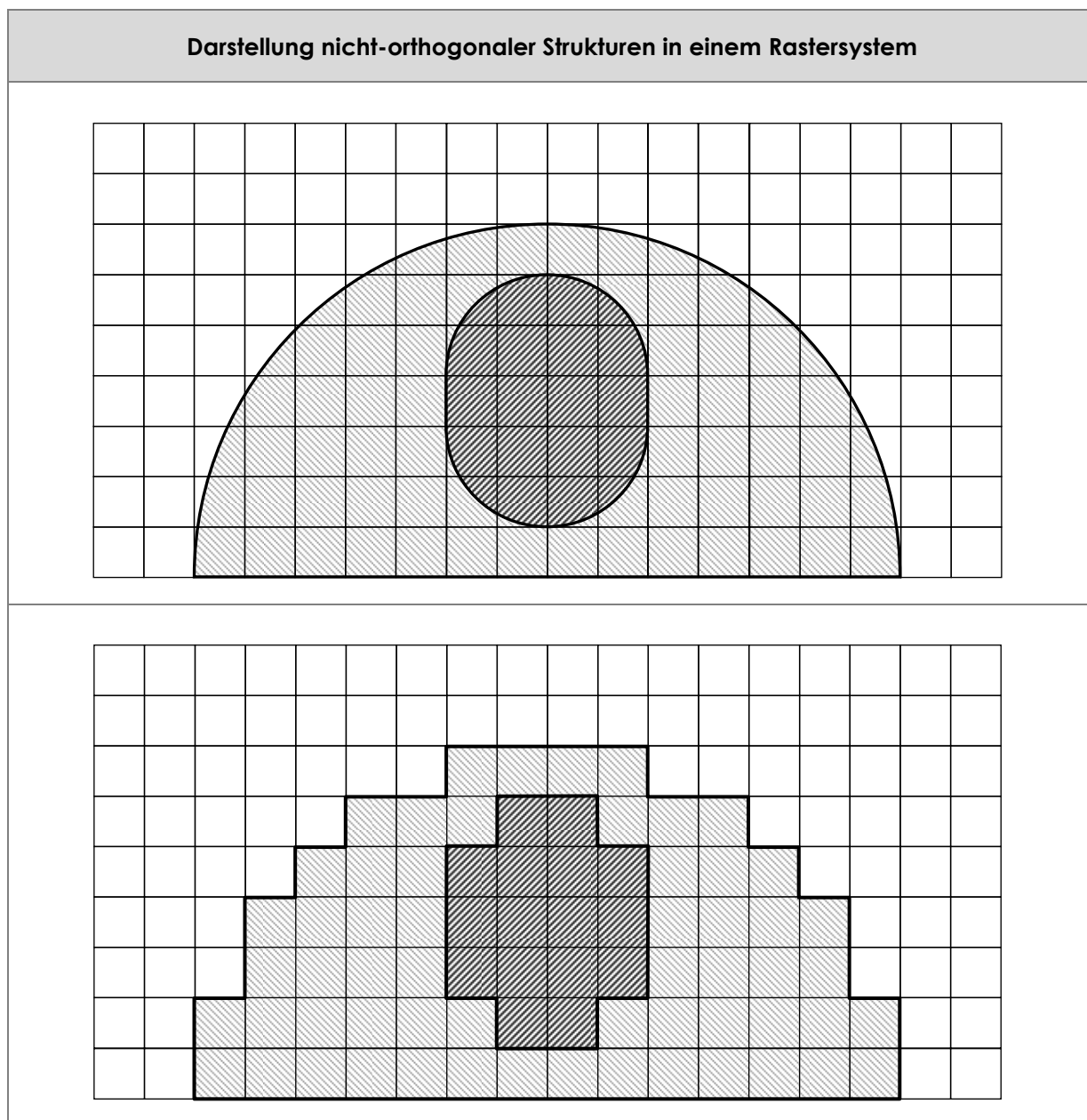


Abbildung 23: Darstellung nicht-orthogonaler Strukturen in einem Rastersystem

Die wichtigste Voraussetzung für die Anwendung von zellulären Automaten ist es, den Beobachtungsraum als gerastertes Modell abzubilden. Im Beispiel soll ein Kästchen per Definition die einheitslose Kantenlänge eins besitzen. Bei einer genauen Berechnung ergibt sich für den großen Halbkreis eine Fläche von 77,0 und für den kleinen Kreis eine Fläche von 16,6. Für die gerasterten Figuren ergeben sich Flächen mit einem Inhalt von 74,0 und 16,0. Die Abweichung zwischen der exakten und der genäherten Berechnung betragen 3,9% und 3,6%. Das Beispiel zeigt, dass selbst bei einem relativ groben Raster noch sehr gute Näherungen an die Realität erzielt werden können. Diese Erkenntnis ist eine wesentliche Voraussetzung für die Akzeptanz von zellulären Automaten.

3. Grundlagen

Ein sehr anschauliches Beispiel für die Wirkungsweise von zellulären Automaten ist eine Simulation namens „Wator“. Der Name steht für die Abkürzung von „Water Torus“ (Torus: ringförmige, geometrischen Figur. Sie verfügt über eine einzige durchgehende Oberfläche, die im Vergleich zur Kugel leichter zu modulieren ist). Es handelt sich hierbei um ein Jäger-Beute-Modell, das die Beziehung von Beutefischen („Fisch“) und Jägerfischen („Hai“) simuliert. Die Regeln hierfür sind sehr einfach:

- Zu Beginn werden Fische und Haie gemäß der jeweils definierten Häufigkeit (wählbar) zufällig über alle Zellen verteilt.
- Eine Zelle kann entweder einen Hai oder einen Fisch beinhalten oder leer sein.
- Fische führen immer eine der möglichen Aktionen in der folgenden Priorität aus:
 1. sich vermehren, 2. in eine andere Zelle schwimmen
- Haie führen immer eine der möglichen Aktionen in der folgenden Priorität aus:
 1. sich vermehren, 2. fressen, 3. in eine andere Zelle schwimmen
- Fische und Haie schwimmen jeweils zufällig in eine der vier angrenzenden Zellen.
- Die Haie fressen diejenigen Fische, die sich in angrenzenden Zellen aufhalten.
- In jeder Runde erhöht sich das Alter der Fische um eins.
- Nach einer definierten Zeit (wählbar), also bei Erreichen eines bestimmten Alters, vermehren sich die Fische. Das Alter sowohl des „alten“ als auch des „neuen“ Fisches wird daraufhin auf Null gesetzt.
- Für jeden gefressenen Fisch erhöht sich die „Energie“ des Haies um eins. Für jede Runde ohne Futter reduziert sie sich.
- Bei einem definierten Stand an „Energie“ (wählbar) vermehrt sich ein Hai. Die „Energie“ beider Haie wird daraufhin auf Null gesetzt.
- Reduziert sich die „Energie“ eines Haies auf einen kritischen unteren Grenzwert (wählbar), verhungert dieser.

Trotz der relativ einfachen Überfunktionsfunktionen kann hier gut verfolgt werden, wie die Hai- und die Fischpopulation sich wechselseitig beeinflussen. Ebenso kann beobachtet werden, dass sich Haie auf Dauer nur in der Nähe von Fischpopulationen aufhalten können. Neben der zufälligen Verteilung haben die gewählten Parameter für Geburt und Verhungern einen entscheidenden Einfluss auf den Ablauf. Ein Aussterben beider Arten ist ebenfalls möglich [Gerhardt/Schuster 1995, S. 218ff].

3. Grundlagen

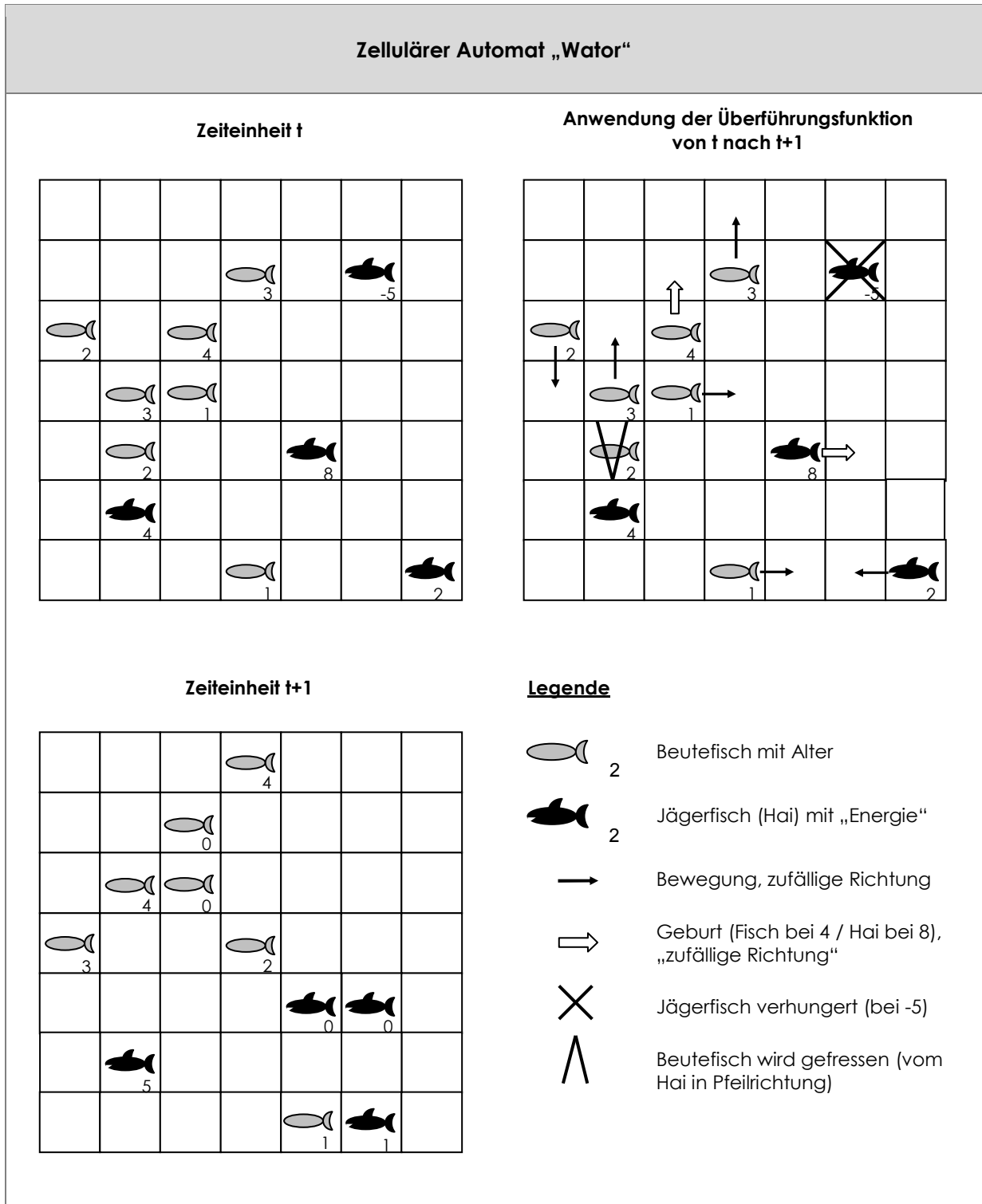


Abbildung 24: Zellulärer Automat „Wator“

in Anlehnung an: Gerhardt/Schuster 1995, S. 218ff

3. Grundlagen

Der große Nutzen der Systematik der zellulären Automaten besteht folglich darin, dynamische Prozesse abbilden zu können. Zelluläre Automaten eignen sich zur Verdeutlichung, dass selbst mit einer eng begrenzten Anzahl an Regeln völlig unterschiedliche Entwicklungen stattfinden können. Je nach Ausgangssituation können sich stabile, instabile, oszillierende oder chaotische Systeme ergeben sowie Mischformen daraus, die oftmals verblüffende und unerwartete Entwicklungen vollziehen. Selbst bei räumlich kleinen Modellen mit einfachen Regeln ist es kaum möglich, die Entwicklung über mehrere Zeiteinheiten hinweg vorherzusagen. Dies liegt darin begründet, dass bereits einfachste Modelle aufgrund der auftretenden Wechselwirkungen zu komplexen dynamischen Systemen werden. Gerade hier sind zelluläre Automaten trefflich in der Lage, Aussagen über deren Entwicklung zu treffen, indem sie die Prozesse „durchspielen“ und das Endergebnis per Simulation erzeugen. Eine bekannte Anwendung aus dem Ingenieurwesen ist das Nagel-Schreckenberg-Modell, mit dessen Hilfe Verkehrsströme und Fahrverhalten dargestellt werden können. Es ermöglicht eine sehr anschauliche Simulation von Verkehrsdichte und Stautwicklungen. Ebenfalls sehr bekannt ist das „Spiel des Lebens“ von J. H. Conway, wengleich dieses auch mehr der Veranschaulichung als der praktischen Anwendung dient [Gerhardt/Schuster 1995, S. 33ff]. Die Anwendungsmöglichkeiten für zelluläre Automaten (insbesondere in Verbindung mit EDV-Systemen) sind beachtlich. Letztlich können selbst das Pascal'sche Dreieck oder die Finite-Elemente-Methode als zellulärer Automat angesehen werden.

Die großen Möglichkeiten der zellulären Automaten liegen in dem Ansatz begründet, durch die Systematisierung von Räumen und Zuständen sowie durch einfache Regeln Dynamik erzeugen und darstellen zu können. Eine Systematik, die mittels Vorgängen von einem Zustand zu einem anderen führt, ist bereits bei der Risikoanalyse beschrieben worden. Eine Kombination beider Verfahren ist daher naheliegend. Die Systematik der zellulären Automaten wird insofern in Kapitel 5 dazu verwendet, ein Modell für das Verhalten von Passagieren und Einsatzkräften sowie für die Brandentwicklung und Rauchausbreitung bei Flugzeugunfällen zu erstellen.

3.4.3 Kybernetik

Die Kybernetik, die auch als „Kunst des Steuerns“ bezeichnet wird (von altgriechisch kybernétes = Steuermann), ist eine interdisziplinäre Wissenschaft, die grundlegende Konzepte zur Steuerung und Regulation von Systemen erforscht. Sie wurde in den 1940er Jahren von Wissenschaftlern unterschiedlichster Disziplinen entwickelt und befasst sich vor allem mit der mathematischen Beschreibung und modellartigen Erklärungen dynamischer Systeme. Hierbei werden real ablaufende Prozesse vorzugsweise unter dem Gesichtspunkt der Aufnahme, Übertragung sowie der Rückkopplung von Informationen betrachtet. Als Untersuchungsgegenstand können sehr unterschiedliche Objekte wie Maschinen, Menschen oder lebende Organisationen in Frage kommen. Die anhand eines Modells gewonnenen Erkenntnisse können in sehr allgemeiner Weise zur Beschreibung von Verhaltensmechanismen, zur Prognostizierung von Abläufen oder der Entwicklung von Regelkreisläufen verwendet werden [Zeitverlag 2005a, S. 414].

3. Grundlagen

3.4.4 Monte Carlo-Methode

Die Monte Carlo-Methode ist ein Verfahren aus der Spieltheorie und der Wahrscheinlichkeitsrechnung. Ihr Name leitet sich von dem Stadtstaat Monte Carlo ab, der für seine Casinos und das dort stattfindende Glücksspiel berühmt ist. Die grundlegende Vorgehensweise bei dieser Methode ist es, mit Hilfe von häufig durchgeführten Zufallsexperimenten eine Aussage zu einer Fragestellung zu erlangen, die nicht oder nur sehr aufwendig exakt berechnet werden kann. Es handelt sich also um einen numerischen Lösungsansatz als Alternative zur analytischen Berechnung. Die grundlegende Idee besteht letztlich darin, mittels einer großen Anzahl von Stichproben eine repräsentative Aussage über eine Gesetzmäßigkeit zu erzeugen. Die mathematische Grundlage hierzu bildet das Gesetz der großen Zahl. Die Zufallsexperimente können entweder durch Nachstellen des Experimentes real durchgeführt werden oder durch die Erzeugung von Zufallszahlen. Zufallsvorgänge lassen sich mittels Computersimulationen leicht generieren, wobei die Grenze der Leistungsfähigkeit von Computern bei vieldimensionalen Problemstellungen noch immer schnell erreicht wird [Butzlaff 2006, S. 13ff].

3.4.5 Gesetz der großen Zahlen

„Als Gesetze der großen Zahlen werden bestimmte mathematische Sätze aus der Stochastik bezeichnet. In ihrer einfachsten Form besagen diese Sätze, dass sich die relative Häufigkeit eines Zufallsereignisses in der Regel der Wahrscheinlichkeit dieses Zufallsergebnisses annähert, wenn das zu Grunde liegende Zufallsexperiment immer wieder unter denselben Voraussetzungen durchgeführt wird. Es handelt sich also um Konvergenzsätze für Zufallsvariablen. Diese werden unterteilt in ‚starke‘ (fast sichere Konvergenz) und ‚schwache‘ (Konvergenz in Wahrscheinlichkeit) Gesetze der großen Zahlen.

[...]

Die Wahrscheinlichkeit, dass eine Münze beim Werfen Kopf zeigt, betrage 50%. Je häufiger die Münze geworfen wird, desto unwahrscheinlicher wird es, dass der Anteil der Würfe, bei denen Kopf erscheint (also die RELATIVE Häufigkeit des Ereignisses ‚Kopf‘), um mehr als einen beliebigen vorgegebenen Wert von der theoretischen Wahrscheinlichkeit 50% abweicht. Dagegen ist es durchaus möglich, dass die ABSOLUTE Differenz zwischen der Anzahl der Kopf-Würfe und der halben Gesamtzahl der Würfe anwächst.“ [Wikipedia o. J.]

Sehr anschaulich lässt sich das Gesetz der großen Zahlen im Versicherungswesen beschreiben: Das Gesetz der großen Zahlen erlaubt eine Vorhersage über den künftigen Schadensverlauf. Je größer die Anzahl der versicherten Objekte ist, die von gleichartigen Gefahren bedroht sind, desto näher liegen die Zahl der erwarteten Schadensfälle (Erwartungswert) und die Zahl der tatsächlich eingetretenen Schäden zusammen. Der Einfluss des Zufalls nimmt mit steigender Größe des Gesamtumfangs stetig ab. Das Gesetz der großen Zahlen kann aber nichts darüber aussagen, wer im Einzelnen von einem Schaden betroffen sein wird [Wikipedia o. J.].

3. Grundlagen

Das Gesetz der großen Zahlen ist erfüllt („schwache Konvergenz“), wenn für

$$\bar{X}_n = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n (X_i - E(X_i)) \quad (5)$$

mit den Zufallsvariablen X_1, X_2, \dots, X_n für alle positiven Zahlen ε gilt:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} P(\bar{X}_n > \varepsilon) = 0 \quad (6)$$

mit:

- \bar{X} - Mittelwert der Zufallsvariablen X
- X - Zufallsvariable
- n - Gesamtanzahl
- i - Laufende Nummer
- E - Erwartungswert
- P - Wahrscheinlichkeit
- ε - Differenz zwischen relativer Häufigkeit und Wahrscheinlichkeit eines Ereigniseintritts („Abweichungsrate vom Erwartungswert“)

Für den speziellen Fall eines Bernoulli-Experimentes gilt folgende Abwandlung des Gesetzes der großen Zahlen:

$$P(|h - p| < \varepsilon) \geq 1 - \frac{pq}{n\varepsilon^2} \quad (7)$$

mit:

- P - Wahrscheinlichkeit
- h - Relative Häufigkeit für Ereigniseintritt
- p - Wahrscheinlichkeit für Ereigniseintritt
- ε - Differenz zwischen relativer Häufigkeit und Wahrscheinlichkeit eines Ereigniseintritts („Abweichungsrate vom Erwartungswert“)
- q - Gegenwahrscheinlichkeit eines Ereigniseintritts
- n - Anzahl der Experimente

Diese Vereinfachung des Gesetzes der großen Zahlen ist hier zulässig, da in der vorliegenden Arbeit nur binomialverteilte Zufallsvariablen (z. B. bestimmtes Merkmal einer Schadenslage tritt ein oder nicht) betrachtet werden.

Ein weit verbreiteter Irrtum bezüglich des Gesetzes der großen Zahlen (wenngleich dieser Begriff in der Öffentlichkeit als solches wenig bekannt sein dürfte) soll an dieser Stelle noch korrigiert werden: Insbesondere besagt das Gesetz der großen Zahlen nicht, dass ein Ereignis, das bisher weniger häufig eintrat als erwartet, seinen „Rückstand“ irgendwann ausgleichen und folglich in der nahen Zukunft häufiger eintreten wird.

3. Grundlagen

Eine grobe Fehleinschätzung (u. a. oftmals beim Roulettespiele) ist die Annahme, dass „säumige“ Zahlen aufholen müssen, um wieder der statistischen (Gleich-) Verteilung zu entsprechen. Zwar trifft dieser Effekt bei unendlich vielen Ereignissen ein, aber für die Gegenwart und die nähere Zukunft bleibt die Eintrittswahrscheinlichkeit auf Grund der stochastischen Unabhängigkeit unverändert [Wikipedia o. J.].

3.4.6 Computational Fluid Dynamics (CFD)

Vor der Entwicklung einer eigenen Systematik und deren programmiertechnischer Umsetzung empfiehlt es sich zu ermitteln, inwieweit eine Aufgabenstellung mit bestehenden Verfahren und Programmen gelöst werden könnte, um gegebenenfalls auf eine aufwändige Eigenentwicklung zu verzichten.

Im vorliegenden Fall ist eine Analyse der etablierten Softwarelösungen zur Berechnung von Entfluchtung, Entrauchung sowie Brandausbreitung ratsam. Diese Programme haben sich mit zunehmender Rechenleistung von Standardcomputern in den letzten Jahren stark etabliert und ihre Verwendung wird vermutlich noch deutlich zunehmen. Sie werden generell unter der Bezeichnung „Computational Fluid Dynamics“ (CFD) zusammengefasst und dienen nicht nur der spezifischen Simulation von Bränden, sondern ganz allgemein zur Berechnung von Strömungen sowie Wärme- und Stoffübergängen. Als Basis dienen hierbei die grundlegenden Gleichungen der Hydrodynamik (Navier-Stokes-Gleichungen) mit ihren Variablen Druck, Temperatur, Dichte, Gaseschwindigkeit und Stoffkonzentrationen. Die Berechnung erfolgt als Funktion von Zeit und Ort. Der Untersuchungsraum (i. d. R. das Volumen eines Gebäudes oder einer technischen Anlage) wird hierfür in ein Raster aus rechtwinkligen Gitterzellen eingeteilt. Die Analogie der hier verwendeten Finite-Elemente-Methode bzw. Finite-Volumen-Methode zu den bereits erläuterten zellulären Automaten ist leicht ersichtlich. Die Einteilung einer Fläche oder eines Volumens in eine Vielzahl von gleichen Zellen, deren Zustand jeweils in Abhängigkeit des eigenen Zustandes und der umliegenden Werte berechnet wird, ist eine bewährte Herangehensweise bei der computergestützten Modellierung [Rabe et al. o. J., S. 4ff.].

Zwei Programme, die speziell für den Bereich Brandschutz entwickelt wurden, sind der „Fire Dynamics Simulator“ (FDS), der das Brandverhalten berechnet, und der „Smokeviewer“ (SMV), der die Rauchausbreitung simuliert. Beide Anwendungen wurden vom amerikanischen „National Institute for Standards and Technology“ (NIST) entwickelt. Diese Softwareprodukte haben sich u. a. deshalb als Standardlösungen etabliert, da sie als freie Software kostenfrei zur Verfügung gestellt werden.

Daneben stehen weitere Programme wie „CFX“ von der amerikanischen Firma ANSYS oder „ASERI“ (Entfluchtung) und „KOBRA-3D“ (Brand- und Rauchsimulation) von der deutschen Firma IST zur Auswahl, um beispielhaft einige kommerzielle Produkte zu nennen.

Zu klären ist nun, ob und inwieweit die verfügbaren CFD-Anwendungen als Basis für die vorliegende Aufgabenstellung verwendbar sind. Im Detail ergibt sich folgendes Bild:

3. Grundlagen

Die Möglichkeiten zur Berechnung der Brand- und Rauchausbreitung übersteigen die Erfordernisse der Aufgabenstellung deutlich, da CFD-Anwendungen für die Modellierung von komplexen dreidimensionalen Strukturen entwickelt wurden. Im vorliegenden Fall ist jedoch die Abbildung einfacher geometrischer Formen vollkommen ausreichend, da die modellhafte Darstellung von einem ebenen Untergrund ausgeht, auf dem sich ein (Flüssigkeits-)Brand ausbreitet, sowie von einer Röhre (Flugzeug) mit sehr begrenztem Volumen, in der sich der Rauch schnell gleichmäßig verteilt. Die großen Stärken der CFD-Anwendungen kämen hier nicht zum Tragen. Darüber hinaus sind jedoch die Lücken, die die üblichen CFD-Anwendungen mit Blick auf den Untersuchungsgegenstand haben, entscheidend:

- Die Simulation der medizinischen Versorgung der Passagiere ist nicht implementiert. Zwar können verschiedene Gesundheits- und Mobilitätszustände definiert werden, eine aktive Veränderung bzw. Stabilisierung des Gesundheitszustandes durch das Eingreifen der Einsatzkräfte während der Rettung ist allerdings nicht möglich.
- Am schwersten wiegt jedoch die Tatsache, dass sämtliche CFD-Anwendungen keine Simulation von Einsatzkräften vorsehen. Damit fehlt das Kernelement, der entscheidende Untersuchungsgegenstand dieser Arbeit. Denn ohne Betrachtung der Wechselwirkung zwischen den Einsatzkräften einerseits sowie den Passagieren und dem Schadensereignis (hier Brand und Rauch) andererseits erscheint eine Modellierung und Berechnung mit CFD-Anwendungen wenig sinnvoll.

Als Ergebnis ist demnach festzuhalten: CFD-Standardprogramme können einerseits ihre Vorteile nicht wirksam zur Anwendung bringen, während sie andererseits – bezogen auf die Aufgabenstellung – entscheidende Lücken in ihren Funktionalitäten aufweisen. Eine Integration von CFD-Standardprogrammen bei der Bearbeitung der vorliegenden Fragestellung erscheint vor diesem Hintergrund wenig sinnvoll. Vielmehr empfiehlt sich die Entwicklung eines eigenen Rechenmodells, das den Rahmenbedingungen der Aufgabenstellung perfekt angepasst ist.

4. Methodik

Im diesem Kapitel wird dargestellt, welcher methodische Ansatz zur Bearbeitung der Aufgabenstellung gewählt wurde. Hierbei wird beschrieben, wie die Untersuchung strukturiert ist und welche Systematik ihr zu Grunde liegt. Diese Ausführungen sind zunächst abstrakter Natur, da diese die Methodiken grundlegend - also theoretisch - darstellen. Im Anschluss folgt in Kapitel 5 eine ausführliche Beschreibung der konkreten Modellierung, in der die Parameter, Annahmen und Wirkungszusammenhänge, die in der Simulation zur Anwendung kommen, erläutert und hergeleitet werden. Um im Rahmen der vorliegenden Aufgabenstellung einen sinnvollen Lösungsweg zu erhalten, gilt es zunächst, für die beiden folgenden Fragen schlüssige Antworten zu finden:

- Welche Ansätze sind geeignet, um die Realität mittels mathematischer Zusammenhänge darzustellen?
- Welche Modelle können hier als Instrumente verwendet werden, welche müssen weiterentwickelt werden?

Es ist naheliegend, auch bei der Modellierung von Flugzeugunfällen die bekannten Formen der Risikoanalyse, wie sie in Kapitel 3.3 erläutert wurden, als Grundlage zu verwenden. Mehrere Gründe sprechen aus methodischer Sicht für die Systematik von Risikoanalysen:

- Die Anzahl an schweren Flugzeugunfällen ist glücklicherweise sehr gering. Dies hat jedoch zur Folge, dass es deutlich weniger Erfahrungswerte für solche Ereignisse gibt als beispielsweise für Verkehrsunfälle auf Straßen oder Gebäudebrände. Die klassische Vorgehensweise, eine große Menge an Ereignissen statistisch nach verschiedenen Merkmalen auszuwerten und somit Rückschlüsse auf Erfolgsfaktoren oder Wirkungskorrelationen zu ziehen, lässt sich daher nicht anwenden. Überlebende Flugzeugunfälle weisen eine hohe Varianz an möglichen Schadenslagen auf, die gleichzeitig aber auch nur sehr selten eintreten. Oft dient ein einziger Flugzeugunfall über Jahrzehnte hinweg als Referenz für einen Unfalltyp oder eine charakteristische Schadenslage, da sich über lange Zeiträume hinweg kein gleichartiger Unfall ereignet (dies trifft beispielsweise auf die beiden Unfälle zur Bemessung der Atemgiftbelastung in Kapitel 5.2.4.5 zu). Zur Problemlösung muss also ein Ansatz entwickelt werden, der es ermöglicht, mit Hilfe geeigneter Modelle Aussagen zu hypothetischen Ereignissen und den dann erfolgenden Abläufen zu treffen. Hierzu eignet sich die Risikoanalyse als Instrument vortrefflich, wurde sie doch genau für diese Zielsetzung geschaffen.
- Risikoanalysen ermöglichen es, zukünftige Ereignisse abzuschätzen, um bereits im Vorfeld bewusst Abläufe steuern und beeinflussen zu können und um hinreichend auf mögliche Auswirkungen vorbereitet zu sein. Dieser Aspekt steht bei der vorliegenden Arbeit im Vordergrund. Durch die Modellierung der Zusammenhänge und ihrer mathematischen Beschreibung sollen die Wechselwirkungen zwischen Ursache und Wirkung untersucht und in einer übersichtlichen und nachvollziehbaren Form dargestellt werden. Hierbei interessiert vor allem, welchen Einfluss der Faktor „Anzahl an Einsatzkräften“ hat und welcher Zusammenhang zum Einsatzerfolg besteht.

4. Methodik

- Ein weiterer Vorteil der Risikoanalyse besteht darin, dass es sich um ein transparentes und logisch schlüssiges Verfahren handelt. Die Zusammenhänge und Systemgrenzen werden beschrieben und die getroffenen Annahmen sowie die zugrunde gelegten Wirkungsmechanismen begründet. Darüber hinaus liegen auch die Beschreibungen der möglichen Schadenslagen und deren Eintrittswahrscheinlichkeiten vor. Alle zugrunde liegenden Annahmen, Zusammenhänge und Wirkungsmechanismen können somit quantitativ und qualitativ nachvollzogen werden. Der Betrachter besitzt daher alle Informationen, die er benötigt, um sich eigenständig ein Urteil darüber zu bilden, inwieweit er den methodischen Ansatz der Risikoanalyse und deren Ergebnisse akzeptiert oder (aus seiner Sicht) begründet ablehnt.
- Darüber hinaus besteht durch den modularen Aufbau der Risikoanalyse die Möglichkeit, einzelne Bestandteile des Modells zu modifizieren, wenn sich die Erkenntnislage verbessert hat oder aufgrund einer veränderten Aufgabestellung einzelne Aspekte differenzierter betrachtet werden sollen. Veränderungen sind vor allem in der mathematischen Beschreibung einzelner Wirkungsmechanismen zu erwarten. Trotz neuer Erkenntnisse, die in die Risikoanalyse einfließen, behalten viele Teile ihre Gültigkeit in der Regel jedoch unverändert bei. Modifizierungen führen also zu einer Differenzierung und somit zur Präzisierung des rechnerischen Modells, ohne dass der grundsätzliche Aufbau der Risikoanalyse geändert werden muss.

Als Grundlage zur weiteren Bearbeitung der vorliegenden Aufgabenstellung wird daher die Methode der Risikoanalysen verwendet.

4.1 Kybernetische Risikoanalyse

Wie bereits bei der Hinterfragung der Aufgabenstellung ausgeführt ist nicht die Vermeidung des Schadensereignisses Inhalt dieser Arbeit, sondern die Bewertung der operativen Schadensbegrenzung. Bei der Ermittlung der notwendigen oder optimalen Anzahl an Einsatzkräften für Flugzeugunfälle hat sich der Schadensfall, nämlich der Flugzeugunfall, schon ereignet. Der Flugzeugunfall ist daher der Ausgangspunkt der Betrachtung, nicht aber ihr eigentlicher Inhalt. Zwar ist der Schadensfall per se bereits eingetreten, die Schadenshöhe ist jedoch noch variabel und hängt in hohem Maße von den weiteren Abläufen ab. Die Vorgehensweise zur Lösung dieser Problemstellung entspricht in ihren Grundzügen daher einer Ereignisablaufanalyse. Diese soll methodisch als Basis für das Rechenmodell, das es zu entwickeln gilt, verwendet werden. Entsprechend dieser Analysemethode wird der weitere Verlauf des Ereignisses strukturiert aufgezeigt und untersucht. Hier interessieren vor allem die sich anschließenden Maßnahmen zur Rettung von Leben und zur Schadensbegrenzung.

Der wesentliche Punkt, in dem sich die hier entwickelte Methode von der „klassischen“ Risikoanalyse in Form der Ereignisablaufanalyse unterscheidet, ist die Berücksichtigung der Dynamik, die bei Flugzeugunfällen insbesondere durch den Faktor Mensch erzeugt wird:

4. Methodik

Der Mensch ist - prinzipiell - frei in seinen Entscheidungen. Dies macht es jedoch sehr schwierig, ihn wie ein technisches Bauteil in eine Zuverlässigkeitsberechnung zu integrieren. Technische Systeme lassen sich relativ einfach auf ihre Zuverlässigkeit überprüfen. Für jedes Bauteil sind die Funktion und mögliche Zustände bekannt. Es lassen sich daneben die Versagenswahrscheinlichkeit und die Bedingungen, unter denen es ausfällt, klar definieren. Sind darüber hinaus die funktionalen Zusammenhänge bekannt wie die Auslösekriterien von Schutzeinrichtungen und die Anordnung der einzelnen Objekte (eine typische Unterscheidung wären beispielsweise Parallel- oder Reihenschaltungen), können fundierte Aussagen über die Zuverlässigkeit eines Systems oder Prozesses getroffen werden. Für den Menschen trifft dies nicht in so einfacher und klar definierter Form zu. Das Zustandekommen von Entscheidungen ist ein komplexer Vorgang. Es ist daher nur bedingt möglich, menschliches Handeln exakt vorherzusagen. Dem Menschen steht in der Regel eine Vielzahl an Handlungsoptionen zur Auswahl und er vermag auch selbst in das Geschehen einzugreifen. Diese Einflussnahme kann allerdings gleichermaßen nützlich wie kontraproduktiv sein. Eine starre Vorhersage des Verhaltens der von einem Flugzeugunfall betroffenen Personen gibt daher kein zutreffendes Bild der Realität wieder.

Gleichzeitig ist der Mensch bei der Bewertung von Rettungsmaßnahmen bei Flugzeugunfällen von zentraler Bedeutung. Einerseits ist der Schutz von Leben die primäre Aufgabe aller Rettungseinsätze. Hieran misst sich letztendlich der Erfolg eines jeden Einsatzes. Andererseits bestimmt der Mensch mit seinem Handeln aber auch zu großen Teilen den Ausgang eben jener Einsätze. Sowohl die Einsatzkräfte als auch die Flugzeugbesatzung und die Passagiere tragen durch richtiges Verhalten in erheblichem Maße zum Gelingen eines Einsatzes bei. Sie haben in der Summe den größten Einfluss auf das Ergebnis der Rettungsmaßnahmen.

Um der Wichtigkeit und der damit verbundenen Dynamik des Faktors Mensch gerecht zu werden, ist also eine Methode notwendig, die es erlaubt, ihn als selbstständig handelndes Element mit einzubeziehen.

4. Methodik

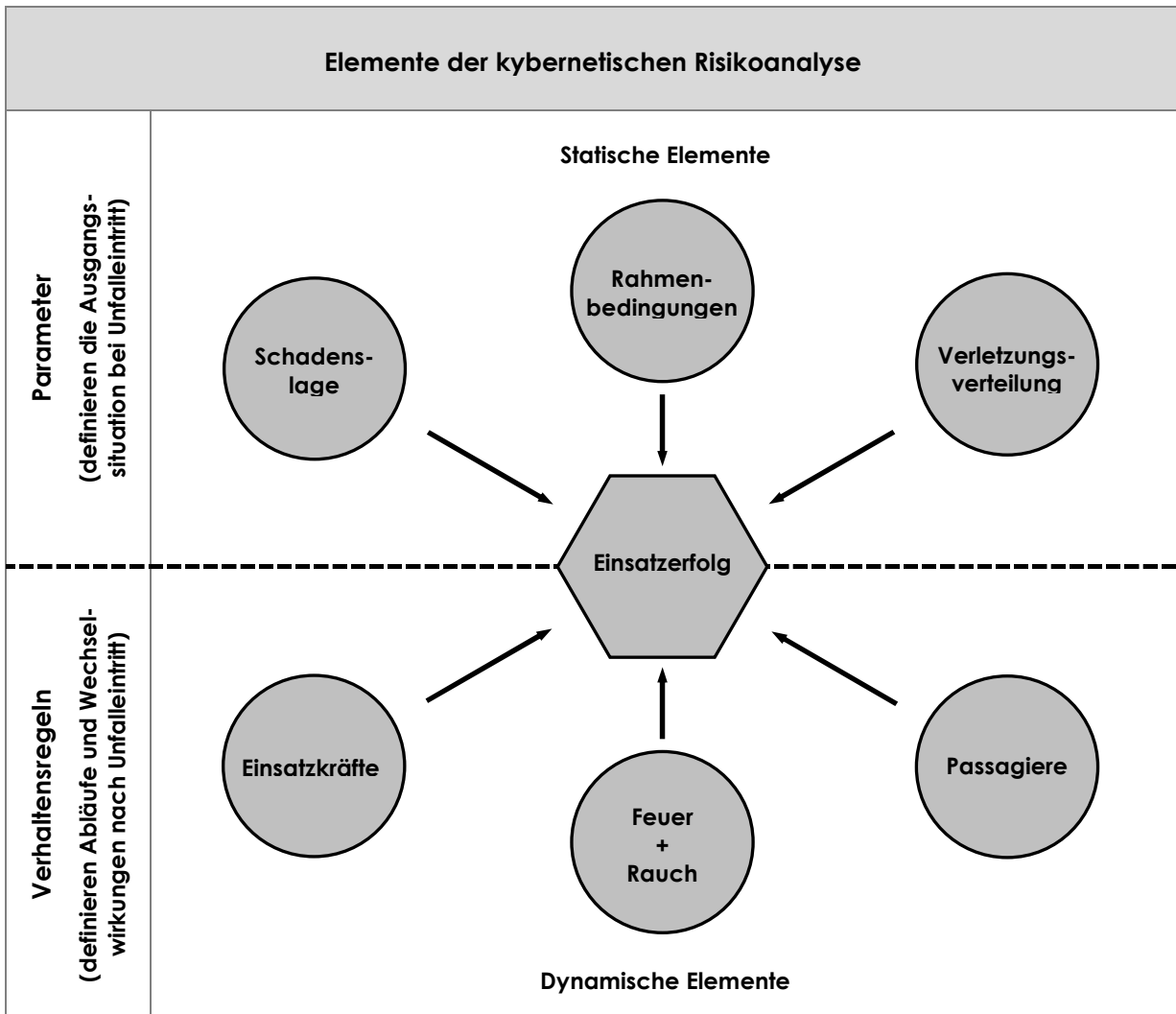


Abbildung 25: Elemente der kybernetischen Risikoanalyse

Das hieraus entstehende Verfahren soll als „kybernetische Risikoanalyse“ bezeichnet werden. Um die im Schadensfall vorhandene (Eigen-) Dynamik der Abläufe zu berücksichtigen, wird die Ereignisablaufanalyse mit Hilfe der Grundprinzipien der zellulären Automaten modifiziert. Zur Durchführung der Risikoanalyse wird daher ein Ereignisraum modelliert, innerhalb dessen dynamische Prozesse dargestellt werden können, die anschließend ausgewertet werden. Das Attribut „kybernetisch“ spiegelt hierbei demnach den Sachverhalt wider, dass bei der Durchführung eine Vielzahl von Wechselwirkungen auftritt, die den Verlauf der simulierten Ereignisse unablässig beeinflussen und somit wieder neue Wechselwirkungen erzeugen. Für die Modellbildung werden zwei grundlegende Gruppen von Elementen verwendet, die statischen sowie die dynamischen. Sie werden im Folgenden näher erläutert.

4. Methodik

4.1.1 Definition der dynamischen Elemente

Unter dynamischen Elementen werden alle Größen verstanden, die sich im Lauf eines Schadensereignisses verändern können. Hierbei ist es unerheblich, ob diese Veränderung durch inneren Antrieb (z. B. Brand breitet sich von alleine aus) oder äußere Umstände (z. B. Brand wird aktiv durch die Feuerwehr gelöscht) hervorgerufen wird. Zu den dynamischen Elementen gehören „Feuer und Rauch“ (es wird dieses bildhafte Begriffspärchen statt der fachlich präzisen Bezeichnung „Brand“ verwendet, nicht zuletzt um die beiden Komponenten „Feuer“ und „Rauch“ klar zu unterscheiden und differenziert zu betrachten), die „Passagiere“ und die „Einsatzkräfte“. Alle drei Gruppen haben jeweils ihnen eigene Charakteristika wie Systemzustand, Verhaltensmuster und Zielsetzung. Sie verhalten sich gemäß ihren eigenen Regeln, die es ihnen ermöglichen, auf die sie betreffenden gegenwärtigen Bedingungen eigenständig zu reagieren. Bei einem Zusammentreffen der dynamischen Elemente kommt es in der Regel zu Wechselwirkungen. Beispielsweise weichen die Passagiere grundsätzlich vor Feuer zurück, während die Einsatzkräfte das Absuchen des Flugzeugs unterbrechen, wenn sie auf einen verletzten Passagier stoßen, um diesen zu versorgen und zum Sammelplatz zu bringen. Insbesondere die Möglichkeiten des menschlichen Handelns der Einsatzkräfte und der Passagiere sind sehr vielfältig. Sie ergeben sich als Wechselwirkung zwischen eigenem Wollen und den Einschränkungen bzw. Zwängen durch die Umwelt. Jeder Passagier und jede Einsatzkraft entscheidet unabhängig von anderen und nur unter Zugrundelegung der eigenen aktuellen Situation, welche Handlung vorgenommen wird. Dies bedeutet, dass auch eine große Anzahl gleichartiger Personen nicht als eine homogene Masse handelt. Vielmehr wird eine Vielzahl von Individuen mit äußerst unterschiedlichen Voraussetzungen dargestellt, die jeweils auf Grund der eigenen aktuellen Lage und der eigenen Möglichkeiten entscheiden und agieren.

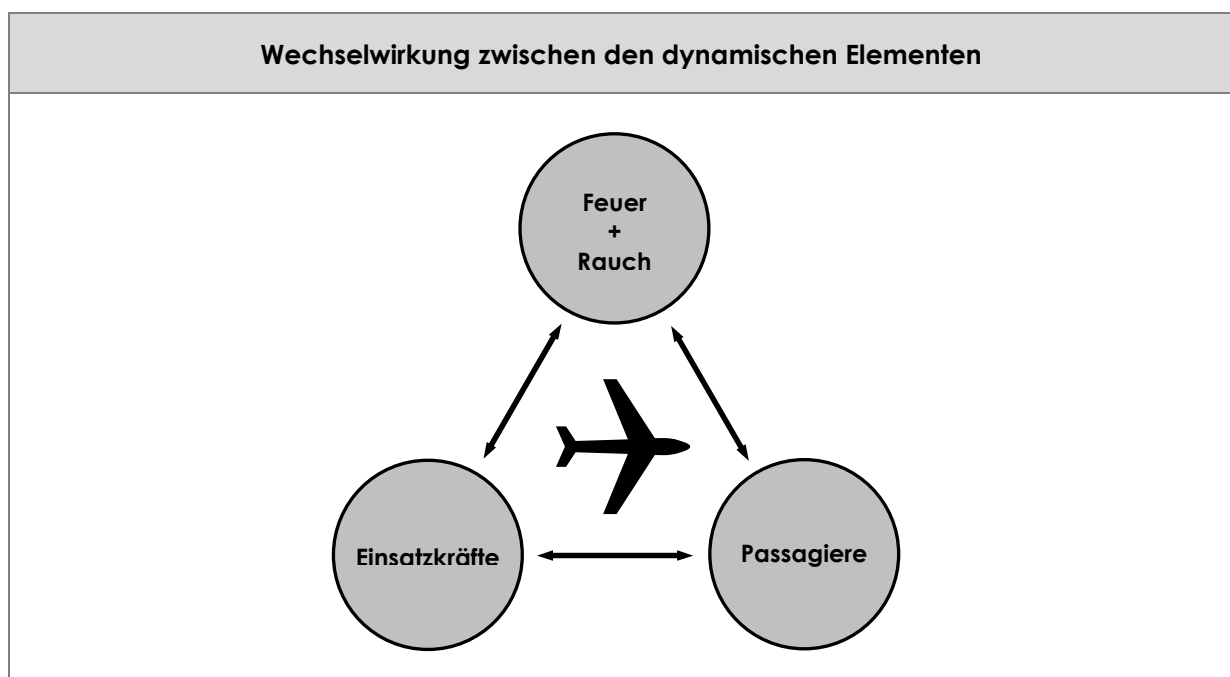


Abbildung 26: Wechselwirkung zwischen den dynamischen Elementen

4. Methodik

In der Systematik der zellulären Automaten entspricht der Systemzustand der dynamischen Elemente den Zellzuständen, die Verhaltensweise und Zielsetzung entsprechen den Überföhrungsfunktionen. Hierdurch entsteht ein sehr dynamisches Modell, das sich stark von den technischen Ereignisablaufanalysen unterscheidet, die zumeist nur zwischen Funktionsfähigkeit und Defekt eines Bauteils differenzieren. Der Variationsspielraum wird dadurch um ein Vielfaches größer und das Modell nähert sich damit sehr stark der Realität an. Die Handlungsmöglichkeiten, die den Passagieren und den Einsatzkräften im Rahmen der Simulation zur Auswahl stehen, sowie die Ausbreitung, die Reaktion und die Auswirkungen von Feuer und Rauch werden in Kapitel 5 ausführlich beschrieben.

4.1.2 Definition der statischen Elemente (Parameter)

Die statischen Elemente beschreiben die Ausgangsbedingungen, unter denen ein Einsatz abläuft. Sie definieren hierzu das Unfallereignis anhand der charakteristischen Merkmale einer Einsatzsituation. Die statischen Elemente werden im Folgenden auch als Parameter bezeichnet, da sie die Rahmenbedingungen definieren, unter deren Vorgaben die Ergebnisse für einen konkreten Fall ermittelt werden können.

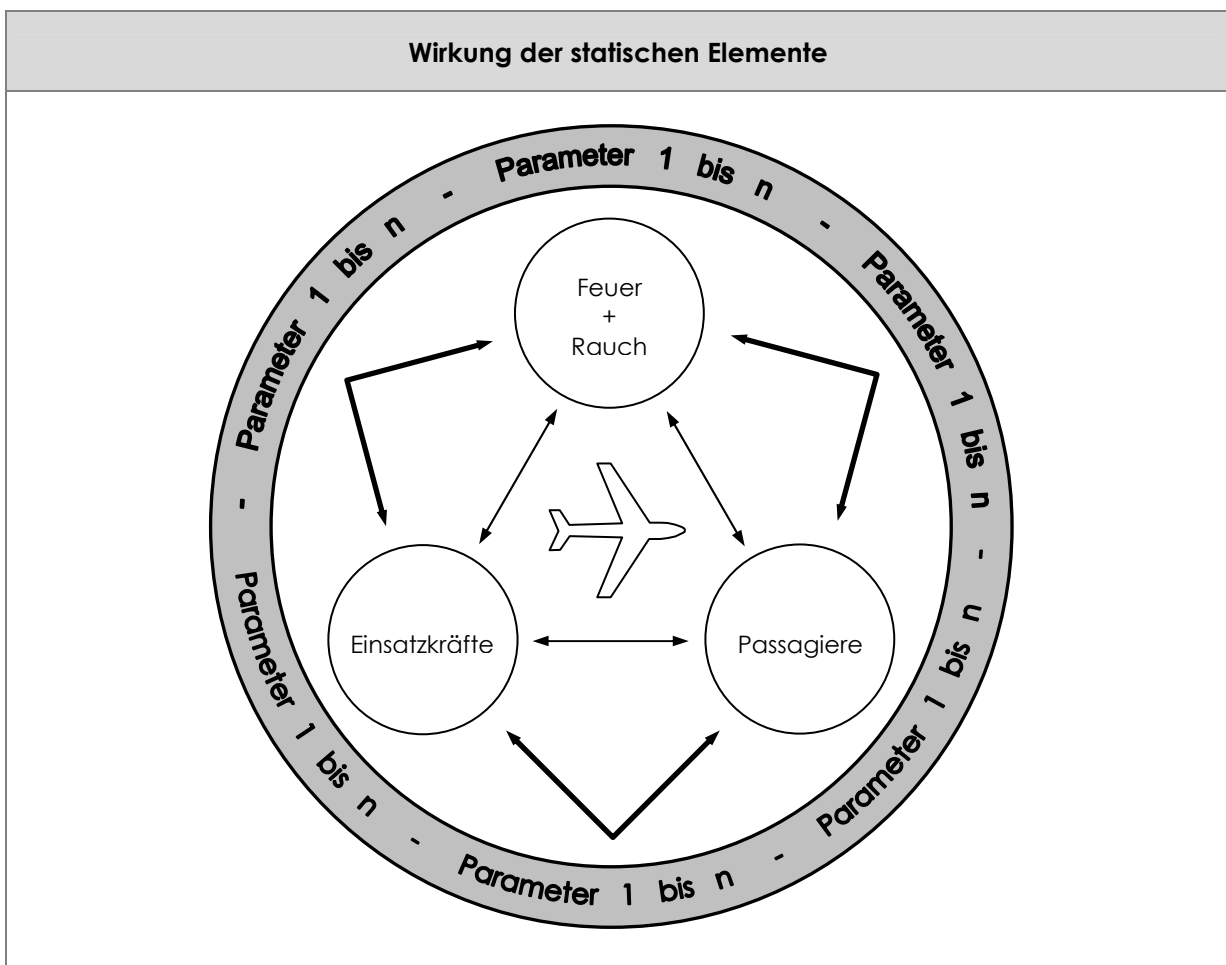


Abbildung 27: Wirkung der statischen Elemente

4. Methodik

Die Parameter entsprechen der Definition der Ausgangssituation bei den zellulären Automaten. Sie können also für verschiedene Szenarien unterschiedliche Werte annehmen, verändern sich aber während einer Simulation nicht mehr sondern behalten die zugewiesenen Werte bei. Sie unterteilen sich in „Schadenslage“ (z. B. Art und Zustand des Flugzeugs), „allgemeine Rahmenbedingungen“ (z. B. Wetter und Zeit) und „Verletzungsverteilung“ (Anzahl der Verletzten und Schwere der Verletzungen). Zu Beginn eines Simulationsdurchlaufes wird die Ausgangssituation durch Festlegung der statischen Elemente vorgenommen. Ein Beispiel: Ein Flugzeug mit 150 Passagieren hat im Nebel vor der Landbahn aufgesetzt. Dabei ist eine Tragfläche abgebrochen, infolge dessen sich der austretende Treibstoff entzündet hat. Nach der Definition der Ausgangssituation läuft das Ereignis quasi „von selbst“ ab, da die dynamischen Elemente gemäß ihrer Verhaltensmuster unter Berücksichtigung ihrer jeweils aktuellen Lage handeln, bis der Einsatz beendet ist.

4.2 Systematik der Computersimulation

Die Simulation der Ereignisse nach einem Flugzeugunfall stellt wie bereits beschrieben den Kern der vorliegenden Arbeit dar. In diese fließen alle Erkenntnisse bezüglich der Schadenslagen und der Eintrittswahrscheinlichkeiten ebenso ein wie sämtliche Überlegungen über Risikoanalysen und methodische Ansätze. Die Simulation ist das Hilfsmittel, das es letztlich ermöglicht, nachvollziehbare wissenschaftliche Aussagen zu der vorliegenden Fragestellung nach der optimalen Anzahl an Einsatzkräften zu treffen.

Viele Parameter, die teilweise zur Kalibrierung der Simulation und teilweise zur Definition der Ausgangssituation erforderlich sind, lassen sich nicht exakt festlegen, da für diese Werte in der Vergangenheit kein Datenmaterial erhoben wurde. So gibt es keine Aussagen über die Brandrauchkonzentration (oder CO-Konzentration) in der Flugzeugkabine, da hierfür keine Messeinrichtungen existieren. In solchen Fällen ist ein ingenieurmäßiges Vorgehen erforderlich. Für die Erstellung einer Simulation bedeuten fehlende Daten zunächst einmal eine Schwierigkeit. Wenn keine gesicherten Daten zur Verfügung stehen, gibt es drei Möglichkeiten, sich diesem Problem anzunähern:

- Die wissenschaftlich und statistisch genaueste Lösung wäre die eigene Erhebung der fehlenden Daten durch Experimente oder Realversuche. Im Falle von Flugzeugunfällen ist dies jedoch ausgeschlossen.
- Eine weitere Möglichkeit besteht darin, die Simulation so zu programmieren, dass sie lediglich auf Daten basiert, die verfügbar sind. Zum Ausschluss dieser Variante führt die Tatsache, dass das Abbilden der Wirklichkeit durch die begrenzte Datenbasis sehr stark verzerrt würde. Dies ist für eine wissenschaftliche Arbeit nicht tragbar.
- Die letzte Möglichkeit besteht darin, fehlende Werte durch Annahmen zu ersetzen. Ungenauigkeiten sind bei diesem Vorgehen nicht auszuschließen oder sogar unvermeidbar.

4. Methodik

Eine Annäherung an die Wirklichkeit ist mit geschätzten Daten jedoch immer noch besser zu erzielen, als ein vollständiger Verzicht auf sämtliche Faktoren, für die es keine exakten Werte gibt. Um die fehlenden Werte ersatzweise zu bestimmen, werden drei Vorgehensweisen angewendet:

- Zunächst werden die benötigten Parameter aufgrund eigener Erfahrungen und Beobachtungen sowie auf Basis von Befragungen und Fachgesprächen geschätzt.
- Die hierdurch erzielten Werte werden im Folgenden, soweit dies möglich ist, anhand von Einsatzberichten und -beschreibungen auf ihre Plausibilität überprüft und ggf. angepasst.
- Hilfreich ist bei diesem Verfahren zudem, eine Relevanzprüfung mittels systematischer Veränderung durchzuführen. Dies bedeutet, dass ein Parameter *ceteris paribus* variiert wird, um die hierdurch entstehenden Auswirkung zu betrachten. Aus dem Vergleich der Ergebnisse lassen sich dann Rückschlüsse darauf ziehen, ob die getroffenen Festlegungen plausibel und realitätsnah sind.

Um alle relevanten Schadensszenarien zu erfassen, gibt es prinzipiell drei unterschiedliche Vorgehensweisen:

- **Untersuchung einer charakteristischen Schadenslage**

Die einfachste Möglichkeit besteht darin, das Schadensereignis auf wenige Lagen (im Extremfall auf ein Schadensszenario) zu reduzieren. Danach werden die einzelnen Schadenslagen „per Hand“ durchgerechnet. Bei jeder Entscheidungsmöglichkeit wird entweder der wahrscheinlichere Fall, eine Durchschnittsannahme oder der ungünstigste Fall gewählt, je nachdem welche Bedeutung und Tragweite die ausführende Person dem jeweiligen Wert beimisst und welche Art der Risikoabschätzung vorgenommen werden soll. Der Vorteil dieser Vorgehensweise liegt in der Einfachheit. Es wird keine aufwendige Programmierung oder Berechnung benötigt. Von einer Risikoanalyse oder gar einer Ereignisablaufanalyse im klassischen Sinn ist hier aber nicht mehr zu sprechen. Die Ergebnisse sind stark von der subjektiven Einschätzung der durchführenden Person geprägt und erlauben keine fundierte Aussage über die tatsächliche Bandbreite der möglichen Ergebnisse.

- **Berechnung aller möglichen Kombinationen**

Eine andere Vorgehensweise ist das Durchrechnen aller Möglichkeiten. Hierzu werden alle möglichen Werte oder Ausprägungen, die die einzelnen Parameter annehmen können, mit einer Eintrittswahrscheinlichkeit versehen. Dann werden alle Kombinationen, die möglich sind, durchgerechnet und die Ergebnisse mit den Einzelwahrscheinlichkeiten der verwendeten Parameterausprägungen (bzw. dem Produkt aus allen) gewichtet. Danach werden bei einer hinreichend großen Anzahl an Durchläufen die gewichteten Ergebnisse zu einer Gesamtaussage zusammengefasst.

4. Methodik

- **Repräsentative Auswahl mittels Monte Carlo-Methode**

Eine dritte Möglichkeit stellt die bereits vorgestellte Monte Carlo-Methode dar. Analog zur vorherigen Vorgehensweise werden auch hier alle Parameter mit einer Eintrittswahrscheinlichkeit versehen. Dann wird die Simulation mit einer frei wählbaren Anzahl an Durchläufen durchgeführt. Zu Beginn jedes Durchlaufes wird für jeden Parameter anhand seiner Wahrscheinlichkeitsverteilung und einer Zufallsvariable ermittelt, welches Parametermerkmal für die aktuelle Berechnung verwendet wird. Danach werden alle Ergebnisse zusammengefasst. Voraussetzung hierfür ist jedoch, dass die einzelnen Parameter voneinander unabhängig sind bzw. die Abhängigkeiten mathematisch beschrieben und berücksichtigt werden.

Für die vorliegende Aufgabenstellung wird die Monte Carlo-Methode verwendet. Sie bietet den Vorteil, dass die Anzahl der Durchläufe frei wählbar ist. Dies steht im Gegensatz zur zweiten Variante, bei der sich die Anzahl an Durchläufen fest durch die möglichen Kombinationen ergibt. Hier ist natürlich keine Reduzierung möglich, da sonst verschiedene Parameterausprägungen in der Berechnung ausgespart würden und damit die Aussage des Ergebnisses eingeschränkt bzw. unbrauchbar wäre. Zwar werden bei der dritten Variante nicht alle denkbaren Kombinationen durchgerechnet, aber bei einer hinreichend großen Anzahl an Durchläufen wird jede Parameterausprägung dem Gesetz der großen Zahlen folgend mit an Sicherheit grenzender Wahrscheinlichkeit näherungsweise so oft in die Berechnung einfließen, wie es dem Erwartungswert entspricht.

Mit der Variante drei können folglich alle Parameterausprägungen hinreichend berücksichtigt werden. Dies allerdings mit dem Vorteil, dass der Rechenaufwand d.h. die Anzahl der Durchläufe um mindestens eine oder zwei Zehnerpotenzen geringer ist. Dies soll an einem kurzen Beispiel verdeutlicht werden: Enthält die Simulation beispielsweise zehn Parameter mit jeweils vier möglichen Ausprägungen (die stets von einander unabhängig sind), so ergibt sich bereits eine Anzahl von mehr als 1 Millionen Kombinationen:

$$n^k = 4^{10} = 1.048.576 \quad (8)$$

Alle Kombinationen werden bei der Variante zwei jeweils einmal durchgerechnet. Jeder Parameter wird dabei mit allen anderen Parametern in jeder denkbaren Variation kombiniert. Wird bei Variante drei hingegen angenommen, dass die Eintrittswahrscheinlichkeit einer einzelnen Parameterausprägung minimal 1% (= 0,01) beträgt (Tabelle 31), und wird zugleich definiert, dass jede Parameterausprägung hinreichend oft berücksichtigt wird, wenn ihr Erwartungswert bei 100 liegt, so ergibt sich eine erforderliche Anzahl von 10.000 Durchläufen, denn es gilt:

$$\text{Erwartungswert} = \text{Wahrscheinlichkeit} \times \text{Anzahl} \quad (9)$$

4. Methodik

Daraus ergibt sich:

$$100 = 0,01 \cdot \sum \text{Simulation} \quad \Leftrightarrow \quad \sum \text{Simulation} = \frac{100}{0,01} = 10.000 \quad (10)$$

Die Anzahl der Rechendurchläufe von Variante zwei zu Variante drei haben bei den angenommenen Werten ein Verhältnis von 1 : 100. Der Rechenaufwand ist bei Variante zwei also deutlich reduziert und für die praktische Durchführung wesentlich günstiger.

Eine gerechtfertigte Fragestellung ist bei dieser Vorgehensweise jedoch, ob bei Risikountersuchungen die Annahme, dass das Eintreten einer einzelnen ungünstigen Parameterausprägung alle Ereignisse ausreichend berücksichtigen kann, akzeptabel ist. Gegen diese Vorgehensweise spricht zunächst eine Erkenntnis, die bereits bei der Betrachtung einer Handvoll Unfallhergänge gewonnen werden kann. Erst das Zusammentreffen mehrere ungünstiger Umstände, die oftmals voneinander unabhängig sind und eine äußerst geringe Eintrittswahrscheinlichkeit besitzen, führen zu einem Schadensfall, dessen Entstehung zuvor für ausgeschlossen galt. Dieser Feststellung kann an dieser Stelle uneingeschränkt zugestimmt werden. Sie trifft bei der vorliegenden Aufgabenstellung jedoch nur bedingt zu. Das Schadensereignis, das erst durch die Kombination mehrerer ungünstiger Faktoren entsteht, ist in der vorliegenden Arbeit der Flugzeugunfall selbst. Dieser ist per Definition aber bereits schon eingetreten. Bei der Untersuchung der sich nun anschließenden Rettungsmaßnahmen geht es nun aber nicht darum, zu berechnen, welche Folgen ein Einsatz mit mehreren besonders ungünstigen Rahmenbedingungen („worst case Einsatz bei worst case Flugzeugunfall“) hat. Im Vordergrund steht der Anspruch, all jene Rahmenbedingungen zu modellieren und rechnerisch zu berücksichtigen, die die größte Anzahl aller Ereignisse und der sich anschließenden Abläufe beeinflussen. Hierbei müssen zwar auch Einsätze berücksichtigt werden, die unter erschwerten Rahmenbedingungen stattfinden, aber - überspitzt formuliert - der schlechteste Einsatzablauf, der einmal pro hunderttausend Flugzeugunfällen stattfindet, ist nicht von Interesse, sondern die Abläufe, die nach einem „durchschnittlichen“ Flugzeugunfall zu erwarten sind.

Weitere ausführliche Überlegungen zur konkreten Anzahl der Kombinationen in der entwickelten Simulation werden in Kapitel 5.3.2 auf Basis der tatsächlichen Parameterliste dargelegt.

In Abbildung 28 ist die Systematik der Computersimulation dargestellt. Die grauen Felder mit durchgezogener Umrandung stellen hierbei die Rechenschritte innerhalb des Computerprogramms dar. Die hellgrauen Felder mit unterbrochenem Rahmen symbolisieren Arbeitsschritte, die in Vorbereitung oder im Nachgang zur Berechnung erfolgen.

4. Methodik

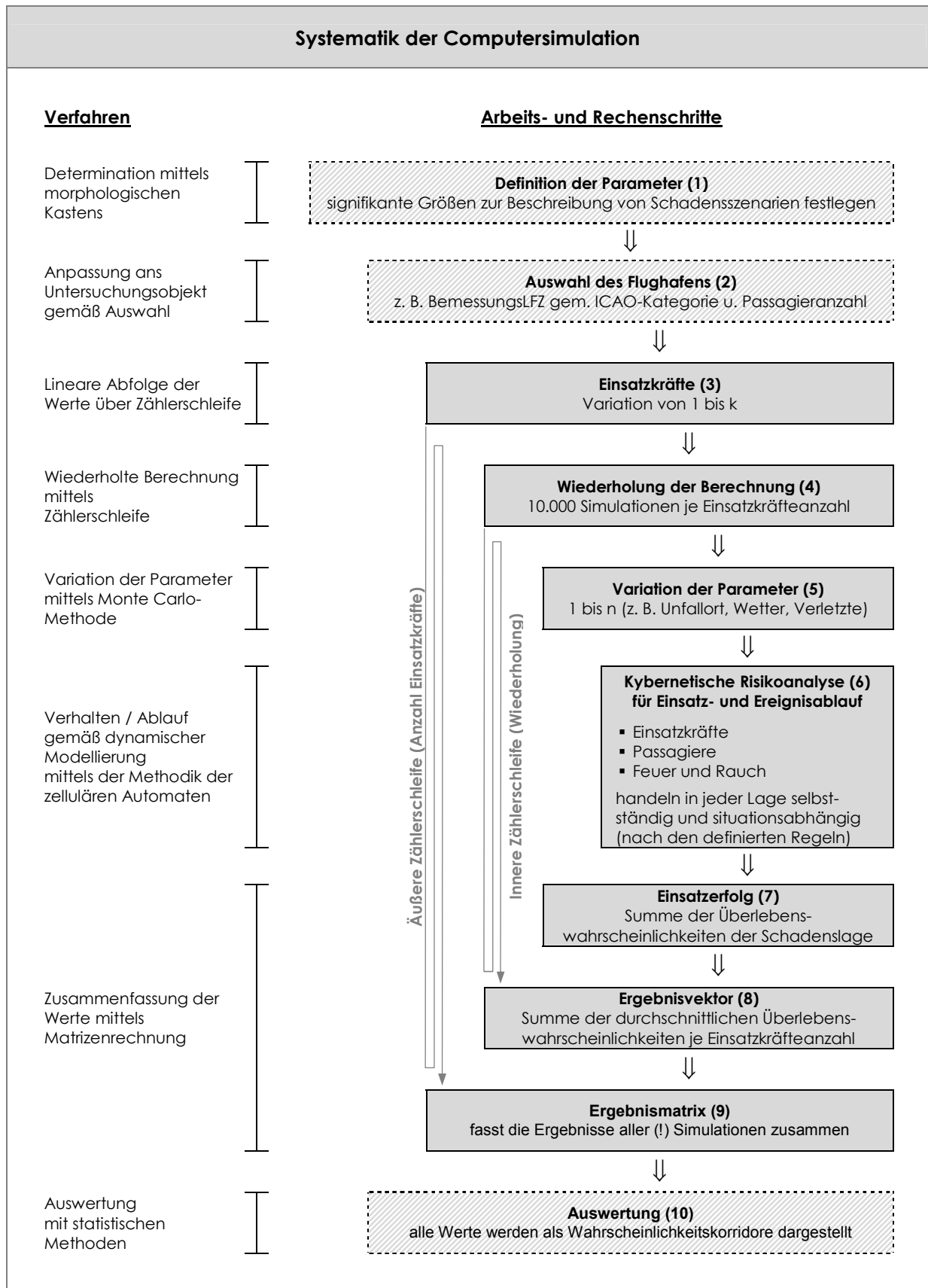


Abbildung 28: Systematik der Computersimulation

4. Methodik

(1) Auswahl der Parameter

Dieser Arbeitsschritt findet nicht in der Computersimulation statt, ist aber eine grundlegende Voraussetzung für deren Durchführung. Um die signifikanten Parameter (die bereits erläuterten statischen Elemente, Kapitel 4.1.2) zu determinieren (als Voraussetzung für deren Variation in den Simulationsdurchläufen), wird die Methodik des morphologischen Kastens angewandt. Zunächst werden die Parameter, die zur Beschreibung aller denkbaren Flugzeugunfallszenarien notwendig sind, mit ihren möglichen Ausprägungen ermittelt. Danach erfolgt mittels Ausschluss und Zusammenfassung eine Reduzierung auf eine Größenordnung, die in einer Simulation verarbeitet werden kann. Die „Auswahl der Parameter“ erfolgt in Kapitel 5.3.1 und 5.3.3.

(2) Auswahl des Flughafens

Auch dieser Arbeitsschritt findet nicht in der Computersimulation statt, sondern stellt ebenfalls eine Voraussetzung für deren Durchführung dar. Einige Parameter können nicht allgemeingültig bestimmt werden, da sie vom gewählten Untersuchungsobjekt abhängen. An erster Stelle ist hier das Bemessungsflugzeug zu nennen. Aus dessen Wahl ergibt sich die maximal mögliche Anzahl der Passagiere, über die ebenfalls explizit entschieden werden muss. Daneben existiert noch eine Reihe weiterer Größen, die von dem konkreten Untersuchungsflughafen abhängen wie z. B. die Anzahl der Nebeltage.

(3) Einsatzkräfte

Die äußere Zählerschleife variiert die Anzahl der Einsatzkräfte. Hierdurch kann die Anzahl der Einsatzkräfte in einem beliebigen Intervall schrittweise verändert (im vorliegenden Fall erhöht) werden. Dieser Wert geht dann als Schlüsselgröße in die kybernetische Risikoanalyse (6) ein. Für jeden Intervallschritt (bezüglich der Einsatzkräfte) wird eine neue Zeile in die Ergebnismatrix geschrieben, so dass dort die durchschnittlich zu erwartenden Folgen bei einem Flugzeugunfall der jeweiligen Anzahl an verfügbaren Einsatzkräften zugeordnet wird.

(4) Wiederholung der Berechnung

Ein wesentlicher Bestandteil der Monte Carlo-Methode ist die vielfache Wiederholung des Experiments. Im vorliegenden Fall wird eine 10.000fache Durchführung je Einsatzkräfteanzahl gewählt. In der Computersimulation lässt sich dies elegant mittels einer Zählerschleife (innere Schleife) realisieren.

(5) Variation der Parameter

Zur Bestimmung der verschiedenen Unfallszenarien werden die eingangs definierten Parameter (1) und (2) herangezogen. Die Ausprägungen der statischen Elemente werden für jeden Unfall, also für jeden Simulationsdurchgang, neu festgelegt. Innerhalb eines Simulationsdurchganges sind die Parameter jedoch unveränderlich und behalten die ihnen zugewiesenen Werte bei. Aus der Kombination der Parameter lassen sich nahezu alle denkbaren bzw. alle relevanten Unfallszenarien generieren.

4. Methodik

(6) Kybernetische Risikoanalyse

Den Kern des Computerprogramms stellt erwartungsgemäß die kybernetische Risikoanalyse dar. In ihr werden alle dynamischen Abläufe nach Schadenseintritt simuliert, also das Verhalten der Passagiere, die Maßnahmen der Einsatzkräfte sowie die Entwicklung von Feuer und Rauch. Die hier zur Anwendung kommenden Verhaltensweisen gelten für alle Schadensszenarien. Welche Ausgangssituation auch immer definiert wird, die dynamischen Elemente passen sich dann in ihrem Verhalten der jeweils aktuellen Situation an. Somit ist es möglich, durch die Variation der verschiedenen Parameter und die Dynamik der kybernetischen Risikoanalyse unterschiedlichste Lagen und Verläufe zu erzeugen.

(7) Einsatzerfolg

Als Ergebnis eines mittels kybernetischer Risikoanalyse (6) simulierten Flugzeugunfalls wird der jeweilige Einsatzerfolg ausgegeben. Dieser wird im Ergebnisvektor (8) gespeichert.

(8) Ergebnisvektor

Die Ergebnisse der einzelnen Durchläufe der kybernetischen Risikoanalyse (6) d.h. der jeweils ermittelte Einsatzerfolg werden in einem Ergebnisvektor zusammengefasst. Diesem lassen sich die durchschnittlich zu erwartenden Folgen als Mittelwerte bei einem Flugzeugunfall entnehmen.

(9) Ergebnismatrix

Die Werte der Ergebnisvektoren (8) werden in die Ergebnismatrix überführt und der jeweiligen Einsatzkräfteanzahl zugeordnet. Die Ergebnismatrix enthält somit die Ergebnisse aller (!) Simulationsdurchläufe in komprimierter Form.

(10) Auswertung

Die Werte aus der Ergebnismatrix (9) werden in einem Wahrscheinlichkeitskorridor dargestellt. Dies ermöglicht eine Aussage über die Verteilung der Ergebnisse. Ähnlich wie bei einer Wettervorhersage lassen sich dann Aussagen über mögliche bzw. die wahrscheinlichsten Ergebnisse treffen.

4. Methodik

4.3 Untersuchungsraum und Systemgrenzen

An dieser Stelle sollen der Untersuchungsraum beschrieben sowie die systemischen und methodischen Grenzen definiert werden. Diese Festlegung von Untersuchungsraum und Systemgrenzen gibt dem Betrachter die nötigen Informationen, damit dieser für sich nachvollziehen kann, ob alle aus seiner Sicht relevanten Einflussgrößen hinreichend berücksichtigt sind. Auf dieser Grundlage ist es ihm möglich, die gewonnenen Ergebnisse als glaubhaft zu bewerten oder zu verwerfen. Gleichzeitig dient die Definition der Systemgrenzen dazu, den zeitlichen Aufwand für die Berechnung jedes einzelnen Simulationsdurchlaufs auf einen vertretbaren Rahmen zu beschränken. Die Simulation soll ja gerade dadurch eine hohe Aussagekraft erhalten, dass sie viele tausendmal mit verschiedenen Rahmenbedingungen durchlaufen wird. Hierzu müssen die einzelnen Modellierungen sinnvoll begrenzt werden, damit der ohnehin große Rechenaufwand nicht noch zusätzlich durch einen zu hohen Detaillierungsgrad unnötig vervielfacht wird.

4.3.1 Definition des Untersuchungsraums

Zunächst zur Begrenzung des Untersuchungsraumes: Innerhalb dieses werden alle kritischen Abweichungen von der Normal-Situation betrachtet. Grundsätzlich sind erst einmal alle Vorgänge, die zu Personenschäden führen oder bei denen die Wahrscheinlichkeit dafür gegenüber der Normalsituation deutlich ansteigt, Teil des Untersuchungsraums. Die Abbildung 29 verdeutlicht dies noch einmal grafisch. Konkret bedeutet dies, dass zunächst Abstürze, die das typisch Bild eines Flugzeugunfalls und somit eines Schadensereignisses darstellen, Teil des Untersuchungsraums und dadurch Untersuchungsgegenstand sind. Diese erfolgen zumeist beim Landen, oft auch kurz nach dem Start und selten auf freier Strecke (Kapitel 2.2.2).

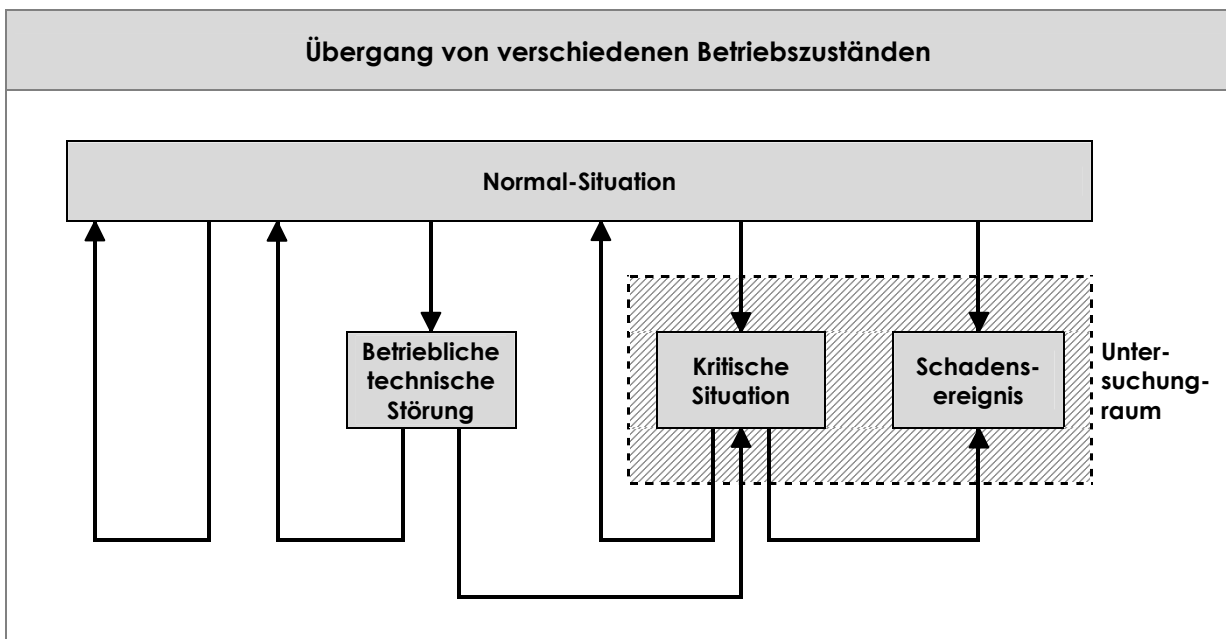


Abbildung 29: Übergang von verschiedenen Betriebszuständen

4. Methodik

In der Regel werden auch solche Ereignisse als Flugzeugunfall und damit als Abweichung von der Normalsituation verstanden, bei denen das Flugzeug im Rollverkehr oder auf Position zu Schaden kommt. Daneben existiert jedoch noch eine Reihe weiterer Einsatzlagen, die nicht in diesen Ereignissen enthalten sind. Es sind eben jene Lagen, die mit kleinen und zuweilen unscheinbaren Ereignissen beginnen und aus denen sich erst durch falsches oder zu spätes Handeln große Schäden entwickeln, die dann als Unfälle bezeichnet werden.

Ein sehr anschauliches Beispiel ist ein Fahrwerksbrand, der nach einem Startabbruch durch überhitzte Bremsen entsteht. Vor dem Brandausbruch und auch noch zu Beginn des Fahrwerkbrandes besteht keine direkte Gefahr für die Passagiere, die sich alle noch gesund und unverletzt an Bord befinden. Wird die Flughafenfeuerwehr rechtzeitig alarmiert, kann sie den Schaden in kurzer Zeit beheben. Ein Fahrwerksbrand lässt sich mit zwei Mann in wenigen Minuten „per Hand“ löschen, ohne dass eines der großen Flughafenlöschfahrzeuge zum Einsatz kommt. Ohne Löschmaßnahmen kann sich der Schaden jedoch schnell ausbreiten. Wenn die Hydraulikleitungen der Brandeinwirkung nicht mehr standhalten, kommt es bei Freisetzung des Hydrauliköls schnell zu einer massiven Erhöhung der Brandlast. Da sich die Hauptfahrwerke direkt unter der Kabine befinden, kann es durch eine Brandausweitung nun sehr schnell zu einer Gefährdung der Passagiere kommen. Obwohl also zu Beginn bereits eine Schadenslage eingetreten ist, kann sich das Ausmaß des Schadens je nach Verlauf stark unterscheiden. Um eine Verschärfung der Gefahrenlage zu vermeiden, ist ein schnelles Eingreifen der Flughafenfeuerwehr geboten. Als Konsequenz daraus müssen auch Zwischenfälle und technische Unregelmäßigkeiten in die Untersuchung einbezogen werden, die klein beginnen, aber zu großen Schäden führen können.

Ein ähnliches Beispiel stellt der Schwelbrand dar, z. B. hervorgerufen durch einen Kurzschluss. Hier hat kein „klassischer“ Flugzeugunfall stattgefunden. Es liegt lediglich eine geringfügige technische Störung vor und das Flugzeug kann sich sogar noch - vermeintlich sicher - am Boden befinden. Trotzdem kann es durch die Entstehung von hoch toxischem Brandrauch schnell zu einer akuten Gefährdung der Passagiere kommen. Hier sei an den Fall der Saudia im Jahr 1980 [Richter et al. 1997, S. 268f.] erinnert, bei dem über 300 Personen ums Leben kamen, ohne dass es einen „richtigen“ Unfall gegeben hat (Kapitel 5.2.4.5).

Auch angekündigte Notlandungen in Folge einer technischen Störung, bei denen nicht vorhersehbar ist, ob es im weiteren Verlauf zu einer Schadenslage kommt, werden hier dazugezählt. Oft kann das schnelle und effektive Eingreifen der Flughafenfeuerwehr die Gefahr vollständig abwenden. Ein sehr anschauliches Beispiel hierfür ist die Notlandung einer Fokker 100 am Stuttgarter Flughafen am 14. September 2009, die vor der Landung technische Probleme mit einem Fahrwerk feststellte. Besondere mediale Bedeutung erlangte das Ereignis, da sich der ehemalige Vizekanzler und Bundesminister Franz Müntefering an Bord der Maschine befand und das Flugzeug weit sichtbar eine Rauch- und Flammenwolke hinter sich her zog. Da der Pilot die Maschine beim Landen auf der Bahn halten konnte und die Flughafenfeuerwehr unverzüglich die richtigen Maßnahmen ergriff, verlief der Einsatz erfolgreich, ohne dass es zu Personenschäden kam [FSF o. J.b und Augenzeugen].

4. Methodik

Im Gegensatz dazu werden Flugzeugunfälle, die bereits bei der Entstehung einen Totalverlust darstellen, oder Ereignisse, die aufgrund der räumlichen Entfernung das Eingreifen von Einsatzkräften ausschließen, nicht betrachtet, kann hier doch ein noch so großes Aufgebot an Einsatzkräften nichts mehr ausrichten. Aus dieser Überlegung heraus ergibt sich die folgende Darstellung.

Relevanz von Einsatzlagen in Abhängigkeit von Ereignis und Standort				
		Standort		
		on/near Airport		off Airport
		Notlandung, angekündigte	Ereignis, nicht angekündigtes	
Ereignis	Aussichtsloses Ereignis (Unfall mit Totalverlust)	Kein relevantes Ereignis	Kein relevantes Ereignis	Kein relevantes Ereignis
	Normaler / schwerer Unfall	Relevantes Ereignis	Relevantes Ereignis	Kein relevantes Ereignis
	Zwischenfall o. techn. Unregelmäßigkeit mit Schadenspotenzial	Relevantes Ereignis	Relevantes Ereignis	Kein relevantes Ereignis
	Ungefährliche Unregelmäßigkeiten oder Betriebsstörungen	Kein relevantes Ereignis	Kein relevantes Ereignis	Kein relevantes Ereignis

Die grau hinterlegten Ereignisse sind im Untersuchungsraum enthalten

Tabelle 7: Relevanz von Einsatzlagen in Abhängigkeit von Ereignis und Standort

Die Prüfung, welche Ereignisse im Rahmen der vorliegenden Aufgabenstellung relevant sind, erfolgt anhand zweier Kriterien. Dies sind zum einen die Schwere des Ereignisses und zum anderen der Schadensstandort. Da die Leistungsfähigkeit der Einsatzkräfte im Fokus der Betrachtung steht, werden alle Ereignisse ausgeschlossen, bei denen ein erfolgreiches Eingreifen der Einsatzkräfte nicht möglich bzw. nicht sinnvoll ist.

- **Standort – off Airport**

Von der Betrachtung generell ausgeschlossen sind Ereignisse, bei denen sich der Schadensstandort zu weit vom Flughafen entfernt befindet.

4. Methodik

Es werden daher nur Ereignisse untersucht, die dem Kriterium „on/near Airport“ entsprechen, die also auf dem Flughafen oder in direkter Nähe stattfinden, so dass ein Eingreifen der Einsatzkräfte noch möglich und nutzbringend ist.

▪ **Ereignis – Totalverlust**

Ebenso werden alle Ereignisse von der Betrachtung ausgeschlossen, bei denen ein Unfall mit einem sofortigen Totalverlust verbunden ist. Beispiele hierfür wären ein ungebremster Absturz aus großer Höhe mit einer vollständigen mechanischen Zerstörung oder ein Unfall, bei dem das Flugzeug unmittelbar beim Eintreten explodiert.

In Abgrenzung hierzu muss noch Folgendes angemerkt werden. Totalverluste sind insofern Bestandteil der Untersuchung, wenn sie sich infolge der Einsatzabläufe ergeben. Wenn also der Totalverlust erst im Verlauf der Einsatzdauer eintritt, ist dieser Fall sehr wohl Bestandteil der Untersuchung. Ebenfalls ausgeschlossen sind des Weiteren alle Fälle, die nur Störungen der Betriebsabläufe zur Folge haben, ohne dass eine Gefährdung der Passagiere besteht oder unmittelbar daraus entstehen könnte.

4.3.2 Von der Betrachtung ausgeschlossene Einzelaspekte

Neben der grundlegenden Festlegung des Untersuchungsraums werden die Systemgrenzen der Simulation des Weiteren durch den Ausschluss der folgenden, teils sehr speziellen Ereignisse oder Teilaspekte definiert:

▪ **Andere Luftfahrzeuge als Flugzeuge**

Es werden nur Unfälle mit Flugzeugen untersucht, die der kommerziellen zivilen Luftfahrt dienen. Die Betrachtung umfasst dementsprechend Luftfahrzeuge, die schwerer als Luft sind und ihren Auftrieb durch starre Tragflächen erzeugen. Alle anderen Arten von Luftfahrzeugen wie z. B. Hubschrauber, Zeppeline und Motorsegler werden nicht betrachtet. Wird die Abkürzung „LFZ“ (= Luftfahrzeug) verwendet, ist diese im Sinne von „Flugzeug“ zu verstehen.

▪ **Zeitgleicher Unfall von zwei Flugzeugen innerhalb der Einsatzdauer**

Die Wahrscheinlichkeit eines parallelen oder unmittelbar aufeinanderfolgenden Flugzeugunfalls ist extrem gering (vereinfacht abgeschätzt entspricht diese der bereits sehr geringen Eintrittswahrscheinlichkeit für einen Unfall im Quadrat). Zudem wird der Luftverkehr an einem Standort sofort nach dem Eintritt eines Unfalls eingestellt, so dass für das Auftreten eines solchen Ereignisses nur ein Zeitfenster von weniger als einer Minute zur Verfügung steht.

▪ **Abstürze ins Meer oder in andere Gewässer**

Mehrere Aspekte sprechen dafür, den Absturz eines Flugzeugs ins Meer oder in andere offene Gewässer nicht in dieser Arbeit zu berücksichtigen. Zunächst ist dieser Aspekt nur für einen sehr geringen Anteil an Flughäfen von Bedeutung. Zwar liegen auch große internationale Flughäfen am Meer (z. B. Hongkong, Singapur), aber der allergrößte Anteil an Flughäfen grenzt nicht unmittelbar an Gewässer.

4. Methodik

Die Betrachtung eines solchen Ereignisses würde zudem den Untersuchungsraum maßgeblich verschieben, da die Einsatzmittel für eine Wasserrettung die Aufwendungen für den „klassischen“ Brandschutz an Land deutlich übersteigen. Zwei Beispiele sollen dies kurz verdeutlichen:

- Die Flughafenfeuerwehr Singapur verfügt neben zwei Haupt- und einer Nebenfeuerwachen über eine Seerettungsbasis mit einem Hovercraft-Boot (!) und einem (Feuer-)Löschboot [CAAS o. J., S. 12ff.].
- Die Flughafenfeuerwehr Hongkong verfügt neben zwei Feuerwachen über zwei Seerettungsbasen. Die Ausstattung zur Wasserrettung ist bemerkenswert. So stehen insgesamt acht Schnellboote (diese übertreffen die deutschen „Mehrzweckboote“ mit ca. 50-100% an Größe und Kapazität) und zwei (Hochgeschwindigkeits-)Katamarane zur Verfügung. Letztere können jeweils bis zu 600 (!) Personen aufnehmen und besitzen eine eigene Landeplattform für Rettungshubschrauber [HKFSD o. J., S. 4ff.].

Ein weiterer Grund, die Wasserrettung von der Betrachtung auszuschließen, ist der Umstand, dass eine (Bruch-)Landung auf dem Wasser i. d. R. mit der Zerstörung des Flugzeugs verbunden ist. Abgesehen von der Notlandung eines Airbus A320 auf dem Hudson-River am 15. Januar 2009 [FSF o. J.b] und der Bruchlandung einer Boeing 737 vor Bali am 13. April 2013 [FSF o. J.b] ist kein Fall bekannt, bei dem eine Landung auf einem Gewässer mit einem größeren Zivilflugzeug erfolgreich verlaufen ist.

▪ **Absturz eines Flugzeugs in die Feuerwache oder in die im Bereitstellungsraum stehenden Einsatzkräfte**

Der Fall, dass ein Flugzeug in die Feuerwache oder in die im Bereitstellungsraum stehenden Einsatzkräfte stürzt, wird nicht betrachtet. Die Wahrscheinlichkeit hierfür darf als derart gering angenommen werden, dass dieses spezielle Szenario als nicht signifikant bewertet wird. Zwei Überlegungen führen zu dieser Schlussfolgerung:

- Erstens ist in der Literatur kein Unfall bekannt, bei dem sich ein solcher Vorfall ereignet hat (dies ist jedoch ein mathematisch unscharfes Kriterium).
- Zweitens findet sich im Airport Service Manual der ICAO eine Auswertung der Unfalleintrittsstandorte bezogen auf das Start- und Landebahnsystem [ICAO 1990, S. 36]. Hier zeigt sich, dass ein seitliches Verlassen der Start- und Landebahn bzw. der An- und Abflugsrichtung nur selten stattfindet und der seitliche Versatz bezogen auf die Entfernung zudem auch äußerst gering ausfällt, so dass eine Gefährdung der Einsatzkräfte für die Simulation als irrelevant angesehen werden darf.

▪ **Militärische Flugzeuge**

Die vorliegende Arbeit will dazu beitragen, die eher vagen Anforderungen der ICAO bezüglich Feuerwehrpersonals (Brandschutz- und Rettungspersonal) zu präzisieren. Der Geltungsbereich der ICAO ist der zivile Luftverkehr. Militärische Flugzeuge sind dadurch automatisch per Definition nicht Bestandteil dieser Untersuchung.

4. Methodik

- **Flugzeuge mit zwei Passagierdecks**

Flugzeuge mit zwei Passagierdecks sind von der Betrachtung teilweise ausgeschlossen. Derzeit existieren nur zwei Flugzeugmuster (einschließlich deren Varianten) im Luftverkehr, und zwar die Boeing 747 sowie der Airbus A380.

Die Boeing 747 kann in der Simulation rechnerisch wie ein Flugzeug mit nur einem Passagierdeck behandelt werden, da die Anzahl der Sitzplätze im oberen Passagierdeck (ausschließlich „First-Class-Plätze“) derart gering ist, dass diese eine vernachlässigbare Größenordnung darstellt. Hier sind also streng genommen nur die Evakuierung und Rettung aus dem oberen Passagierdeck aus der Untersuchung ausgeschlossen. Der Airbus A380 wird von der Betrachtung ausgeschlossen, da er derzeit das einzige reguläre Passagierflugzeug der Kategorie 10 darstellt. Wenn sich die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit als geeignetes Werkzeug für die Praxis bewähren, sollte die Simulation auf jeden Fall noch um Flugzeuge mit zwei Passagierdecks erweitert werden.

- **Medizinisch-soziale Versorgung**

Die medizinisch-soziale Versorgung außerhalb des Gefahrenbereichs bzw. die sich nach der Rettung von Menschen anschließenden Maßnahmen sind nicht Bestandteil der Untersuchung. Es wird angenommen, dass ausreichend Personal für diese Aufgaben zur Verfügung steht.

4.3.3 Risikoanalyse als Grundstein der Entscheidungsfindung

Es sei noch angemerkt, dass Risikoanalysen gleich welcher Art kein „Allheilmittel“ sind. Die wesentliche Begrenzung der Risikoanalyse liegt nicht in ihrer eigentlichen Anwendung, sondern vielmehr in der Verwendung der erzielten Ergebnisse. Zwar lassen sich Eintrittswahrscheinlichkeiten sowie Schadensverläufe und -höhen abschätzen und darstellen, dies entbindet den Betrachter jedoch nicht von der Aufgabe, darüber nachzudenken, welche Risiken tolerabel und welche Kosten für deren Vermeidung akzeptabel bzw. sinnvoll sind. Die erzielten Ergebnisse bedürfen daher immer einer Interpretation und Bewertung. Jede erdenkliche menschliche Tätigkeit ist mit Risiken behaftet. Welche davon die Gesellschaft bereit ist zu tragen, ist abhängig vom öffentlichen Konsens und unterliegt damit durchaus auch dem Wandel der Zeit.

Nichtsdestotrotz kann an dieser Stelle festgehalten werden, dass Risikoanalysen trotz der vorgenannten Einschränkungen ein sehr geeignetes Mittel darstellen, um objektive Aussagen über Gefahrenpotenziale zu treffen, Gefahrenschwerpunkte zu identifizieren und Schutzmaßnahmen zu bewerten. Insbesondere bei bekannten Technologien und Verfahren wie dem Luftverkehr können präzise Ergebnisse erzielt und somit objektive Entscheidungshilfen zur Verfügung gestellt werden.

5. Simulation

Im Folgenden wird dargestellt, wie die in Kapitel 4 formulierte Methodik im Rahmen der Simulation konkret umgesetzt wird. Zunächst werden das zeitliche und das räumliche Raster erläutert. Diese beiden Grundstrukturen bilden die Voraussetzung für die Anwendung von zellulären Automaten. Danach werden die dynamischen Elemente, also Passagiere, Einsatzkräfte sowie Feuer und Rauch, beschrieben. Als nächstes folgt die Erörterung der statischen Elemente (Parameter), die die Unfallszenarien und die Umgebungsbedingungen definieren. In diesem Zusammenhang sei angemerkt, dass es analog zur Systematik der Computersimulation hierbei naheliegend wäre, zunächst die statischen Elemente und danach die dynamischen Elemente zu beschreiben. Da aber die statischen Elemente Auswirkungen auf die dynamischen Elemente haben, sollen letztere zur besseren Verständlichkeit zuerst eingeführt werden. Anschließend finden sich Überlegungen zur Modellierung paralleler Abläufe, die mit Hilfe eines Computers tatsächlich nur hintereinander berechnet werden können.

Grundsätzlich sei an dieser Stelle zudem angemerkt, dass das Thema Brandschutz und Menschenrettung im Luftverkehr nur einen sehr speziellen Aufgabenbereich im weiten Spektrum sowohl des Feuerwehrwesens als auch des Luftfahrtwesens darstellt. Da das Wissen hierüber sehr verstreut ist und nur punktuell Erfahrungen aus realen Ereignissen vorliegen, ist eine große Anzahl an Expertengesprächen mit Fachleuten notwendig, um sich der Problematik auf angemessene Art anzunähern [Auflistung der wichtigsten Gesprächspartner siehe unter Verzeichnisse und Quellennachweise, Abschnitt V.]. Da oftmals dennoch keine ausreichende Datenbasis erreicht werden kann, werden für viele Werte Annahmen getroffen, die auf Einschätzungen und einzelnen Erfahrungswerten basieren.

5.1 Raster

Um die Methodik der zellulären Automaten anwenden zu können, ist eine zeitliche sowie eine räumliche Rasterung erforderlich, die eine Beschreibung des Gesamtereignisses mittels der Beschreibung der Zustände der einzelnen Zellen als diskrete Elemente erlaubt. Die nachfolgend beschriebene Rasterung wird bei der Realisierung der Computersimulation verwendet.

5.1.1 Zeitliches Raster

Die Berechnung der jeweils aktuellen Lage wird in der Simulation in Halbminutenschritten durchgeführt. Eine Zeiteinheit beträgt somit 0:30 Minute. Dies bedeutet zwar einen sehr hohen Rechenaufwand, da sich die Einsatzdauer bei Großschadenslagen wie z. B. bei Flugzeugabstürzen über mehrere Stunden erstrecken kann, die kurzen Zeitintervalle sind jedoch Voraussetzung für eine realitätsnahe Darstellung der Abläufe. Das Halbminutenraster ergibt sich fast zwangsläufig aus den kurzen Zeitfenstern einiger relevanter Vorgänge:

- Die Eingreifzeit der Flughafenfeuerwehr ist mit einer Höchstzeit von 2:00 bzw. 3:00 Minuten (4 bis 6 Zeiteinheiten) festgeschrieben (Kapitel 2.3.3).

5. Simulation

- Die Widerstandsdauer der Außenhaut eines Flugzeugs bei großflächiger, direkter Beflammung liegt nur unwesentlich darüber (hieraus erklären sich auch die geringen Werte für die Eingreifzeit Flugzeuge müssen bei voller Besetzung durch die Hälfte der verfügbaren Türen innerhalb von 90 Sekunden (3 Zeiteinheiten) komplett evakuierbar sein).
- Die Zeitdauer bis zum Verlust des Bewusstseins bei Einwirkung von im Brandrauch enthaltenen Atemgiften beträgt je nach Konzentration nur wenige Minuten bis Augenblicke (Kapitel 5.2.4.5).
- Die Überlebenschance bei schwersten Verletzungen ändert sich im kritischen Bereich minütlich (Kapitel 5.2.1.4).
- Damit auch Einsätze, die sich über einen längeren Zeitraum erstrecken, noch mit vertretbarem Rechenaufwand bewältigt werden können, sollte das zeitliche Raster nicht noch enger gewählt werden.

Wie die angeführten Beispiele zeigen, gibt es viele Abläufe und Vorgänge, bei denen innerhalb kurzer Zeit - also in einer Zeitspanne von einer halben Minute bis zu wenigen Minuten - große und entscheidende Veränderungen stattfinden können. Es ist daher sinnvoll, die gesamten Abläufe halbminütlich zu berechnen, wenn eine realitätsnahe Wiedergabe der Abläufe der Ereignisse Ziel der Simulation ist. Eine kleinere Taktung verspricht demgegenüber keine signifikante Verbesserung der Ergebnisse sondern führt lediglich zu einem deutlich höheren Rechenaufwand.

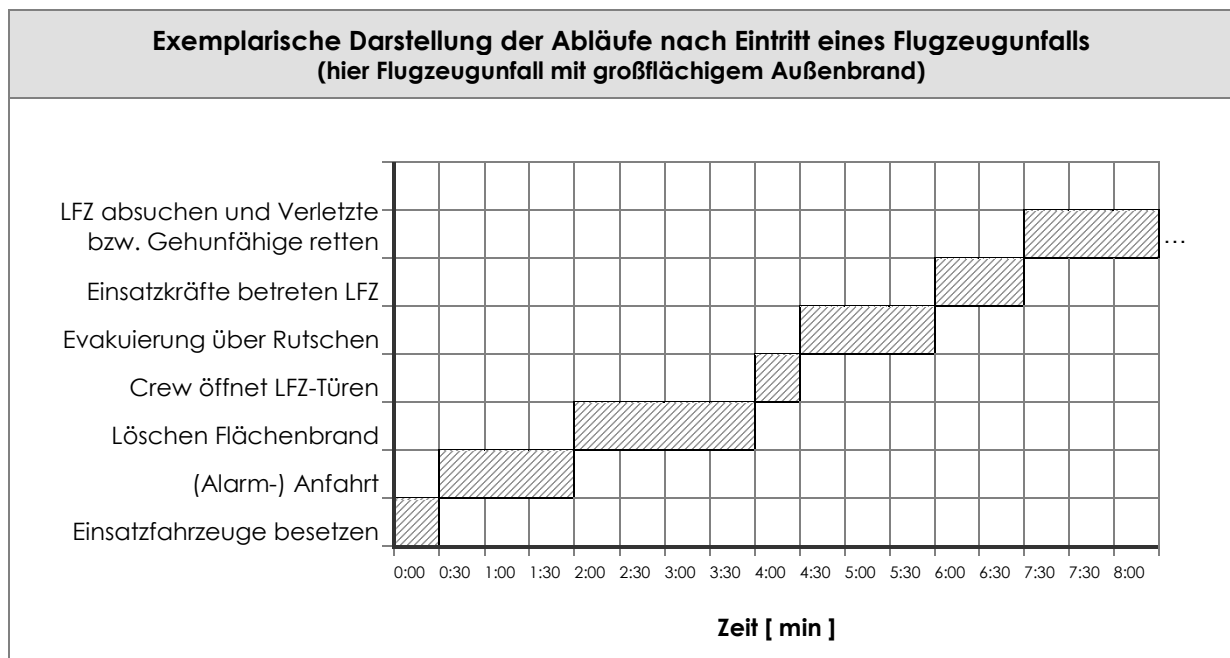


Abbildung 30: Exemplarische Darstellung der Abläufe nach Eintritt eines Flugzeugunfalls

5. Simulation

5.1.2 Räumliches Raster

Das Flugzeug ist das zentrale Objekt aller Schadensszenarien. Es dient als „Schauplatz“, in dem und um den herum sich im Folgenden alle weiteren Handlungen und Ereignisse „abspielen“. Insofern kommt dem räumlichen Raster des Flugzeugs im Simulationsmodell eine besondere Bedeutung zu, soll dieses doch einerseits die in der Realität tatsächlich existenten Gegebenheiten bestmöglich abbilden und dabei im Sinne eines Modells gleichzeitig „programmiertechnisch handhabbar“ bleiben. Zu Beginn wird an dieser Stelle auf grundsätzliche Faktoren wie Flugzeugdaten sowie die Modellierung des Unfallflugzeugs eingegangen, um die Rahmenbedingungen sowie Annahmen und Vereinfachungen für die räumliche Rasterung des Flugzeugs aufzuzeigen. Daran schließt sich die Beschreibung der konkreten räumlichen Raster für Außen- und Innenflächen an.

5.1.2.1 Rahmenbedingungen der Flugzeugmodellierung

a) Flugzeugdaten

Für die Dimensionierung von flugtechnischen Einrichtungen legt die ICAO verbindliche Mindeststandards fest (z. B. Länge und Breite der Start- und Landebahn aber auch - wie schon ausgeführt - die erforderliche Mindestmenge an Löschmittel für den Flugzeugbrandschutz). Die Basis für die Dimensionierung bildet i. d. R. das Bemessungsflugzeug. Auch für die Simulation wird als Ausgangspunkt ein Flugzeugtyp gewählt, an dem dann im weiteren Verlauf die Leistungsfähigkeit der Einsatzkräfte gemessen wird. Hier sind drei Varianten denkbar:

- **Bemessungsflugzeug**

Es wäre zunächst naheliegend, für die Berechnungen in der Simulation ebenfalls das Bemessungsflugzeug des jeweiligen Flughafens analog der sonstigen Dimensionierungen zugrunde zu legen.

- **Musterflugzeug**

Eine Alternative wäre auch, für jeden Flughafen die Anzahl der Flugbewegungen pro Flugzeugklasse zu ermitteln. Mit Hilfe dieser Daten lässt sich dann ein fiktives, aber durchschnittlich bemessenes Musterflugzeug errechnen, das angibt, welche Flugzeugklasse bei einem durchschnittlichen Unfall zu erwarten ist.

- **Flottenmix**

Eine weitere Möglichkeit besteht darin, den aktuellen Flottenmix zu betrachten und die Flugzeugklassen, die den jeweiligen Flughafen anfliegen, zu ermitteln (wie auch schon bei „Musterflugzeug“) und diese Werte dann als Wahrscheinlichkeitsverteilung in der Simulation zu verwenden. Hierdurch entsteht ein zusätzlicher Parameter, der Unfälle mit verschiedenen Flugzeugtypen erzeugt und somit den Flottenmix auch in Schadensfällen real abbildet.

5. Simulation

Für die Modellierung der Simulation sind die oben angestellten Überlegungen von nachrangiger Bedeutung, da die programmiertechnische Umsetzung die freie Wahl eines Flugzeugmusters ermöglicht. Damit sind sowohl die Varianten „Bemessungsflugzeug“ als auch „Musterflugzeug“ gleichermaßen möglich. Im Vorgriff auf die anschließende Ausführung sei bereits an dieser Stelle angemerkt, dass die Zahl der Flugzeugklassen in der Simulation auf vier Klassen reduziert wird. Damit ist die Bandbreite des Parameters „Flottenmix“ stark eingeschränkt. Da aber Flughäfen jeweils eine eigene Zielgruppe im Marktsegment Luftverkehr haben (Regional-, Kontinental oder Interkontinentalverkehr / Passagier- oder Frachtverkehr), unterscheidet sich der jeweilige Flottenmix. Dieser lässt sich daher oft mit einer oder zwei Flugzeugklassen (von den vier in der Simulation verfügbaren) abbilden. Somit liegen die drei denkbaren Varianten in der Simulation teils nahe beieinander oder sind sogar identisch.

Die Entscheidung, ob der Berechnung mit dem Bemessungsflugzeug das größte mögliche Schadensausmaß, mit dem Musterflugzeug ein Durchschnittswert oder mit einer (vereinfachten) Verteilungsfunktion der Flottenmix zugrunde gelegt wird, obliegt dem Anwender. Die rechnerische Ermittlung der Ergebnisse findet in allen drei Fällen in gleicher Weise statt. Von erheblicher Bedeutung ist diese Entscheidung jedoch bei der Interpretation der Ergebnisse und der Diskussion, welches Maß an Sicherheit angestrebt werden soll.

b) Klassifizierung der Flugzeugtypen

Die Flugzeugklassen unterscheiden sich hinsichtlich ihrer Größe (Länge, Spannweite, Rumpfdurchmesser), Triebwerkanzahl, der Türanzahl sowie der Anzahl an Gängen und Sitzplätzen in der Kabine. Auch die Menge an Treibstoff ist natürlich von der Größe bzw. der Klasse des Flugzeugs abhängig. Hierbei interessiert jedoch nicht das reine Tankvolumen. Vielmehr ist von Bedeutung, welche Fläche mit der jeweils vorhandenen Menge in Vollbrand versetzt werden kann (Kapitel 5.2.4). Demnach wäre eine denkbare, aber sehr arbeitsintensive Möglichkeit, alle gängigen Flugzeugmuster mit den genannten Kenngrößen in die Simulation einzupflegen. Der hierzu notwendige Aufwand steht jedoch in keinem Verhältnis zu der hieraus zu erzielbaren Verbesserung der Genauigkeit der Aussage der Simulation. Vereinfacht werden die Flugzeuge stattdessen in vier Klassen eingeteilt. Dabei wird offensichtlich nicht die übliche Einteilung nach ICAO in eine der zehn Kategorien vorgenommen. Die Kategorien der ICAO dienen in erster Linie dazu, die notwendigen Mindestmengen an Löschmittel zu bestimmen. Der Schwerpunkt der Betrachtungen dieser Arbeit liegt jedoch auf den Einsatzkräften und den Passagieren. Die entscheidende Schlüsselgröße bei Flugzeugen ist in diesem Zusammenhang die Anzahl und Lage der Türen, da sie den Passagieren das Verlassen des Flugzeugs und den Einsatzkräften das Betreten für Lösch- und Rettungsmaßnahmen erlauben. Da nahezu alle Passagierflugzeuge über zwei bis fünf Türen verfügen, kann die hier vorgenommene Einteilung in vier Flugzeugklassen als ausreichend und zweckdienlich angesehen werden. Eine Ausnahme bilden die Boeing 747 und der Airbus A380, die über ein zweites - oberes - Passagierdeck verfügen.

5. Simulation

Bei der Boeing 747 befinden sich dort die „First-Class-Plätze“, die jedoch im Verhältnis zur Gesamtzahl der Passagiere eine so geringe Anzahl ausmachen, dass sie vernachlässigbar sind. Der Airbus A380 ist wie in Kapitel 4.3 ausgeführt von der Betrachtung ausgeschlossen. Eine differenziertere Einteilung der Flugzeuge gemäß der ICAO würde also zu einem komplizierteren Modell führen, ohne für den Haupt Gesichtspunkt zusätzliche Erkenntnisse zu bringen. Es sei an dieser Stelle angemerkt, dass die Festlegung der Mindestlöschmittelmengen nach ICAO lediglich auf der Annahme eines einzigen, streng definierten Schadensszenarios beruht und daher durchaus skeptisch hinterfragt werden darf.

Klassifizierung von Flugzeugen für die Simulation								
Flugzeug- klasse in der Simulation	entspricht der Flughafen- Kat. gem. ICAO *1	Länge [m]	Spann- weite [m]	Trieb- werke *2 []	Türen pro Seite		Gänge []	Brand- fläche, außen *3 [m ²]
					Passagiere []	Fracht []		
1	6	20	29	2	2	1	1	972
2	7	42	41	2	3	2	1	2.160
3	8	54	55	4	4	2	2	3.780
4	9	66	67	4	5	2	2	4.536

Tabelle 8: Klassifizierung von Flugzeugen für die Simulation

- *1 Mit einer Entsprechung der Flughafenkategorien 6 bis 9 erfasst die Simulation alle relevanten Flughafengrößen, wie der Vergleich mit den deutschen Flughäfen in Tabelle 2 zeigt.
- *2 Bei Flugzeugen mit drei Triebwerken (z. B. „Tristar“) wird das einzelne Hecktriebwerk wie ein APU („auxiliary power unit“, dt. Hilfstriebwerk, das zur Stromerzeugung an Bord verwendet wird) behandelt. Daher wird nur zwischen zwei und vier Triebwerken unterschieden.
- *3 Es handelt sich um die Fläche, die im Außenbereich in Brand stehen kann. Es wird hierbei angenommen, dass die Fläche bzw. die vorhandene Menge an Treibstoff, die zu einem Vollbrand erforderlich ist, jeweils proportional zur Flugzeugklasse ist. Die Werte ergeben sich aus dem Vielfachen der Rasterflächen mit einer Größe von jeweils 108 m² (12 m x 9 m).

5.1.2.2 Flugzeugmodellierung in der Simulation

Für die vorliegende Anwendung wird ein dreidimensionales Raster gewählt. Die dritte Dimension (Höhe) kommt nur im Bereich des Flugzeugs zum Tragen. Eine weitere Besonderheit besteht darin, dass das Raster in manchen Bereichen (nämlich im Flugzeuginneren) nochmals kleinteiliger strukturiert wird. Dies ist erforderlich, da die Vorgänge im Flugzeuginneren komplexer sind als die jeweiligen im Freien.

5. Simulation

a) Rasterung der Außenfläche

Um den rechnerischen Aufwand in der Computersimulation zu begrenzen, wird für die Außenflächen ein relativ grobmaschiges Raster gewählt, das sich an den Rumpfsegmenten (mit Tür) des Flugzeugs orientiert. Die Außenfläche wird in Rechtecke mit einer Kantenlänge von 12 x 9 Metern eingeteilt. Diese Größe ergibt sich in der Längsrichtung aus der Zusammensetzung mehrerer Flugzeugsektoren zu Abschnitten mit jeweils einer Tür oder einem Notausstieg (Abbildung 32). Die Breite resultiert aus den möglichen Rumpfdurchmessern von Flugzeugen sowie den Forderungen, einerseits einer quadratischen Flächeneinteilung möglichst nahe zu kommen und andererseits die Fläche in ausreichend differenzierbare Felder einzuteilen. Die Außenfläche ist - wie bereits erwähnt - auf zwei Dimensionen beschränkt.

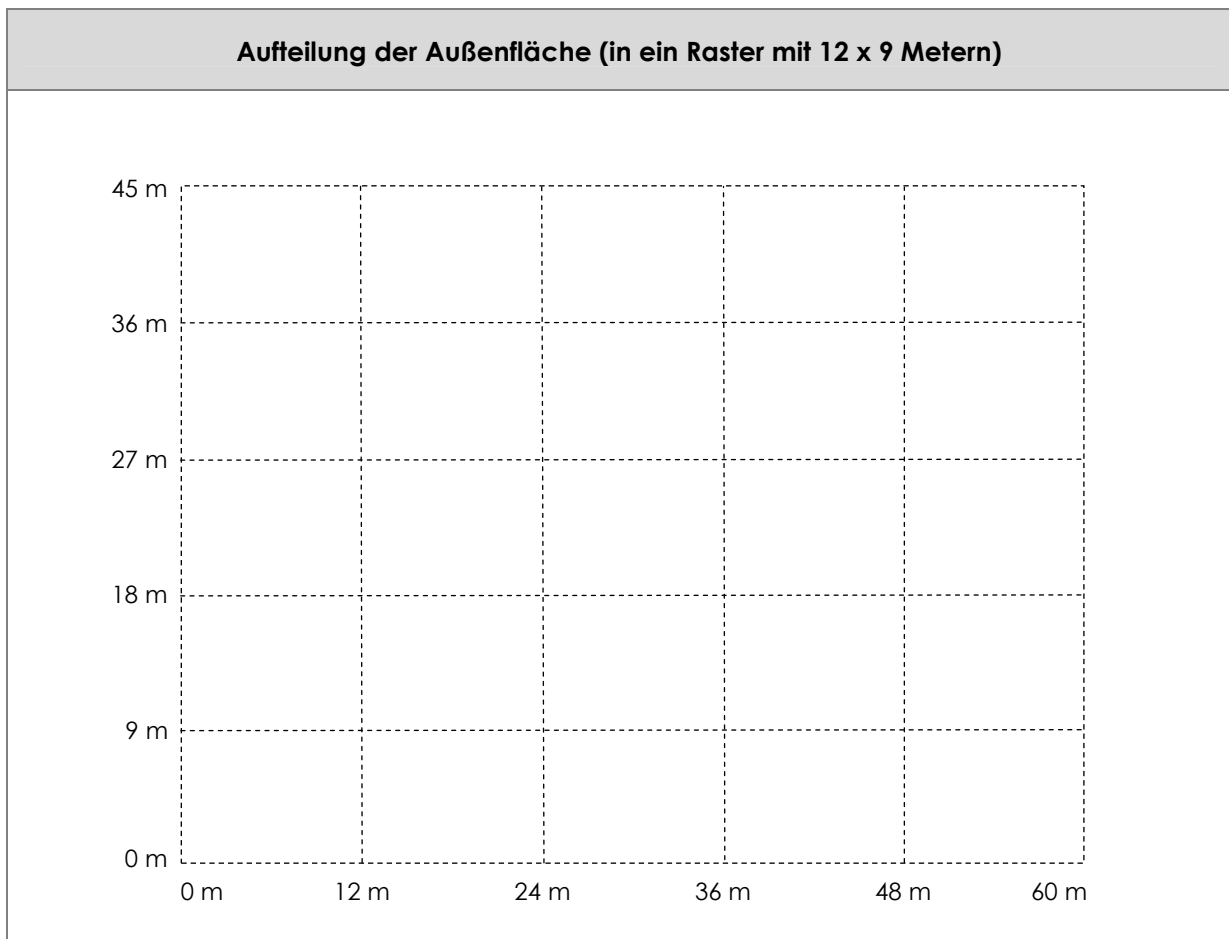


Abbildung 31: Aufteilung der Außenfläche

b) Rasterung der Innenflächen

Folgender schematischer Aufbau wird für den Innenraum aller Flugzeuge angenommen: Die Kabine wird in mehrere Abschnitte aufgeteilt. Die Anzahl der Abschnitte entspricht der Anzahl der Türen. Ein Abschnitt hat eine Länge von 12 Metern und wird wiederum in drei Sektoren geteilt.

5. Simulation

Dies erklärt sich aus der vorgegebenen Evakuierungszeit (90 Sekunden = 3 Zeiteinheiten) und der gewählten Zeittaktung für die Simulation: Da die Simulation in Halbminutenschritten durchgeführt wird, hat gemäß Vorgabe die Evakuierung in Notfällen innerhalb von drei Zeitschritten zu erfolgen. Die Passagiere, die durch eine Tür flüchten, können also in drei Gruppen eingeteilt werden, die jeweils in einer der drei Zeiteinheiten das Flugzeug durch die Tür verlassen. Die Sitzflächen der drei Passagiergruppen werden zu einem Sektor zusammengefasst. Zur Veranschaulichung eines Kabinenabschnittes dient die nachfolgende Abbildung.

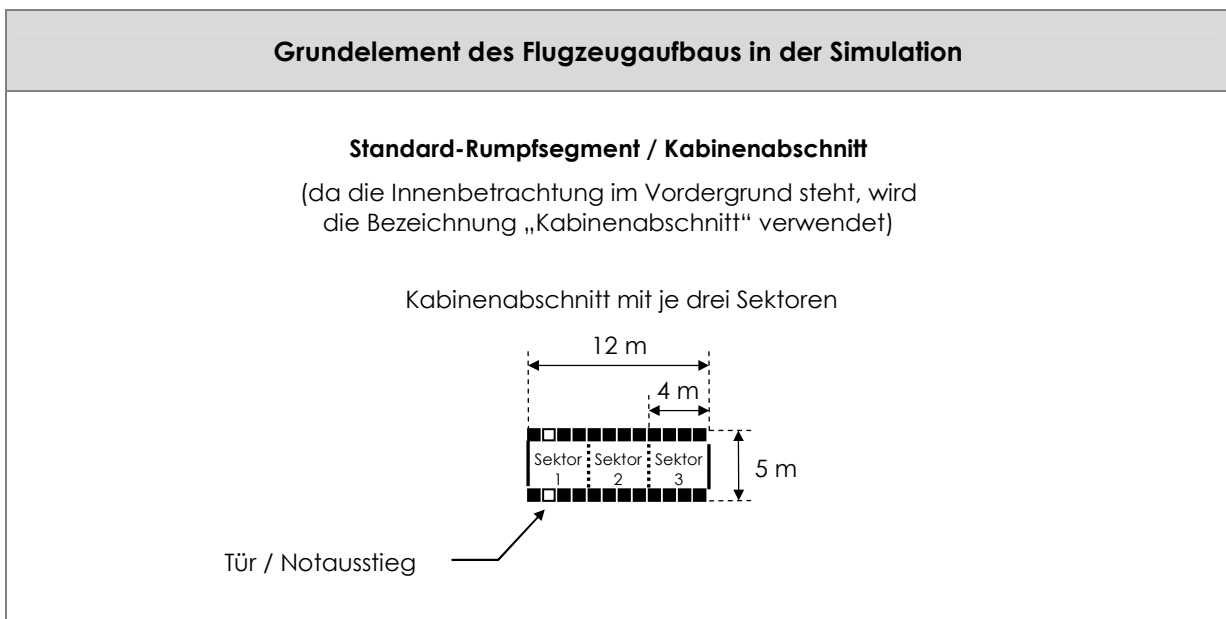


Abbildung 32: Grundelement des Flugzeugaufbaus in der Simulation

Eine Abweichung besteht hierbei jedoch für den Abschnitt der hintersten Tür. Er enthält nur einen einzigen Sektor. Diese Annahme ermöglicht es, den Aufbau der Flugzeuge in der Simulation nach dem unten abgebildeten Schema umzusetzen und dabei die Größe der gesamten Kabine skalierbar zu gestalten. Gleichzeitig lässt sich diese Annahme mit dem üblichen Evakuerverhalten von Menschen begründen. Üblicherweise flüchten Personen in Blickrichtung und in die Richtung, aus der sie gekommen sind. Beides spricht dafür, dass Personen im Flugzeug intuitiv nach vorne laufen, auch wenn sich der ihnen näher gelegene Ausgang in ihrem Rücken befindet.

c) Zusammenführung von Innen- und Außenraster

Führt man die Modelle von Innen- und Außenflächen zusammen, so ergibt sich daraus das folgende räumliche Raster. Die Größe der Tragfläche wird in Abhängigkeit von der Türanzahl definiert. Für jede Tür (pro Seite) wird die Tragfläche um ein Tragflächensegment vergrößert. Die Anzahl der Triebwerke wird ebenfalls in Abhängigkeit von der Türanzahl definiert (Tabelle 8). Flugzeuge mit zwei und drei Türen verfügen über zwei Triebwerke, Flugzeuge mit vier und fünf Türen über vier Triebwerke.

5. Simulation

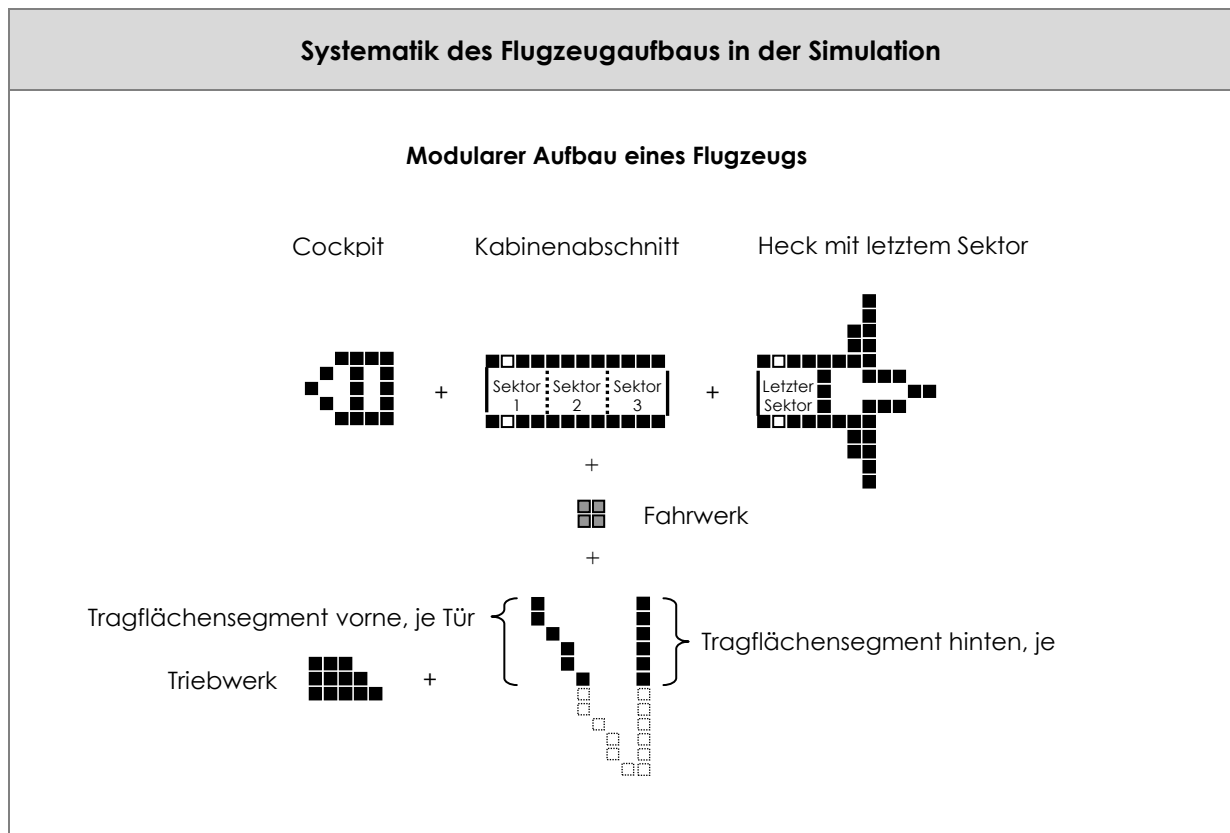


Abbildung 33: Systematik des Flugzeugaufbaus in der Simulation

Die Fahrwerke werden nicht differenziert betrachtet. Das Bugfahrwerk wird generell nicht betrachtet, da hierüber nur ein sehr geringer Teil des Gesamtgewichtes (in der Größenordnung von 10%) abgetragen wird [Boeing 2008, S. 89ff und Zollinger o. J.]. Die Hauptlast des Gewichtes ruht auf den Hauptfahrwerken. Folglich verwandeln die Bremsen der Hauptfahrwerke bei negativer Beschleunigung (Bremsvorgang) auch den größten Teil der kinetischen Energie in Wärme. Die Brandgefahr ist hier daher am größten.

Die Außenfläche, auf der sich das Flugzeug befindet, wird in Felder mit einer Größe von 12 x 9 Metern eingeteilt. Somit entspricht die Länge eines Feldes außen der Länge von drei Sektoren oder genau eines Kabinenabschnittes im Flugzeug.

Alle vier Flugzeugklassen der Simulation lassen sich aus den definierten Grundelementen zusammensetzen. Ein Flugzeug mit drei Türen (Abbildung 34) besteht somit aus Cockpit, zwei Abschnitten (mit jeweils drei Sektoren) und dem Heck. Hinzu kommen zwei Flügel. Je nach Größe verfügt das Flugzeug über zwei, drei oder vier Triebwerke. Durch den modularen Aufbau des Flugzeugs sowohl in der Berechnung als auch in der grafischen Darstellung ist es möglich, das gesamte Flugzeug in Abhängigkeit von der Türanzahl zu definieren und zu generieren.

5. Simulation

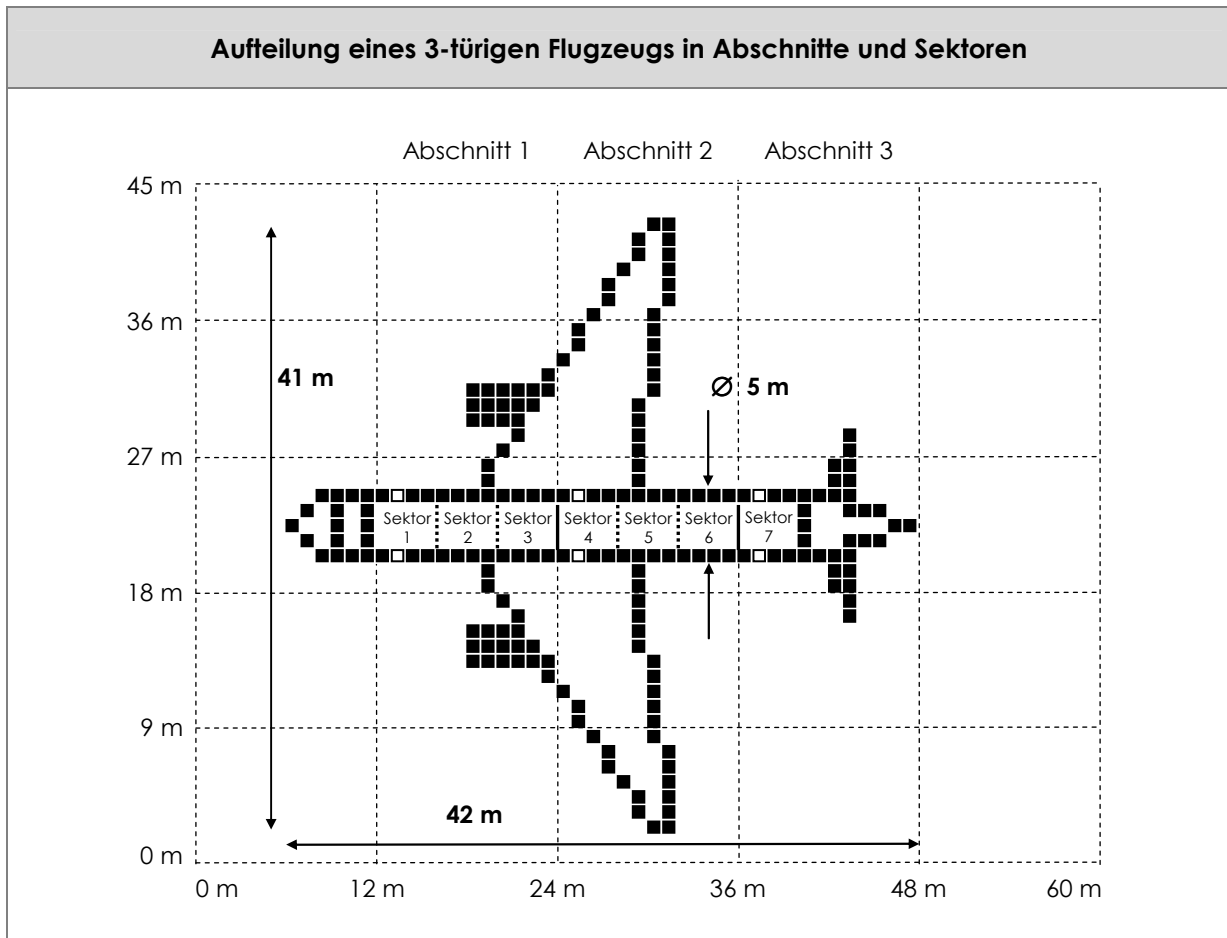


Abbildung 34: Aufteilung eines 3-türigen Flugzeugs in Abschnitte und Sektoren

Um die Proportionen näherungsweise real zu halten, wird bei Flugzeugen mit vier und fünf Türen der Rumpf um zwei Meter breiter dargestellt. Bei den meisten Berechnungen und Abläufen der Simulation ist dies ohne Bedeutung. Bei der Modellierung der Rettungsmaßnahmen hat die Breite des Rumpfes jedoch Einfluss darauf, ob sich die Einsatzkräfte bei ihren Arbeiten im Flugzeuginneren gegenseitig behindern. Für Flugzeuge mit vier und fünf Türen werden immer zwei Gänge zwischen den Sitzreihen angenommen, so dass sich die Einsatzkräfte besser im Flugzeug verteilen können. Genauer sind diese Zusammenhänge im Kapitel 5.2.2.3 beschrieben.

5. Simulation

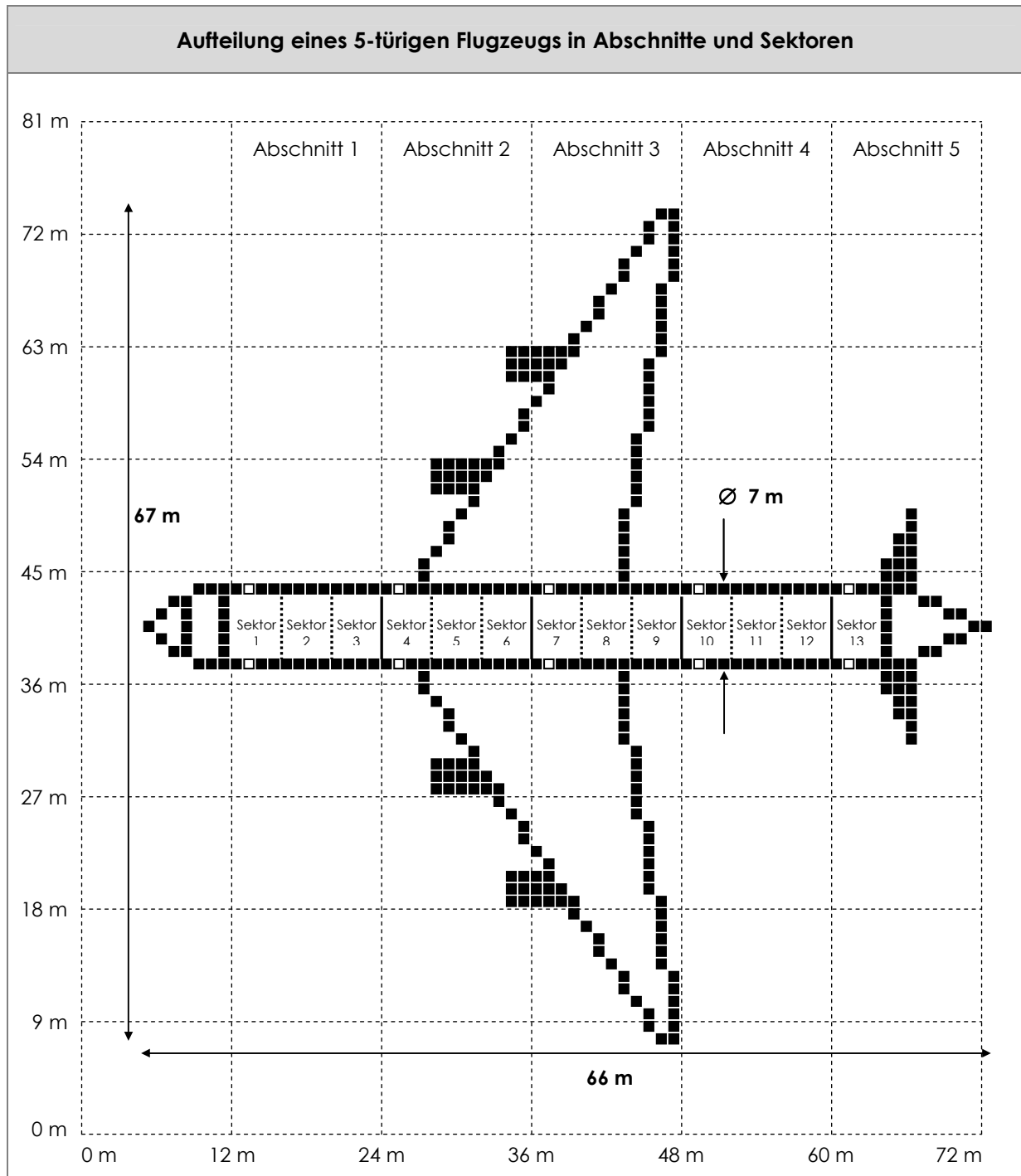


Abbildung 35: Aufteilung eines 5-türigen Flugzeugs in Abschnitte und Sektoren

Abbildung 35 zeigt den Aufbau eines Flugzeugs mit fünf Türen. Die Struktur des Aufbaus folgt auch hier der gleichen Systematik. Aus der Forderung nach fünf Türen ergeben sich vier Kabinenabschnitte und ein Heckabschnitt (mit Tür) sowie ein Cockpit und jeweils fünf Tragflächensegmente. Es fällt auf, dass der Rumpf breiter ist.

5. Simulation

d) Flugzeigtüren – Wahrscheinlichkeit für ein Öffnen und Entfluchtungskapazität

Die Türen stellen den entscheidenden begrenzenden Faktor bei der Evakuierung eines Flugzeugs dar. Um das Passieren der Türen in der Simulation realitätsnah zu modellieren, ist es erforderlich zu definieren, mit welcher Wahrscheinlichkeit eine Tür im Falle einer Evakuierung geöffnet werden kann. Ebenso muss ermittelt werden, wie viele Passagiere pro Zeiteinheit ein Flugzeug durch eine Tür verlassen können.

- **Wahrscheinlichkeit für das Öffnen von Flugzeigtüren**

Die Wahrscheinlichkeit, dass es der Crew oder den Passagieren gelingt, eine Tür zu öffnen, wird mit 85% angenommen. Im Umkehrschluss bedeutet dies, dass eine Tür bei einer Evakuierung mit einer Wahrscheinlichkeit von 15% nicht geöffnet wird. Diese Wahrscheinlichkeiten gelten aber nur für den Fall, dass ein Öffnen der Tür aufgrund der äußeren Lage (Stichwort „Außenbrand“) möglich ist. Konnte eine Tür nicht von innen geöffnet werden, so unternehmen die Einsatzkräfte hierfür beim Absuchen des Flugzeugs jeweils einen zweiten Versuch, um zusätzliche Zugangsmöglichkeiten bzw. Rauchabzugsöffnungen zu schaffen. Die Wahrscheinlichkeit, dass die Einsatzkräfte eine bis dato verschlossene Tür öffnen können, beträgt einmalig 50%. Hierfür wird eine Zeitdauer von 0:30 Minute (1 Zeiteinheit) benötigt. Neben den normalen Flugzeigtüren verfügen Flugzeuge noch über eine Frachttür (jeweils im 4. und im letzten Sektor). Dies muss von der Feuerwehr zur Bekämpfung von Bränden auf dem Frachtdeck von außen geöffnet werden. Der Vorgang des Öffnens benötigt in der Simulation 2:00 Minuten (4 Zeiteinheiten). Es wird angenommen, dass die Feuerwehr immer in der Lage ist, sich von Außen Zugang zum Frachtdeck zu verschaffen.

- **Entfluchtungskapazität**

Die bereits erwähnte Vorgabe der ICAO, wonach ein Flugzeug, bei dem nur die Hälfte aller Türen zur Verfügung steht, innerhalb von 90 Sekunden vollständig evakuiert sein muss, bietet zwar einen Anhaltspunkt, reicht aber nur für das simple Modell „Flugzeug in 90 Sekunden bzw. 3 Zeiteinheiten leer“ aus. Aus zwei Gründen ist diese Modellbildung jedoch nicht zufriedenstellend. Einerseits ist es durchaus möglich, dass eine größere Anzahl an Türen genutzt werden können, wodurch sich die Evakuierung beschleunigt, andererseits sind aber auch Szenarien denkbar, bei denen weniger als die Hälfte der Türen zur Verfügung stehen (z. B. wenn es auf einer Seite brennt und es an der dem Brand abgewandten Seite bei einer Tür nicht gelingt, diese zu öffnen). Die Entfluchtungskapazität von Flugzeigtüren soll daher eingehender erörtert werden, um eine genauere Modellierung vornehmen zu können. Jedes Flugzeugmuster muss im Rahmen seines Zulassungsverfahrens einzeln nachweisen, dass es den Anforderungen bezüglich der Evakuierung genügt. Es gibt keine Richtlinie, die für Flugzeigtüren eine Abhängigkeit zwischen Abmessung und Entfluchtungskapazität definiert, wie es beispielsweise im baulichen Bereich für Fluchtwege durch die Arbeitsstättenverordnung geregelt ist.

Es werden daher gebräuchliche Flugzeugmuster mit möglichst großer Maximalanzahl an Passagieren gewählt und bezüglich ihrer Tür- und Passagieranzahlen miteinander verglichen. Die Entfluchtungskapazität wird hierbei mit folgender Formel berechnet:

5. Simulation

$$k_{\text{Tür}} = \frac{\text{Pax}}{n_{\text{Tür}} \cdot t} \quad (11)$$

mit:

- $k_{\text{Tür}}$ - Entfluchtungskapazität je Tür $\left[\frac{\text{Passagiere}}{\text{Tür} \cdot 0 : 30 \text{ min}} \right]$
 Pax - Anzahl Passagiere [Passagiere]
 $n_{\text{Tür}}$ - Anzahl der Türen (auf einer Flugzeugseite) [Türen]
 t - Zeit (in Zeiteinheiten à 0:30 Minute) [0 : 30 min]

In Tabelle 9 sind die ermittelten Ergebnisse dargestellt. Es zeigt sich ein relativ einheitliches Bild. Die Flugzeuge der Klassen 3 und 4 (also 4- und 5-türige Flugzeuge) einschließlich des Airbus A380 (8 Türen) weisen annähernd eine gleiche Entfluchtungskapazität von knapp 31 bzw. knapp 32 Passagieren pro Tür und Zeiteinheit auf, wenngleich einige Spitzenwerte, insbesondere beim Airbus A380, der Boeing 747-400 und der MD11, auf einen noch höheren Wert hindeuten.

Entfluchtungskapazität von Flugzeigtüren					
Flugzeugklasse im Modell	Flugzeugmuster	Türen *1 (je Seite)	Passagiere, Maximalwert	Kapazität [Passagiere / Tür / 0:30 min]	Mittelwert [Passagiere / Tür / 0:30 min]
2	A319	3	159	17,7	19,6
	737-800	3	184	20,4	
	MD80 *2	2,75	172	20,8	
3	A330-300	4	335	27,9	30,6
	767-300 *3	3,5	299	28,5	
	DC10	4	380	31,7	
	MD11	4	410	34,2	
4	A340-600	5	440	29,3	30,4
	777-300	5	375	25,0	
	747-400 Dom.*4	6	568	31,6	
---	A380	8	853	35,5	

Tabelle 9: Entfluchtungskapazität von Flugzeigtüren

Quelle 1: Lufthansa 2002, S. 4ff
 Quelle 2: Luffahrt.net o. J.

*1 Notausstiegstüren werden rechnerisch mit 0,75 angesetzt, da sie aufgrund der geringeren Abmessungen nur über eine reduzierte Entfluchtungskapazität verfügen.

*2 Die MD80 verfügt über einen Notausstieg an der Tragfläche.

*3 Die 767-300 verfügt über zwei Notausstiege an der Tragfläche.

5. Simulation

*4 Die 747-400 (Version „Domestic“) verfügt über fünf Türen im unteren Passagierdeck und eine Tür im oberen. In der Simulation wird sie wie ein Flugzeug mit fünf Türen behandelt und in der Tabelle 9 der Flugzeugklasse 4 zugeordnet, da Flugzeuge mit Oberdeck von der Betrachtung ausgenommen sind (Kapitel 4.3). Zur Abschätzung der Entfluchtungskapazität von Flugzeugtüren werden jedoch alle sechs Türen in die Rechnung mit einbezogen.

Die Flugzeuge, die in der Modellierung in Klasse 2 zusammengefasst werden, verfügen mit knapp 20 Passagieren pro Tür und Zeiteinheit über eine deutlich geringere Entfluchtungskapazität. Dies steht jedoch nicht im Widerspruch. Grund hierfür ist schlicht die geringere Gesamtanzahl an Passagieren, für die diese Flugzeuge ausgelegt sind. Der Wert spiegelt daher nicht die Maximalkapazität der Türen wieder sondern einen rechnerischen Wert bei dem jeweiligen Flugzeugmuster.

Es sei angemerkt, dass es sich bei den im Zulassungsverfahren ermittelten bzw. verifizierten Werten um die maximalen Passagierzahlen handelt. Meistens schöpfen die Fluggesellschaften diesen möglichen Rahmen jedoch nicht voll aus. Durch die Bestuhlung mit einem 2- oder 3-Klassen-System wird der Maximalwert in der Regel deutlich unterschritten, für die Economy-Class mit ihrer platzsparenden Bestuhlung bleibt das Problem jedoch weitestgehend erhalten.

Insgesamt erscheint es jedoch fraglich, ob die hier ermittelten Werte eine realistische Leistungsfähigkeit wiedergeben. Insbesondere drei Aspekte berechtigen zu einer kritischen Haltung:

- Allen Beteiligten wissen, dass es sich um einen Evakuierungstest handelt, und warten darauf, im entscheidenden Augenblick sofort aus ihren Sitzen aufzuspringen, um das Flugzeug unverzüglich zu verlassen.
- Alle Testpersonen sind gesund, gut trainiert und im Vollbesitz ihrer geistigen Kräfte.
- Es befinden sich unter den Testpersonen keine Kinder, Behinderten oder Verletzten.

Ein Indiz dafür, dass eine Entfluchtung in 90 Sekunden über 50% der Türen wahrscheinlich nicht gelingen wird, ist der Flugzeugunfall eines Airbus A340-300 der Air France am 2. August 2005 in Toronto [Hahn 2005, S. 6]. Trotz günstiger Umstände (kaum Verletzte, keine Verrauchung der Kabine) dauerte die Evakuierung 120 Sekunden, obwohl (vermutlich) 6 der 8 Notausgänge benutzt wurden.

Aufgrund der oben genannten Aspekte wird für die Modellierung eine Entfluchtungskapazität angenommen, die um ein Viertel gegenüber den zuvor ermittelten Maximalwerten reduziert ist. Damit ergeben sich mit:

$$\frac{3}{4} \cdot 30,6 = 22,9 \approx 23$$

und

5. Simulation

$$\frac{3}{4} \cdot 30,4 = 22,8 \approx 23$$

eine Entfluchtungskapazität von 23 Passagieren pro Tür und Zeiteinheit. Da es sich um eine Abschätzung und nicht um eine präzise Ermittlung handelt, wird aus Gründen der Praktikabilität eine Entfluchtungskapazität von 24 (statt 23) verwendet, da dieser Wert für die weiteren Berechnungen viele ganzzahlige Teiler liefern kann.

e) Passagierkapazität

Das Thema der Passagierkapazität beinhaltet zwei Aspekte, nämlich zum einen die reguläre Passagieranzahl im geplanten Normalbetrieb in Abhängigkeit von der Bestuhlung und zum anderen die maximal mögliche Anzahl an Personen, die sich in Extremsituationen in einem Sektor aufhalten können.

- **Reguläre Passagierkapazität des Flugzeugs**

Die maximale Anzahl der Passagiere, die von einem Flugzeugunfall betroffen sein können, ergibt sich ausschließlich aus dem gewählten Bemessungsflugzeug, wenn für die grundsätzlichen Überlegungen an dieser Stelle weitere Personen am Boden oder in anderen Flugzeugen ausgeklammert werden. Die Anzahl der Passagiere, die in einem Flugzeug Platz finden können, ist nicht fest vorgegeben. Sie hängt maßgeblich von der Bestuhlung ab. Die Entscheidung hierüber trifft jede Luftverkehrsgesellschaft nach eigenem Ermessen. Die wichtigsten Kriterien sind hierbei die Anzahl der Klassen (First, Business, Economy), in die sich das Flugzeug aufteilt, sowie der Abstand zwischen den einzelnen Stuhlreihen. Ein sehr anschauliches Beispiel hierfür ist der Airbus A380. Für eine 3-Klassen-Bestuhlung wird die Anzahl der Passagiere von Airbus mit 525 angegeben. Die maximale Passagierkapazität beträgt hingegen 853 Personen [Airbus o. J.]. Die Entscheidung darüber, mit welcher Passagieranzahl die Simulation durchgeführt werden soll, obliegt dem Anwender unter Berücksichtigung der möglichen Konfiguration des Bemessungsflugzeugs.

Unabhängig davon, welche Klassenaufteilung und welcher Bestuhlungsstandard für die Anzahl der Passagiere gewählt werden, werden die Passagiere zur Durchführung der Simulation gleichmäßig in Längsrichtung im virtuellen Flugzeug verteilt.

Dies hat zur Folge, dass die Anzahl der Passagiere auf ein natürliches Vielfaches der Sektoranzahl aufgerundet wird, um diese gleichmäßige Verteilung erzielen zu können. Dies soll an einem Beispiel veranschaulicht werden:

Ein Flugzeug mit vier Türen (10 Sektoren = 3 Türabschnitte mit je 3 Sektoren + Hecktür mit 1 Sektor) soll mit 145 Passagieren besetzt werden. Eine gleichmäßige Verteilung führt rechnerisch zu 14,5 Passagieren pro Sektor. Wird dieser Wert auf 15 aufgerundet, ergibt sich eine Gesamtanzahl von 150 Passagieren.

5. Simulation

▪ Maximale Passagierkapazität pro Sektor

Im weiteren Verlauf wird sich die Frage stellen, wie viele Passagiere sich gleichzeitig in einem Sektor aufhalten können. Relevant wird diese Fragestellung, wenn zu viele Passagiere in einen Bereich drängen. Eine solche Situation ist denkbar, wenn die Passagiere beispielsweise vor einem Brand in der Kabine zurückweichen oder nicht genügend Türen für eine Evakuierung geöffnet werden konnten. Eine Ermittlung der maximal möglichen Personenzahl je Sektor über einen flächenbezogenen Faktor (z. B. Personen pro Quadratmeter) liefert hier keine verwertbaren Ergebnisse, da die Verkehrsflächen (Flugzeuggänge) gegenüber den Sitzflächen nur einen geringen Anteil haben. Es wird daher folgender Ansatz gewählt:

In einem Sektor können sich doppelt so viele Personen aufhalten wie reguläre Sitzplätze vorhanden sind. Die Anzahl der Sitzplätze je Sektor wurde bereits ermittelt. Sie entspricht der Entfluchtungskapazität, da jeweils ein Sektor pro Zeiteinheit evakuiert werden kann (Abschnitt „b) Rasterung der Innenfläche“) und lässt sich somit Tabelle 10 entnehmen.

Maximale Passagieranzahl in einem Sektor		
Klasse des Bemessungsflugzeugs im Modell	Rechnerische Anzahl an regulären Sitzplätzen je Sektor	Max. Passagieranzahl in einem Sektor
1 (2 Türen)	--- *1	20 *1
2 (3 Türen)	20,4	40
3 (4 Türen)	30,6	60
4 (5 Türen)	31,6	65 *2

Tabelle 10: Maximale Passagieranzahl in einem Sektor

- *1 Für kleine Flugzeuge der Klasse 1 wurden keine Zahlen erhoben. Der Wert wird daher näherungsweise mit 50% der Flugzeugklasse 2 angenommen.
- *2 Der Wert für Flugzeugklasse 4 wird nach der Verdoppelung der regulären Sitzplatzanzahl (auf die maximal mögliche Passagieranzahl) je Sektor leicht erhöht (um 5 Personen), um eine signifikante Unterscheidung zur Flugzeugklasse 3 zu erzielen.

Wird die maximale Passagierkapazität in einem Sektor erreicht und es versuchen weitere Passagiere sich in diesen Bereich zu drängen, steigt die Wahrscheinlichkeit für zusätzliche schwere Verletzungen deutlich an. Dies ist unter in Kapitel 5.2.1.1 im Abschnitt c) „Ausbrechen von Panik“ beschrieben.

5. Simulation

5.2 Dynamische Elemente

Die dynamischen Elemente lassen sich in die drei Gruppen „Passagiere“, „Einsatzkräfte“ sowie „Feuer und Rauch“ einteilen. Die Gesetzmäßigkeiten, die die Verhaltensmuster dieser drei Gruppen definieren, werden hier hergeleitet und beschrieben.

5.2.1 Passagiere

Die Flugzeuginsassen stellen das höchste Schutzgut dar. Alle Berechnungen und Überlegungen zielen letztlich darauf ab, möglichst viele Menschenleben zu retten. Die Flugzeuginsassen bestehen aus den Passagieren und der Flugzeugbesatzung (Piloten und Flugbegleiter). Die Flugzeugbesatzung (kurz Crew) unterscheidet sich hinsichtlich ihrer Aufgaben und Kenntnisse von den Passagieren. Während die Passagiere nur Kunden einer Luftverkehrsgesellschaft sind, obliegt der Crew eine Fürsorgepflicht für die Passagiere. Sie ist daher standardmäßig auch für das Eintreten eines Notfalls ausgebildet. Im Falle eines Flugzeugunfalls gemäß dem definierten Untersuchungsraum sind jedoch alle gleichermaßen von den Folgen betroffen. Passagiere wie Crew sind von negativen Umgebungseinflüssen wie Feuer, Wärme, Rauch und Sauerstoffmangel sowie von Verletzungen bedroht. Ihr Handlungsspielraum unterscheidet sich in einer solchen Situation nur minimal. Letztlich sind alle auf ein effektives Eingreifen der Einsatzkräfte angewiesen, die erst durch Lösch- und Rettungsmaßnahmen eine Befreiung aus der Gefahrenlage ermöglichen. Für die Programmierung der Simulation wird davon ausgegangen, dass sich die Crew vorschriftsmäßig verhält. Dies bedeutet insbesondere, dass die Evakuierung zum richtigen Zeitpunkt eingeleitet wird. Eine weitere Differenzierung der zwei verschiedenen Gruppen – Passagiere auf der einen sowie Piloten und Flugbegleiter auf der anderen Seite – erscheint ansonsten nicht hilfreich und wird nicht vorgenommen. Im Folgenden wird daher nur der Begriff „Passagier“ verwendet. Er beinhaltet der Einfachheit halber ebenso die zahlenmäßig wesentlich unbedeutendere Crew. In den nachfolgenden Unterpunkten werden die Verhaltensmuster beschrieben, die dem Modell zu Grunde liegen.

5.2.1.1 Verhalten der Passagiere

Zu einem nicht unerheblichen Teil werden die Abläufe und Vorgänge während einer Schadenslage selbstredend durch die Verhaltensweisen der Passagiere beeinflusst. In der Simulation wird das Passagierverhalten wie folgt modelliert:

a) Verhalten bei Evakuierung

- Passagiere verhalten sich, auch in Notfallsituationen, zunächst einmal ruhig und bleiben an ihren Plätzen. Von diesem Handlungsmuster wird nur abgewichen, wenn eine der unten definierten Verhaltensregeln zur Anwendung kommt.
- Werden Anweisungen gegeben, befolgen die Passagiere diese, insbesondere wenn es sich um die Aufforderung zur Evakuierung handelt.

5. Simulation

- Eine Evakuierung des Flugzeugs kann von der Crew oder den Einsatzkräften eingeleitet werden. Dies erfolgt in Abhängigkeit von der Lage mit den nachfolgend aufgeführten Wahrscheinlichkeiten. Es werden hierzu zwei Kriterien definiert, anhand derer eine Überprüfung stattfindet, ob eine Evakuierung aktiv durch die Crew veranlasst wird. Zunächst erfolgt eine Prüfung, ob eine Evakuierung infolge von Feuer und Rauch eingeleitet wird. Sollte diese negativ ausfallen, findet eine zweite Prüfung anhand des Zustandes des Flugzeuges statt. Fallen beide Prüfungen negativ aus, wird eine Evakuierung erst durch die Einsatzkräfte eingeleitet.

Wahrscheinlichkeiten für die Einleitung einer Evakuierung *1					
Prüfkriterium	Unfall-szenario	Detailbeschreibung des Unfallszenarios	Evakuierung *2		
			durch Crew	durch Rettungs-kräfte	
1. Prüfkriterium Feuer + Rauch *3	Kein Brand *3	Weder im Flugzeug noch außerhalb sind Feuer oder Rauch vorhanden.	50% (0%) *4	50% (0%) *4	
		Außenbrand *3	Flugzeug ist vollständig von Feuer umgeben.	0%	100% *5
	Innenbrand *3	Auf einer Seite des Flugzeugs brennt es außen oder ein Triebwerk oder Fahrwerk brennt.	50%	50%	
		Feuer in der Kabine	100%	0%	
		Feuer und massiver Rauch in der Kabine	100%	0%	
		Feuer im Frachtdeck	75%	25%	
		Feuer im Frachtdeck und massiver Rauch in der Kabine	95%	5%	
	Rauch in der Kabine (Schwelbrand)	95%	5%		
	2. Prüfkriterium Zustand des Flugzeugs *6	Intakt	Das Flugzeug ist strukturell intakt (normal).	50%	50%
			Ein Fahrwerk ist eingeknickt (schräg).	65%	35%
Alle Fahrwerke sind eingeknickt (platt).			65%	35%	
Das Flugzeug „liegt auf dem Rücken“ (Turnover).			50%	50%	
Das Flugzeug ist in mehrere große Teile zerbrochen (zerteilt).			80%	20%	
Das Flugzeug ist in eine Vielzahl an Trümmerteile zerbrochen. (zertrümmert)			100%	0%	

Tabelle 11: Wahrscheinlichkeiten für die Einleitung einer Evakuierung

5. Simulation

- *1 Die hier aufgeführten Werte fließen auch in Tabelle 31 ein.
 - *2 Wahrscheinlichkeitsverteilung zwischen Crew und Einsatzkräften. Die bedingte Wahrscheinlichkeit für eine Evakuierung durch die Einsatzkräfte unter der Annahme, dass noch keine Evakuierung durch die Crew eingeleitet wurde, beträgt immer 100%.
 - *3 Die verschiedenen Brandszenarien werden in Kapitel 5.2.4 definiert und ausführlich erläutert.
 - *4 Die Wahrscheinlichkeit für eine Evakuierung durch die Crew soll bei 50% liegen, wenn keine besonderen Umstände vorliegen. Dies ist gegeben, wenn weder Feuer noch Rauch vorhanden sind (1. Prüfkriterium). Der Wert wird dann rechnerisch auf 0% gesetzt bzw. es wird auf die erste Überprüfung verzichtet. Eine Evakuierung durch die Crew erfolgt in diesem Falle (2. Prüfkriterium = „Zustand des Flugzeugs – normal“) mit einer Wahrscheinlichkeit von 50%.
 - *5 Erst nach der Durchführung wirksamer Löschmaßnahmen
 - *6 Die verschiedenen Zustände, die das Flugzeug annehmen kann, werden in Kapitel 5.3.3 definiert und ausführlich erläutert.
-
- Bei einer Evakuierung versuchen die Passagiere generell, den nächsten offenen Ausgang so schnell wie möglich zu erreichen. Primär erfolgt die Orientierung der Passagiere hierbei nach vor.
 - Stehen in einem Sektor sowohl die rechte als auch die linke Flugzeugtür zur Evakuierung zur Verfügung, verteilen sich die Passagiere - im Durchschnitt - gleichmäßig auf beide Türen. Die Entscheidung für eine Tür erfolgt in diesem Falle durch den für jeden Passagier generierte Determinante „Türvorwahl“ (Abbildung 43, Punkt 5).
 - Bei geordnetem Verhalten gelangen 24 Passagiere pro 0:30 Minute (1 Zeiteinheit) durch eine Flugzeugtür (Kapitel 5.1.2.2 d).
 - Jeder Passagier benötigt jeweils 1:00 Minute (2 Zeiteinheiten), um das Flugzeug über eine Rutsche zu verlassen und einen Sammelplätze zu erreichen. Rechnerisch wird dies auf zwei Zeitschritte à 0:30 Minute aufgeteilt (es ist natürlich klar, dass der Vorgang des Rutschens in der Realität einen geringeren zeitlichen Anteil benötigt als das Aufsuchen des Sammelplatzes). Ein notwendiges Zugeständnis an die Modellierung, die jedoch keine Auswirkungen auf das Ergebnis hat. Die Entfluchtungskapazität wird durch die Flugzeugtüren und nicht durch die Rutschen limitiert.

b) Verhalten bei Feuer und Rauch

- Bei einem Innenbrand flüchten die Passagiere immer zu der dem Feuer abgewandten Seite.
- Im Falle eines Außenbrands betätigen die Passagiere keine Türen bzw. nehmen keine Ausgänge bzw. Rutschen auf der Brandseite sondern ausschließlich zur anderen Seite.
- Bei einem Vollbrand im Außenbereich öffnen die Passagiere keine Türen.

5. Simulation

- Bei Außenbränden versuchen die Passagiere, sich in den Teil des Flugzeugs zu begeben, in dem die Beaufschlagung mit Wärme am geringsten ist.

c) Ausbrechen von Panik

- Beim Eintreten von Flugzeugunfällen besteht immer die Möglichkeit, dass Panik unter den Passagieren ausbricht. Die Wahrscheinlichkeit hierfür wird wie folgt angenommen:
 - „ohne besondere Vorkommnisse“ 1,0% pro Zeiteinheit
- Daneben haben in der Simulation noch drei weitere Faktoren Einfluss auf die Entstehung von Panik. Diese sind Außenbrand, Innenbrand in der Kabine und Rauchentwicklung in der Kabine. Die Eintrittswahrscheinlichkeiten werden wie folgt gewählt:
 - Außenbrand 2,5% pro Zeiteinheit, wenn in mindestens einem Abschnitt
5,0% pro Zeiteinheit, wenn in einer größeren Anzahl an Abschnitten (= größer Türanzahl +1)
 - Innenbrand 5,0% pro Zeiteinheit, wenn in einem Sektor
10,0% pro Zeiteinheit, wenn in mehr als einem Sektor
 - Rauch in der Kabine 5,0% pro Zeiteinheit
- Es wird kumulativ ein Panikbeiwert aus den oben genannten Einzelwahrscheinlichkeiten gebildet, sofern die entsprechenden Merkmale vorliegen. Es wird eine Zufallsvariable generiert und diese mit dem Panikbeiwert verglichen. Ist die Zufallsvariable kleiner als der Panikbeiwert, bricht Panik aus.
- Die Überprüfung, ob eine Panik ausbricht, wird in jeder Zeiteinheit (also alle 0:30 Minute) neu durchgeführt.
- Tritt Panik auf, bleibt sie bis zum Einsatzende bestehen.
- Besteht eine Panik, drängen sich die Passagiere unkooperativ und egomanisch zu den Türen. Es kommt zu einem Verhalten, das in der Gesamtbetrachtung uneffektiver ist als ein geordnetes und diszipliniertes Verlassen des Flugzeugs. Dadurch sinkt die Entfluchtungskapazität um 25% auf 18 Passagiere pro Zeiteinheit und Flugzeugtür.
- Drängen mehr Passagiere in einen Sektor, als sich dort maximal aufhalten können (Kapitel 5.1.2.2 Abschnitt e) besteht die Gefahr, dass Passagiere im Gedränge ernsthaft zu Schaden kommen. Für jeden Passagier, der sich in einem überfüllten Sektor aufhält, beträgt die Wahrscheinlichkeit, durch nachdrängende Passagiere eine tödliche Verletzung zu erleiden, 0,2% in jeder Zeiteinheit. Dieser Wert wurde frei nach eigenem Ermessen gewählt. Der hier beschriebene Zusammenhang besteht immer, sobald zu viele Passagiere in einen Sektor drängen, unabhängig davon, ob eine Panik infolge der oben genannten Umstände eingetreten ist oder nicht. Bei 100 Passagieren, die panisch in einen Sektor drängen, liegt der Erwartungswert somit bei einem Toten in 2:30 Minuten (5 Zeiteinheiten).

5. Simulation

d) Akute Belastungsreaktion / Desorientierung

- Durch das Extremereignis „Flugzeugunfall“ und dessen Begleitumstände kann es bei Passagieren zu Desorientierung kommen. Umgangssprachlich wird dieser Zustand auch als „unter Schock stehen“ bezeichnet, medizinisch korrekt spricht man von „akuter Belastungsreaktion“. Hierunter werden alle Verhaltensweisen verstanden, die ein realitätsangepasstes Handeln verhindern, im vorliegenden Fall primär die zielgerichtete Eigenrettung. Dies kann dazu führen, dass Betroffene jegliche Aktivitäten einstellen und in Bewegungslosigkeit verharren. Daneben ist es auch möglich, dass Betroffene Wahrnehmungsstörungen aufweisen und ziellos umherirren. Die gleichen Symptome können auch auftreten, wenn Personen der Einwirkung von Atemgiften (Kapitel 5.2.4.5 Atemgift) ausgesetzt sind [IdF NRW 2002, S. 11f.].
- Folgende Verhaltensmuster sind in der Simulation modelliert:
 - Desorientierte Personen, die sich ziellos fortbewegen, folgen zwar den anderen Passagieren, sie bleiben jedoch in jeder Zeiteinheit mit einer Wahrscheinlichkeit von 50% wahllos stehen. Hierfür wird jeweils eine Zufallsvariable generiert und mit der Eintrittswahrscheinlichkeit verglichen.
 - Desorientierte Passagiere, die in Bewegungslosigkeit verfallen, werden an dieser Stelle nicht gesondert betrachtet. Die auftretenden Symptome sind durch die Modellierung der eingeschränkten Fortbewegungsfähigkeit (Kapitel 5.2.1.5) hinreichend berücksichtigt, da es für die Einsatzkräfte primär keinen Unterschied macht, ob sich Passagiere aufgrund von Verletzungen oder akuter Belastungsreaktion nicht selbstständig fortbewegen können und folglich aus dem Flugzeug gerettet werden müssen.

e) Verhalten außerhalb des Flugzeugs

- Passagiere, die das Flugzeug verlassen haben, laufen zu den Sammelpunkten, an denen die medizinische Versorgung und soziale Betreuung stattfindet.
- Alle Passagiere begeben sich (soweit sie gehfähig sind) zu den Sammelplätzen und verbleiben dort.
- An den Sammelplätzen werden alle Passagiere sofort einer adäquaten medizinischen Versorgung zugeführt (Kapitel 5.2.3).

5. Simulation

5.2.1.2 Einflüsse auf den Gesundheitszustand

Um einen bestmöglichen Schutz von Menschenleben zu erreichen, ist es notwendig, die verschiedenen Faktoren zu bestimmen, die hierbei Einfluss haben. Im Falle von Flugzeugunfällen gibt es eine Reihe von Faktoren, die einen entscheidenden Einfluss auf die Beeinträchtigung der menschlichen Gesundheit haben. Die folgende Auflistung zeigt, welche Größen negative Einflüsse auf die Gesundheit von Flugzeuginsassen haben können:

- Folgen der mechanischen Belastung des Unfalls
- Feuer (direkte Einwirkung von Flammen)
- Wärme (Wärmestrahlung sowie Extremtemperaturen in der unmittelbaren Umgebung)
- Sauerstoffmangel
- Luftschadstoffe
- Panikverhalten

Der Aspekt „Panik“ wurde bereits im vorherigen Kapitel beschrieben. Die Punkte a) bis e) werden im Folgenden behandelt.

5.2.1.3 Verletzungsmuster im Modell

Zentraler Bestandteil des Simulationsmodells ist eine möglichst realitätsgetreue Modellierung der Verletzungsmuster der Passagiere als unmittelbare Folge eines Flugzeugunfalls. Hierfür ist also zu bestimmen, wie viele Passagiere erwartungsgemäß verletzt sind (und in welchem Maße) und wie viele unverletzt oder verstorben sind.

Dieses Kapitel beschäftigt sich daher zum einen mit der Herleitung einer Kategorisierung der Verletzungsmuster (z. B. „akut lebensbedrohlich verletzt“ oder „unverletzt“) sowie zum anderen mit der genauen Bezifferung des jeweiligen Anteils eines Verletzungsmusters an der Gesamtverteilung (z. B. „25% tot“). Das Kapitel schließt ab mit einer dem Simulationsmodell zugrunde liegenden Verteilung der Verletzungsmuster bei Flugzeugunfällen.

a) Verletzungsrelevante Typen von Flugzeugunfällen

Unter dem Gesichtspunkt der Verletzungsmuster bzw. deren Verteilung lassen sich drei Arten von Unfalltypen unterscheiden:

- **„Blechsäden“**
Es tritt zwar ein Unfall ein, dieser findet jedoch unter Bedingungen statt, die eine hohe Überlebenschance bieten. Beispiel: Das Flugzeug kommt von der Start- und Landebahn ab, ohne eine Kollision zu verursachen, und bleibt anschließend neben der Bahn oder in der Ausrollfläche stecken.

5. Simulation

Treten hierbei weder Brand noch Verrauchung auf oder werden diese Gefahrenquellen schnell durch die Einsatzkräfte ausgeräumt, sind zumeist keine oder nur wenige Tote zu beklagen.

- **Überlebende Unfälle**

Voraussetzung ist hier, dass der Flugzeugunfall „mechanisch“ überlebbar ist. Die Kräfte, die bei der (Bruch-)Landung auf die Passagiere wirken, sind also nicht so groß, dass sie zwangsläufig zum sicheren Tod führen. Wie hoch der Anteil der Toten ist oder wie sich die Verletzungsmuster verteilen, kann je nach Unfallkonstellation stark variieren.

- **Totalverlust**

Der Unfall ist so schwer, dass das Flugzeug gänzlich zerstört und die Passagiere i. d. R. nahezu vollständig getötet werden. Beim Verlust über die Steuerung des Flugzeugs oder beim, also einem „kontrollierten“ Flug ins Gelände, kommt es zu dieser Art der Verletztenverteilung.

In die nachfolgende Betrachtung fließen die beiden ersten Unfalltypen ein, während der Totalschaden mit einer (in diesem Fall wenig Erkenntnis steigernden) Mortalitätsrate von 100% von der Betrachtung ausgeschlossen ist (Kapitel 4.3 „Untersuchungsraum und Systemgrenzen“). Der überlebende Flugzeugunfall wird darüber hinaus im Folgenden als „Normalfall“ definiert. Auf dieser Grundlage wird eine durchschnittliche Verletzungsverteilung hergeleitet, die in Abhängigkeit des genauen Unfallszenarios variiert werden kann, um schwerere Unfälle oder aber auch leichtere („Blebschaden“) mathematisch darzustellen.

b) Triage-Kategorien

Charakteristisch für (Großschadens-)Ereignis wie einen Flugzeugunfall des Typs „Normalfall“ ist, dass eine Vielzahl an Verletzten auftritt. Dieser Sachverhalt wird als „Massenanfall von Verletzten“ (MANV) bezeichnet. Die übliche individual-medizinische Versorgung ist dann aufgrund der großen Anzahl an Verletzten nicht mehr möglich. Bei solchen Einsatzlagen wird (nach der Rettung aus dem direkten Gefahrenbereich) zunächst nur der Zustand der Unfallbetroffenen begutachtet und in verschiedene Kategorien eingeteilt. Die Einteilung dient dazu, die Priorität der Behandlungsbedürftigkeit festzulegen. Dieser Vorgang wird als „Triage“ bezeichnet. Hierbei geht es darum, die knappen vorhandenen Ressourcen möglichst effektiv auf die vorhandenen Verletzten aufzuteilen, um in der Gesamtheit möglichst wirkungsvoll Hilfe leisten zu können. Üblicherweise reicht gerade zu Beginn eines Großeinsatzes die Anzahl an medizinischem Personal nicht aus, um alle Verletzten gleichzeitig zu versorgen. Die Triage erfolgt nach der Rettung aus dem direkten Gefahrenbereich. Zur Herleitung einer Kategorisierung der Verletzungsmuster dient die Triage-Einteilung als Grundlage. Folgende Kategorien werden in Deutschland unterschieden:

5. Simulation

Triage-Kategorien	
Kategorie	Bedeutung
S1	Akut vital verletzt
S2	Schwer verletzt
S3	Leicht verletzt
S4 * ¹	Ohne Überlebenschance * ¹
---	Tot

Tabelle 12: Triage-Kategorien

Quelle: BMI 2003, S. 27

*¹ Unter der Kategorie S4 werden Personen verstanden, die so massiv verletzt sind, dass aufgrund der gegen Null gehenden Überlebenschance erst gar keine medizinische Behandlung mehr vorgenommen wird. Die verfügbaren medizinischen Kräfte konzentrieren sich vornehmlich auf die Verletzten mit Überlebenschancen. In der vorliegenden Arbeit erfolgt daher keine Unterscheidung zwischen der Kategorie S4 und dem Zustand „Tot“, da beide Personengruppen de facto verloren sind. Sie werden im Folgenden unter der Kategorie S4 zusammengefasst und zur klaren Abgrenzung von den anderen Personen als „tot“ bezeichnet.

Die National Fire Protection Association (NFPA) legt für die Bemessung des Rettungsdienstes (medizinischer Dienst) eine vergleichbare Einteilung mit den folgenden drei Kategorien zugrunde [NFPA 1991, S. 41]:

- Immediate (sofortige Behandlung)
- Delayed (spätere Behandlung)
- Minor (untergeordnete Behandlung)

Die NFPA geht dabei von der Annahme aus, dass 25% der Passagiere bei einem Unfall verletzt werden. Lediglich diese 25% werden in die genannten Kategorien („immediate“, „delayed“ und „minor“) unterschieden. Die Verteilung der verbleibenden 75% auf „Unverletzte“ und „Tote“ bleibt demgegenüber unbeziffert (Abbildung 36).

5. Simulation

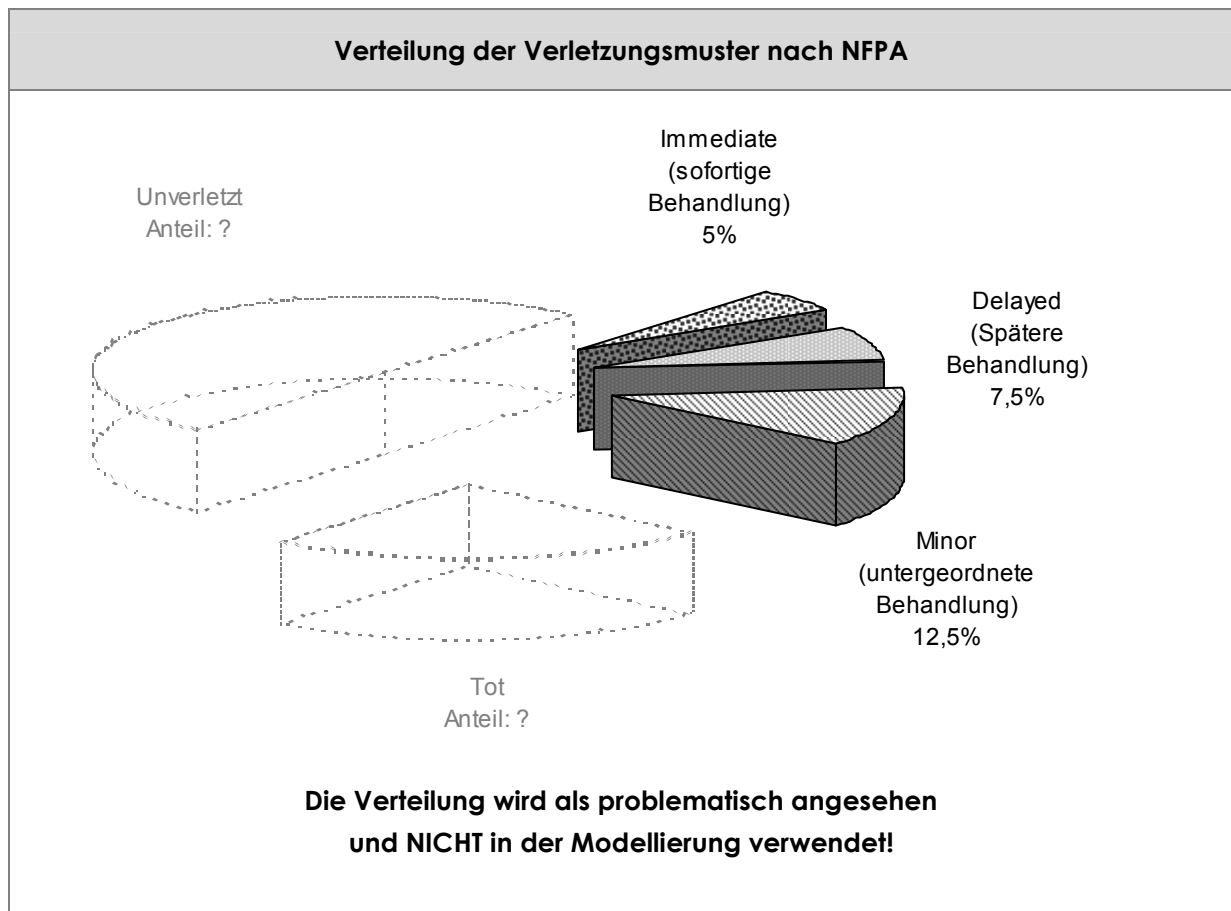


Abbildung 36: Verteilung der Verletzungsmuster nach NFPA

Quelle: NFPA 1991, S. 41

Die Verteilung der Verletzungsmuster nach NFPA wird in der Modellierung jedoch nicht verwendet, da die folgenden zwei Aspekte als problematisch bzw. unzureichend angesehen werden:

- **Anteil der Verletzten**

Der Anteil der Verletzten von lediglich 25%, von denen die Hälfte quasi keiner Behandlung bedarf („untergeordnete Behandlung“), erscheint sehr gering. Zudem sind keine Angaben zur Herleitung dieser Zahl vorhanden sind. Vergleichbare Ereignisse sind erfahrungsgemäß mit einer höheren Anzahl an Verletzten verbunden. Die Angaben der NFPA scheinen demnach nicht belastbar zu sein und werden daher als Basis zur Modellbildung verworfen.

- **Anteil Unverletzte und Tote**

Wenn der Anteil der Verletzten 25% beträgt, entfallen auf die Kategorien „Unverletzt“ und „Tot“ folglich in Summe 75%. Es gibt jedoch keine Angaben darüber, wie die Verteilung zwischen diesen beiden Kategorien ist. Diese Verteilung ist jedoch vor dem Hintergrund der zu beantwortenden Fragestellung nach der Anzahl der sich im Flugzeug befindlichen lebenden und damit zu rettenden Personen von zentraler Bedeutung.

5. Simulation

c) Herleitung der Verteilung der Verletzungsmuster

Die Sichtung der vorliegenden Quellen ergibt, dass es faktisch nicht möglich ist, exakte Angaben zu Verletzten zu finden, erst recht nicht die genaue Verteilung der Verletzungsmuster. In der Regel wird nur angegeben, wie viele Personen bei einem Flugzeugunfall tödlich verunglücken. Oft erfolgt diese Angabe jedoch ohne die Gesamtanzahl an Passagieren. Auch bei aggregierten Jahresangaben ist nur die absolute Anzahl aller Toten, jedoch keine relative Angabe zu finden. Auf Basis der verfügbaren absoluten Zahlen aller Toten lässt sich dennoch der relative Anteil an Toten näherungsweise wie folgt bestimmen. Hierzu wird die Anzahl der Toten pro Fünfjahresperiode durch die Anzahl der Flugzeugunfälle in diesem Zeitraum geteilt. Wird dieser Wert durch die durchschnittliche Anzahl an Passagieren pro Flug dividiert, ergibt sich ein Sterberate für Flugzeugunfälle. Die Anzahl der Passagiere pro Flug stellt hier eine Unbekannte dar. Sie wird mit 100 angenommen. Dies entspricht nahezu dem Wert (exakt: 102 Passagiere/LFZ), der vom Hub Control Center (HCC) 2005 für Flugzeuge der Lufthansa (einschließlich Star Allianz) am Flughafen Frankfurt/Main ermittelt wurde. Da die Lufthansa den Flughafen Frankfurt/Main als Drehkreuz für ihren internationalen Luftverkehr nutzt, stellt diese Zahl einen guten Wert dar, der sowohl Langstreckenflüge als auch Kurz- und Mittelstreckenflüge berücksichtigt und damit die wesentlichen Flugzeugtypen abbildet.

Tote bei Flugzeugunfällen, Anzahl und Anteil				
Periode	Anzahl Flugzeugunfälle	Tote, gesamt	Anteil Tote (Annahme: 100 Pax pro LFZ)	Anteil Tote, Mittelwert
1983 bis 1987	197	5.440	27,6%	} 25,3%
1988 bis 1992	268	6.028	22,5%	
1993 bis 1997	245	6.834	27,9%	
1998 bis 2002	183	4.845	26,5%	
2003 bis 2007	144	3.816	26,5%	
2008 bis 2012	152	3.180	20,9%	

Tabelle 13: Tote bei Flugzeugunfällen, Anzahl und Anteil

Quelle: FSF o. J.a

Dieses Verfahren beinhaltet die Schwäche, dass ein Mittelwert die Extremwerte bzw. die Verteilung nicht widerspiegelt. Da die Unfallschwere und damit sowohl der Anteil der Toten als auch die Verletzungsverteilung bei der Simulation jedoch zweifach (und von einander unabhängig) variiert werden, wird eine Streuung erzeugt, die diese Schwäche ausgleicht. Die Variation erfolgt durch den abstrakten Parameter „Unfallschwere“ und zusätzlich in Abhängigkeit vom jeweiligen konkreten Schadensszenario. Das gewählte Vorgehen darf daher als pragmatischer Lösungsansatz angesehen werden. Der Anteil des Verletzungsmusters S4 („tot“) wird demnach mit 25% (aus Basis des rechnerischen Mittelwertes von 25,3%).

5. Simulation

Um die weitere Verteilung der Verletzungsmuster S1 „akut vital verletzt“ bis S3 „leicht verletzt“ zu bestimmen, wird folgender Analogieschluss gezogen: Flugzeugunfälle ereignen sich, wie bereits ausgeführt, meist in der Start- oder Landephase. Aufgrund der hohen Geschwindigkeiten (in der Regel deutlich über 100km/h) und der im Vergleich zum Kraftfahrzeug geringen Sicherheitsausstattung (keine Airbags, nur Zweipunktgurt) kommt es zu starken physischen Belastungen der Passagiere. Die Verletzungsmuster ähneln stark denen, die auch bei Unfällen mit Hochgeschwindigkeitszügen auftreten (Es entbehrt an dieser Stelle nicht einer gewissen Ironie, dass sich das geflügelte Wort vom „Fliegen auf Höhe null“ im Zusammenhang mit Hochgeschwindigkeitszügen auch in Bezug auf Unfälle als sehr zutreffend erweist). Die üblichen Verletzungsmuster sind maßgeblich Knochenbrüche, innere Verletzungen und Schädel-Hirn-Traumata [Paschen 2000, S. 7ff.]. Um die Verletztenverteilung für die Modellierung zu erarbeiten, wird daher das Zugunglück in Eschede im Jahre 1997 als „Referenzgröße“ gewählt [Hüls et al. 1999 und IdF ST 2007]. Hinsichtlich der Rahmenbedingungen wie Konstruktion („Metallröhre“), Geschwindigkeit in Bodennähe und Anzahl Passagiere sind die Transportsysteme „ICE“ und „Flugzeug“ vergleichbar. Hier wird folgende Verteilung angegeben:

- 33,1% Tot *1 *2
- 30,3% Schwer Verletzte *1
- 36,5% Unverletzte

*1 Teilweise wurden in der Literatur unterschiedliche Werte gefunden. Differenzen können entstehen, da nicht immer eindeutig angegeben wird, ob sich die Anzahl der Toten und Verletzten auf den Zeitpunkt des Unfalleintritts bezieht oder eine abschließende Betrachtung darstellt. Personen, die beim Transport oder im Krankenhaus verstorben sind, können daher je nach Sicht in „Tot“ oder „Schwer Verletzt“ enthalten sein.

*2 Ohne Berücksichtigung der Streckenarbeiter, da eine Folgenabschätzung für Passagiere beabsichtigt ist.

Es ist jedoch anzunehmen, dass die Zahl der schwer Verletzten kurz nach Eintritt des Unfalls deutlich höher lag (und die Anzahl der Toten niedriger) und viele von ihnen verstorben sind, bevor die Einsatzkräfte bis zu ihnen vordringen konnten, da die Schaffung von Zugangsmöglichkeiten aufgrund der Bauweise der ICE-Wagen (Struktur und Material, keine zu öffnenden Fenster) und der Schwere des Unfalls (Starke Verformung, Türen verzogen) sehr zeitaufwändig war. Dies spricht dafür, eine niedrigere Sterberate zugrunde zu legen, aber die Summe aus Toten und Scherverletzten mit insgesamt 63,4% als einen plausiblen Wert anzusehen. Wird von einer Rate von 25% Toten ausgegangen (Tabelle 13), verbleiben weitere 75% zur Verteilung auf die Verletzungskategorien S1 bis S3 sowie die Gruppe der Unverletzten. Es wird angenommen, dass sich die Überlebenden zu gleichen Teilen aus verletzten und unverletzten Passagieren zusammensetzen (die Unverletzten werden der Kategorie der leicht Verletzten hinzugerechnet und im Weiteren unter S3 geführt).

5. Simulation

Erfahrungsgemäß ist der Anteil der „akut vital verletzten“ Personen (S1) bei Unfällen mit einer Vielzahl an Verletzten geringer als der Anteil der „schwer verletzten“ Personen (S2). Für die Verteilung wird daher in Anlehnung an die Fibonacci-Reihe ($a_n = a_{n-1} + a_{n-2}$) ein Verhältnis von 5 zu 3 zu 2 für die Verletzungsmuster S1 bis S3 gewählt. Werden die Verletzungsmuster im Verhältnis $S3 = S2 + S1$ zugrunde gelegt, ergibt sich eine Verteilung von 37,5% S3 („Un-/leicht Verletzte“), 22,5% S2 („schwer Verletzte“) sowie 15,0% S1 („akut vital Verletzte“).

Der (gewählte) Anteil der Toten und Verletzten von zusammen 62,5% (= 25% + 15% + 22,5%) in der Simulation entspricht fast exakt dem Anteil dieser Verletzungsmuster beim ICE-Unfall von Eschede mit 63,4%.

Herleitung der Verletzungsverteilung					
Verletzungsmuster *1	ICE-Unfall Eschede		Flugzeugunfälle	in der Simulation verwendet	
S3 - Un-/leicht verletzt	63,4%	36,6%	---	37,5%	62,5%
S2 - Schwer verletzt		---	---	22,5%	
S1 - Akut vital verletzt		30,3%	---	15,0%	
S4 - Tot		33,1%	Ø = 25,3% (20,9% bis 27,6%)	25,0%	

Tabelle 14: Herleitung der Verletzungsverteilung

Quelle 1: IdF ST 2007
Quelle 2: FSF o. J.a

*1 Die Reihenfolge der Verletzungsmuster wurde hier geändert, damit die Gruppen „Tot“ und „Akut vital verletzt“ aufeinander folgen.

Die Verteilung der Verletzungsmuster (Abbildung 37) ist von wesentlicher Bedeutung für die Ermittlung des Einsatzerfolges. Die Simulation basiert auf der folgenden Verteilung:

5. Simulation

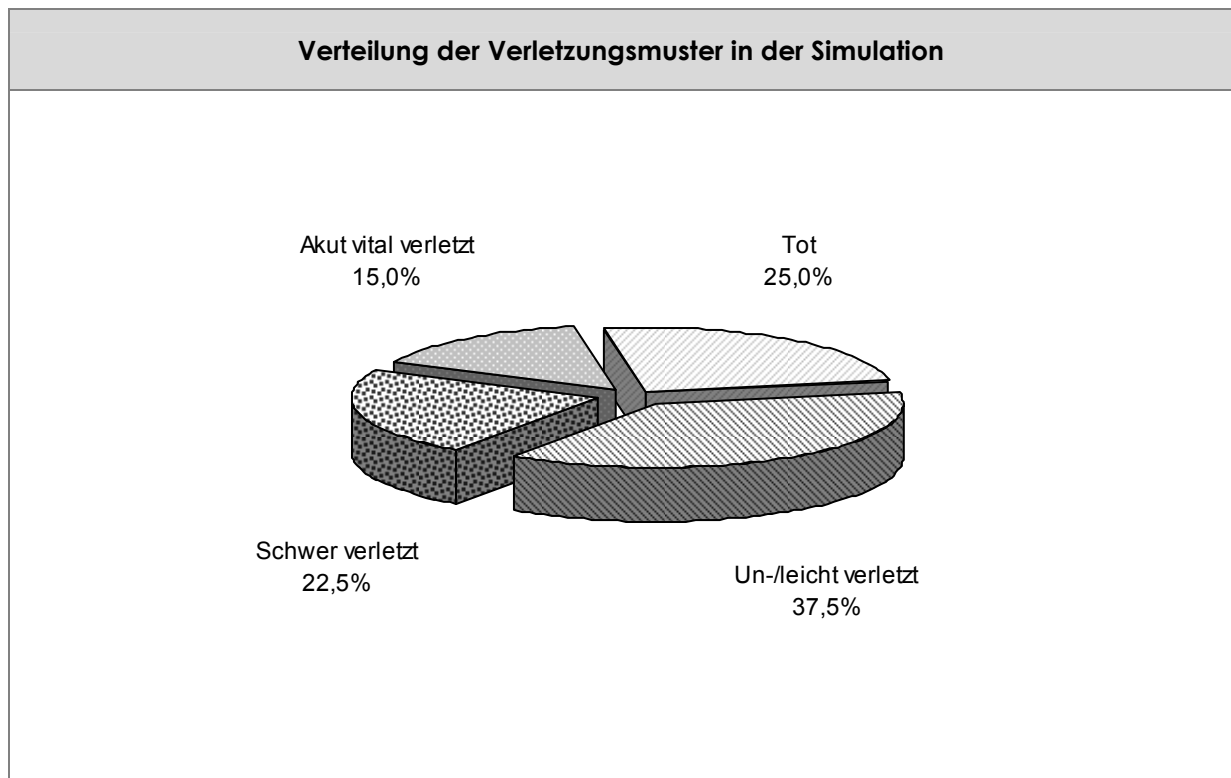


Abbildung 37: Verteilung der Verletzungsmuster in der Simulation

d) Modellierung der Verletzungsmuster in der Simulation

Für die rechnerische Umsetzung in der Simulation muss für jeden einzelnen Passagier definiert werden, ob dieser nur leicht verletzt ist und erst sehr spät oder überhaupt keine medizinische Versorgung benötigt. Oder ist er lebensbedrohlich verletzt, so dass er bereits nach kurzer Zeit ohne ausreichende medizinische Versorgung seinen Verletzungen erliegt, da noch keine Einsatzkräfte zu ihnen vorgedrungen sind (letzteres könnte daran liegen, dass aufgrund äußerer Umstände noch keine Einsatzkräfte eingetroffen sind, oder aber auch daran, dass sie zahlenmäßig zu gering sind, um alle Passagier gleichzeitig bzw. rechtzeitig versorgen zu können)? Da die vorliegende Arbeit die Abläufe nach einem Flugzeugunfall nicht aus medizinischer Sicht betrachtet, sondern vielmehr die Leistungsfähigkeit der Einsatzkräfte (vor allem der Feuerwehr) im Vordergrund der Betrachtung steht, sind die genauen medizinischen Befunde von untergeordneter Bedeutung. Wenn die Einsatzkräfte wie oben erwähnt erst zu spät bis zu einem Passagier vordringen können, ist es letztlich unerheblich, welcher Art von Verletzung dieser erlegen ist. Von Interesse ist primär die rein rechnerische Entwicklung des Gesundheitszustandes bzw. der Überlebenschance sowohl im Falle ausbleibender medizinischer Versorgung als auch beim Einsetzen erster medizinischer Maßnahmen, die bereits während der Rettung beginnen. Ohne also auf die einzelnen Verletzungsarten aus (notfall-) medizinischer Sicht näher einzugehen und dennoch gleichzeitig eine genauere Betrachtung zu erzielen, werden die Kategorien S1 (akut vital verletzt) und S2 (schwer verletzt) nochmals gleichmäßig in drei Untergruppen aufgeteilt.

5. Simulation

Diese Einteilung ist von großer Bedeutung, da sie eine sehr differenzierte Entwicklung des Gesundheitszustandes jedes einzelnen Passagiers ermöglicht, welche im nächsten Kapitel beschrieben wird. Für die Simulation ergeben sich damit die folgenden acht Verletzungskategorien für die Passagiere:

Verteilung der Verletzungsmuster in der Simulation bei Differenzierung der Kategorien S1 und S2			
Kategorie	Bedeutung	Verteilung	Befreiungs- zeitfaktor *1
S1.1	Akut lebensbedrohlich verletzt	5,0%	1
S1.2	Kritisch lebensbedrohlich verletzt	5,0%	2
S1.3	Lebensbedrohlich verletzt	5,0%	3
S2.1	Massiv schwer verletzt	7,5%	4
S2.2	Kritisch schwer verletzt	7,5%	5
S2.3	Schwer verletzt	7,5%	6
S3	Un-/leicht verletzt	37,5%	7
S4	Tot	25,0%	0

Tabelle 15: Verteilung der Verletzungsgrade in der Simulation bei Differenzierung der Kategorien S1 und S2

*1 Der Befreiungszeitfaktor wird in der Simulation zur Berechnung des Zeitbedarfs bei der Befreiung eingeklemmter Personen benötigt (Kapitel 5.2.1.5).

5.2.1.4 Veränderung des Gesundheitszustands

Die Veränderung des Gesundheitszustandes der Passagiere im Zeitverlauf ist ein wesentlicher Bestandteil der gesamten Betrachtung. Denn neben der Bedrohung durch Feuer und Rauch stellt die therapiefreie Zeit bis zum Eintreffen der Einsatzkräfte bzw. bis zur medizinischen Versorgung eine ernsthafte Gefährdung der Passagiere dar, wenn diese infolge des Unfallhergangs bereits verletzt wurden und sich der gesundheitliche Zustand ohne die notwendige medizinische Versorgung mit fortlaufender Zeit immer weiter verschlechtert. Daneben besteht auch die Möglichkeit, dass sich Passagiere beim Verlassen des Flugzeugs über die Notrutschen verletzen.

a) Veränderung des Gesundheitszustands in der Zeit ohne medizinische Versorgung

Die Veränderung des Gesundheitszustandes in der therapiefreien Zeit wird durch eine mathematische Funktion abgebildet. Hierbei werden nur die Auswirkungen der Verletzungen, die unmittelbar aus dem Unfallereignis resultieren, und der fehlenden medizinischen Versorgung berücksichtigt.

5. Simulation

Weitere Einflüsse (durch Feuer, Wärme oder Rauch) haben ebenfalls starken Einfluss auf die Überlebenschance der Passagiere. Die hierfür angenommenen Zusammenhänge werden im Abschnitt über Feuer und Rauch nachfolgend beschrieben. Für lebensbedrohliche Verletzungen ist die Überlebenschance in Abhängigkeit von der Zeit bis zur medizinischen Versorgung bekannt (Abbildung 38).

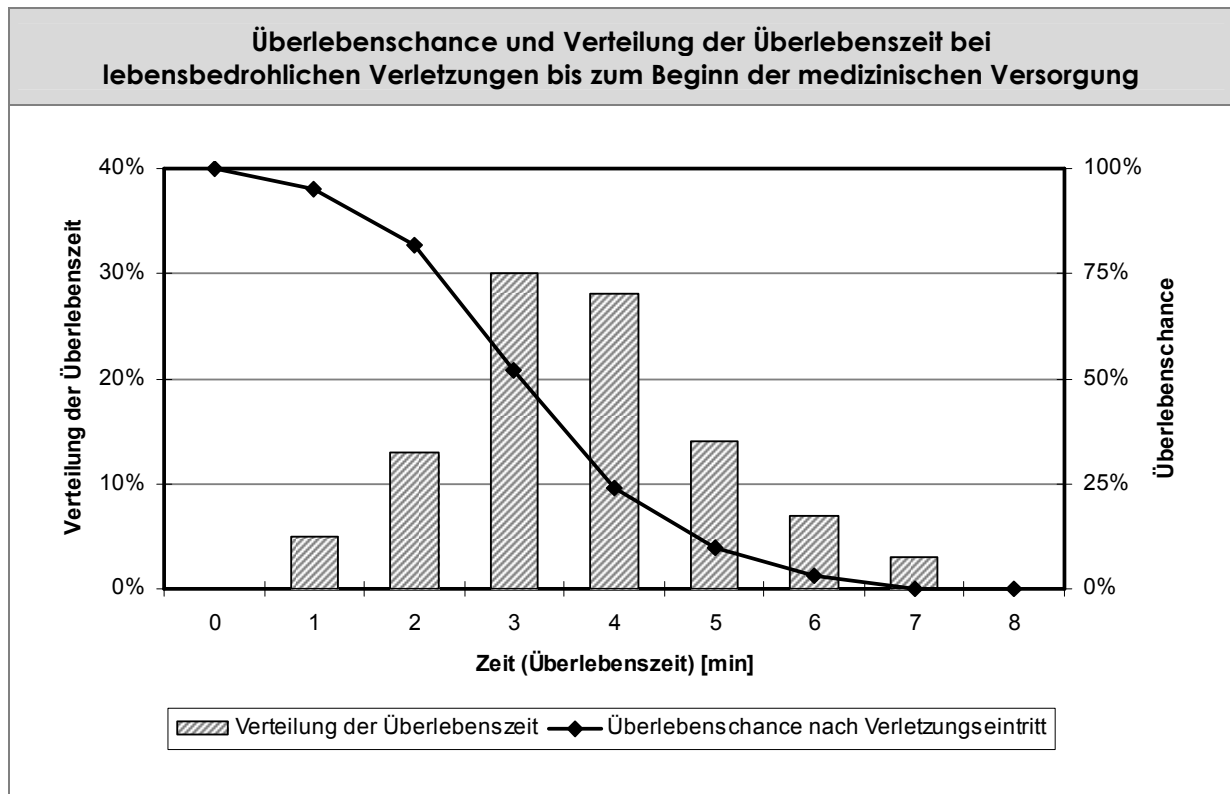


Abbildung 38: Überlebenschance und Verteilung der Überlebenszeit bei lebensbedrohlichen Verletzungen bis zum Eintritt der medizinischen Versorgung

Quelle: BGHW 2010, S. 6

Diese Erkenntnis dient als Ausgangspunkt für die Festlegung der Entwicklung des Gesundheitszustandes bei allen Verletzungsgraden. Da der Gesundheitszustand der Passagiere nur mathematisch-statistisch betrachtet wird und einzelne medizinische Betrachtungen für die Anwendung einer Computersimulation nicht erforderlich sind, wird der Gesundheitszustand der Passagiere vereinfacht mit der Überlebenschance gleichgesetzt. Genauso wie bei lebensbedrohlich Verletzten die Überlebenschance mit zunehmender Zeit sinkt, trifft dies auch für Personen mit schweren Verletzungen zu. Hier ist zwar eine medizinische Versorgung innerhalb der ersten Minuten nicht zwingend notwendig, doch verschlechtert sich der Gesundheitszustand ebenfalls kontinuierlich. Dies erfolgt über einen deutlich längeren Zeitraum (es handelt sich nicht um eine Zeitspanne von wenigen Minuten, sondern eher um bis zu zwei Stunden). Es ist also anzunehmen, dass die Überlebenschance prinzipiell den gleichen Verlauf aufweist, wenn auch zeitlichen unterschiedlich stark gestreckter.

5. Simulation

Aus dieser Überlegung heraus wird eine Basiskurve für die Modellierung der Überlebenswahrscheinlichkeit gesucht, die sich leicht anpassen lässt und als Grundfunktion für alle Verletzungsgrade verwendet werden kann. Zur mathematischen Beschreibung wird die Kosinus-Funktion gewählt.

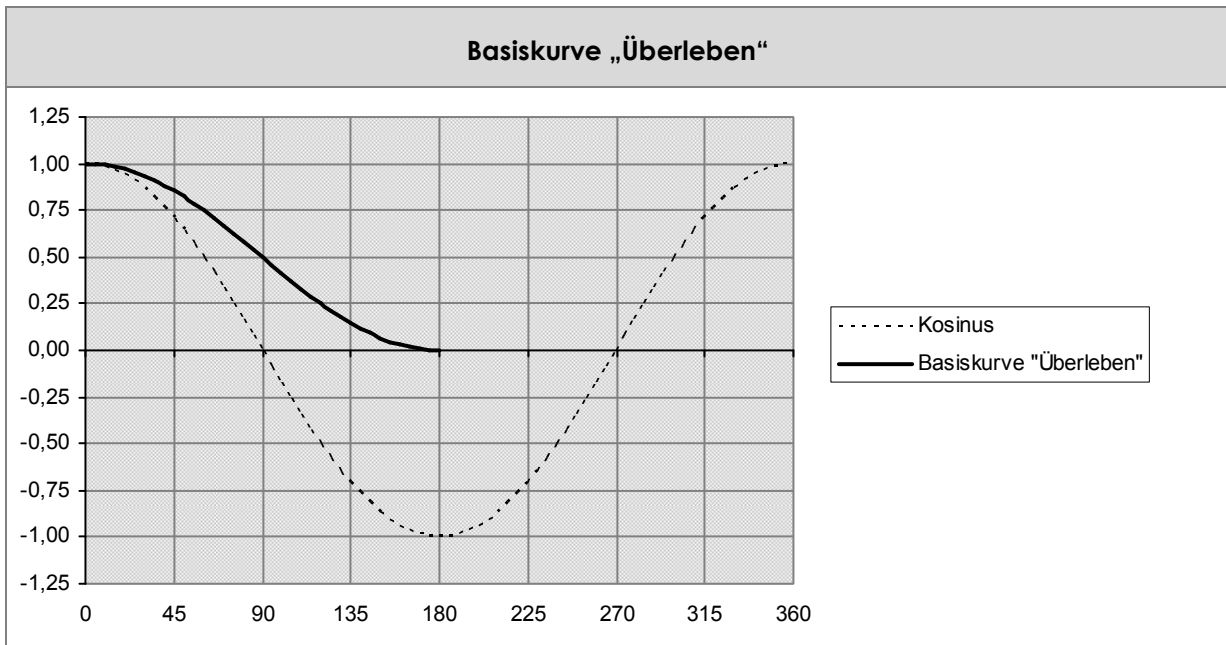


Abbildung 39: Basiskurve „Überleben“

Durch eine Verschiebung der Kosinus-Funktion in den positiven Y-Wertebereich (absolutes Glied = +1) bei gleichzeitiger Normierung auf die Y-Werte zwischen 0 und 1 (hier: $\frac{1}{2}$) ergibt sich im X-Bereich zwischen 0 und 180 (oder im Bogenmaß zwischen 0 und π) eine Basiskurve (Abbildung 39), die in ihrer Grundform der real gemessenen Überlebenswahrscheinlichkeit in Abbildung 38 entspricht. Sie besitzt die größte Veränderung in der Mitte des Zeitraums ab sowie geringe (negative) Steigung zu Beginn und am Ende.

Die Überlebenswahrscheinlichkeit zum Zeitpunkt t lässt sich durch folgende Funktion beschreiben:

$$\ddot{U}_{\Omega}(t) = \frac{1}{2} \cdot \alpha_{0,\Omega} \cdot \left(1 + \cos \left(\pi \cdot \frac{t - t_{0,\Omega}}{t_{1,\Omega} - t_{0,\Omega}} \right) \right) \quad (12)$$

mit:

- Ω - Verletzungsgrad
- t - Zeit (fortlaufend)
- t_0 - Zeitpunkt, ab dem die Verschlechterung des Gesundheitszustandes einsetzt
- t_1 - Zeitpunkt, an dem die Überlebenswahrscheinlichkeit endet
- $\alpha_{0,\Omega}$ - Sterbewahrscheinlichkeit vor dem Beginn der Verschlechterung

5. Simulation

Als Grundlage für die differenzierte Berechnung der Überlebenswahrscheinlichkeit in Abhängigkeit von den jeweiligen Verletzungskategorien wird Tabelle 16 verwendet. Die hier aufgeführten Werte wurden wie folgt determiniert:

Entwicklung der Überlebenswahrscheinlichkeit					
Verletzungskategorie (erweiterte Triage-Kategorie)		Verletzungs- grad Ω (rech. in der Simulation)	anfängliche Überlebens- wahrscheinlich- keit $\alpha_{0, \Omega}$	$t_{0, \Omega}$	$t_{1, \Omega}$
Kat.	textliche Beschreibung			Beginn [min]	Ende (= tot) [min]
S1.1	Akut lebensbedrohlich verletzt	1	---	0:00	7:00
S1.2	Kritisch lebensbedrohlich verletzt	2	95,00%	7:00	15:00
S1.3	Lebensbedrohlich verletzt	3	97,50%	15:00	30:00
S2.1	Massiv schwer verletzt	4	99,00%	30:00	60:00
S2.2	Kritisch schwer verletzt	5	99,25%	60:00	120:00
S2.3	Schwer verletzt	6	99,50%	120:00	240:00
S3	Un-/leicht verletzt	7	99,75%	---	---
S4	Tot	0	---	---	---

Tabelle 16: Entwicklung der Überlebenswahrscheinlichkeit

Ein kurzes Beispiel soll die Formel verdeutlichen. Betrachtet wird die Überlebenswahrscheinlichkeit eines Passagiers, der massiv schwer verletzt ist (Kategorie S2.1) und 40:00 Minuten nach dem Unfälleintritt medizinisch versorgt wird. Gemäß Tabelle 16 ergeben sich aus der Kategorie S2.1 folgende Werte:

$$\begin{aligned}\Omega &= 4 \\ t_0 &= 30:00 \text{ [min]} \\ t_1 &= 60:00 \text{ [min]}\end{aligned}$$

Werden diese Werte sowie $t = 40:00$ Minuten in die Formel (12) eingesetzt, so ergibt sich eine Überlebenswahrscheinlichkeit von 74,3%:

$$\ddot{U}_{\Omega}(40) = \frac{1}{2} \cdot 0,99 \cdot \left(1 + \cos\left(\pi \cdot \frac{40 - 30}{60 - 30}\right) \right) = \frac{1}{2} \cdot 0,99 \cdot \left(1 + \cos\left(\pi \cdot \frac{1}{3}\right) \right) = 0,743 = 74,3\%$$

Wird auch die Zeit vor und nach dem Zeitraum der Verschlechterung des Gesundheitszustandes berücksichtigt, ergibt sich aus Formel (12) und Tabelle 16 folgende Gesamtfunktion für die Programmierung:

5. Simulation

$$\ddot{U}_\Omega(t) = \begin{cases} \alpha_{0,\Omega} & t < t_{0,\Omega} \\ \ddot{U}_\Omega(t) = \frac{1}{2} \cdot \alpha_{0,\Omega} \cdot \left(1 + \cos\left(\pi \cdot \frac{t - t_{0,\Omega}}{t_{1,\Omega} - t_{0,\Omega}} \right) \right) & \text{für } t_{0,\Omega} \leq t \leq t_{1,\Omega} \\ 0 & t > t_{1,\Omega} \end{cases} \quad (13)$$

Die Überlebenswahrscheinlichkeiten in Abhängigkeit von der Variable t (Zeit) und des Parameters Ω (Verletzungsgrad) sind in Abbildung 40 dargestellt:

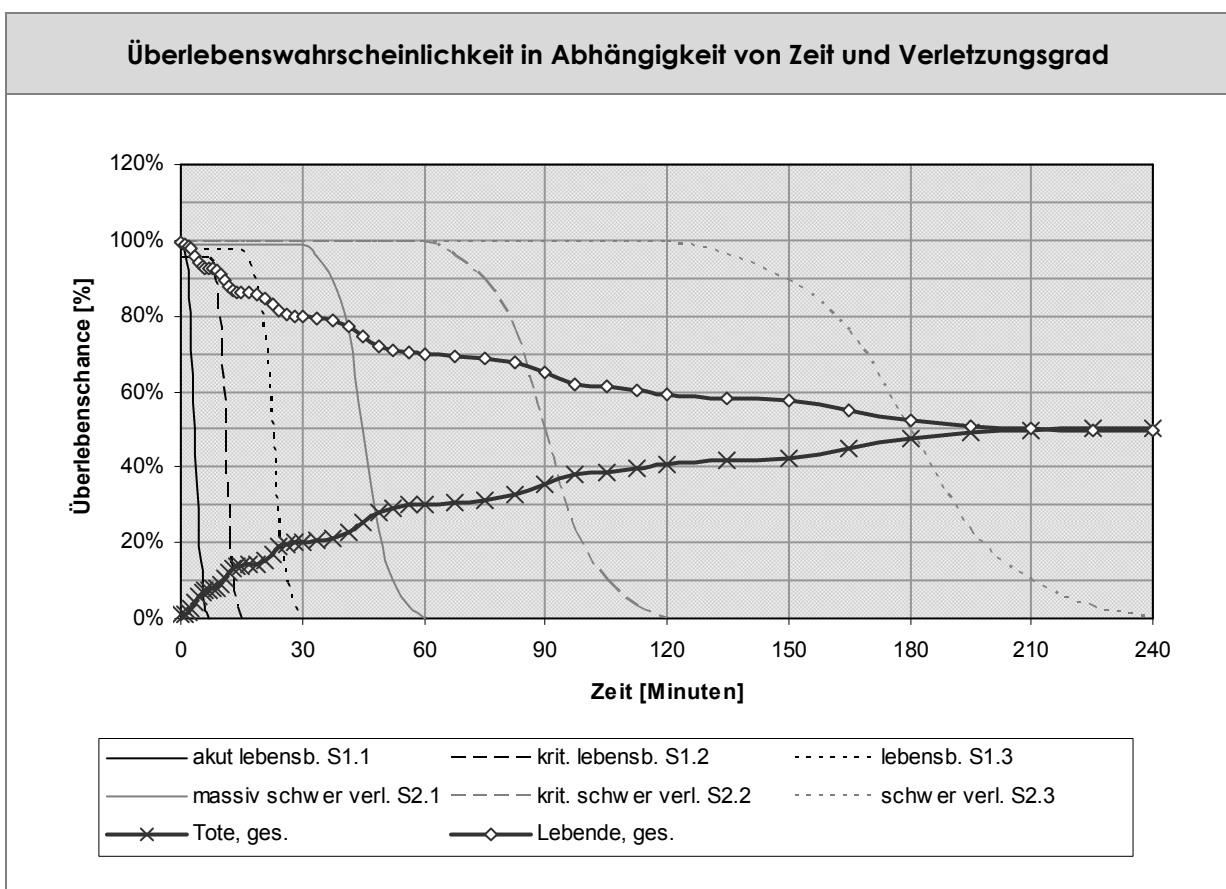


Abbildung 40: Überlebenswahrscheinlichkeit in Abhängigkeit von Zeit und Verletzungsgrad

Sobald die Einsatzkräfte auf verletzte Personen treffen, beginnt die patientengerechte Rettung. Hierunter werden folgende Maßnahmen verstanden:

- Sichtung
- Behandlung vor Ort
- Stabilisierung
- Transport

5. Simulation

Dies hat zur Konsequenz, dass sich die Lage der Passagiere stabilisiert oder zumindest weniger schnell verschlechtert. Es wird folgende Annahme getroffen:

- Bei der Hälfte aller Passagiere tritt eine Stabilisierung des Gesundheitszustandes ein. Die Überlebenswahrscheinlichkeit sinkt bis zur Übergabe an die medizinische Versorgung nicht weiter ab. Dieser Wert wird dann auch für die Auswertung des jeweiligen Unfallszenarios verwendet. Ein typisches Beispiel hierfür wäre eine offene Blutung, die von den Einsatzkräften soweit behandelt wird, dass kein weiterer Blutverlust mehr auftritt.
- Bei der zweiten Hälfte der Passagiere bewirkt die Erstversorgung durch die Einsatzkräfte nur, dass sich die Verschlechterung des Gesundheitszustandes in ihrer Geschwindigkeit reduziert. Hier wird eine Halbierung angenommen. Ein Beispiel wäre ein Verletzter, der von inneren Verletzungen betroffen ist. Trotz optimaler äußerer Versorgung kommt es hier immer noch zu einer Verschlechterung des Zustandes.
- Die Entscheidung darüber, ob durch die Einsatzkräfte eine vollständige Stabilisierung erreicht werden kann, wird zu Beginn jedes einzelnen Unfallszenarios mittels einer Zufallsverteilung festgelegt. Bei der Hälfte aller Passagiere bewirkt das Eingreifen der Einsatzkräfte eine Stabilisierung des Gesundheitszustandes. Hierdurch wird erreicht, dass die Überlebenswahrscheinlichkeit \dot{U}_Q nicht weiter absinkt. Bei der anderen Hälfte vermögen die medizinischen Maßnahmen der Einsatzkräfte lediglich die Rate, mit der die Überlebenswahrscheinlichkeit absinkt, zu halbieren.

b) Variation der individuellen Konstitution

Unabhängig von den Folgen eines Unfalls weisen Menschen eine unterschiedliche körperliche Konstitution auf. Diese wird u. a. maßgeblich durch Alter, Lebenswandel und genetische Determination bestimmt. Bei der Modellierung sind diese Ursachen jedoch nebensächlich. Von Bedeutung ist vielmehr, dass die Passagiere einen Unfall abhängig von ihrer Konstitution unterschiedlich gut oder schlecht überstehen. Um dies zu berücksichtigen, erfolgt eine Variation der Überlebenswahrscheinlichkeit nach dem Zufallsprinzip. Diese wird in einem Intervall von $\pm 10\%$ für alle Passagiere vorgenommen.

c) Verletzungen infolge der Nutzung einer Notrutsche

Verlassen Passagiere das Flugzeug über eine Notrutsche, besteht die Möglichkeit, dass sie sich hierbei (zusätzlich) verletzen. Die Verletzungen treten primär dadurch auf, dass Passagiere, die die Rutsche am Ende nicht sofort verlassen oder davor stehen bzw. liegen bleiben, mit nachfolgend rutschenden Passagieren kollidieren. Stehen an einer Rutsche Einsatzkräfte zur Verfügung, um die Passagiere sofort aus dem Gefahrenbereich zu entfernen, wird im Modell kein Verletzungsrisiko simuliert. Aus diesem Grund teilen sich die Einsatzkräfte bei Evakuierungen auf die verfügbaren Rutschen auf, um hier zusätzliche Verletzungen zu verhindern. Sind jedoch keine Einsatzkräfte an den Rutschen vorhanden, verletzen sich Passagiere mit einer Wahrscheinlichkeit von 10%. In diesem Fall reduziert sich die Überlebenswahrscheinlichkeit um 1%.

5. Simulation

Dies entspricht einem Erwartungswert von einem tödlichen Unfall an den Notrutschen je 1.000 Passagiere, da die kumulierten Überlebenschancen als Vergleichs- und Beurteilungsgröße für den Einsatz-erfolg verwendet werden.

5.2.1.5 Eingeschränkte Fortbewegungsfähigkeit

Eine wesentliche Größe bei Ereignissen ist die Anzahl der Personen, die sich nicht mehr selbst fortbewegen können. Solche Personen werden als „gehunfähig“ bezeichnet. Für die Einsatzkräfte bedeutet dies einen erheblichen Arbeitsaufwand, insbesondere wenn sich die Betroffenen an engen oder schwer zugänglichen Stellen befinden. Das Unvermögen, sich aus eigener Kraft fortzubewegen, kann durch verschiedene Ursachen hervorgerufen werden. Verletzungen wie Knochenbrüche oder schwere Prellungen (auch innere) können hierzu führen. Desorientierung tritt oft auch als Folge von Sauerstoffmangel, Wärme oder Schmerz etc. ein. Ebenso möglich sind Schockzustände. Nicht berücksichtigt wird, dass sich auch „normal“ Behinderte unter den Passagiere befinden können. Welcher Grund dazu führt, dass sich eine Person nicht selbst fortbewegen kann, ist letztlich unerheblich. Entscheidend für die rechnerische Betrachtung ist allein die zeitliche Bindung von Einsatzkräften im Verlauf einer Rettungsmaßnahme. Da die Rettung gehunfähiger Personen sehr arbeits- und zeitintensiv ist, muss sie bei der Bewertung der notwendigen Anzahl an Einsatzkräften hinreichend berücksichtigt werden.

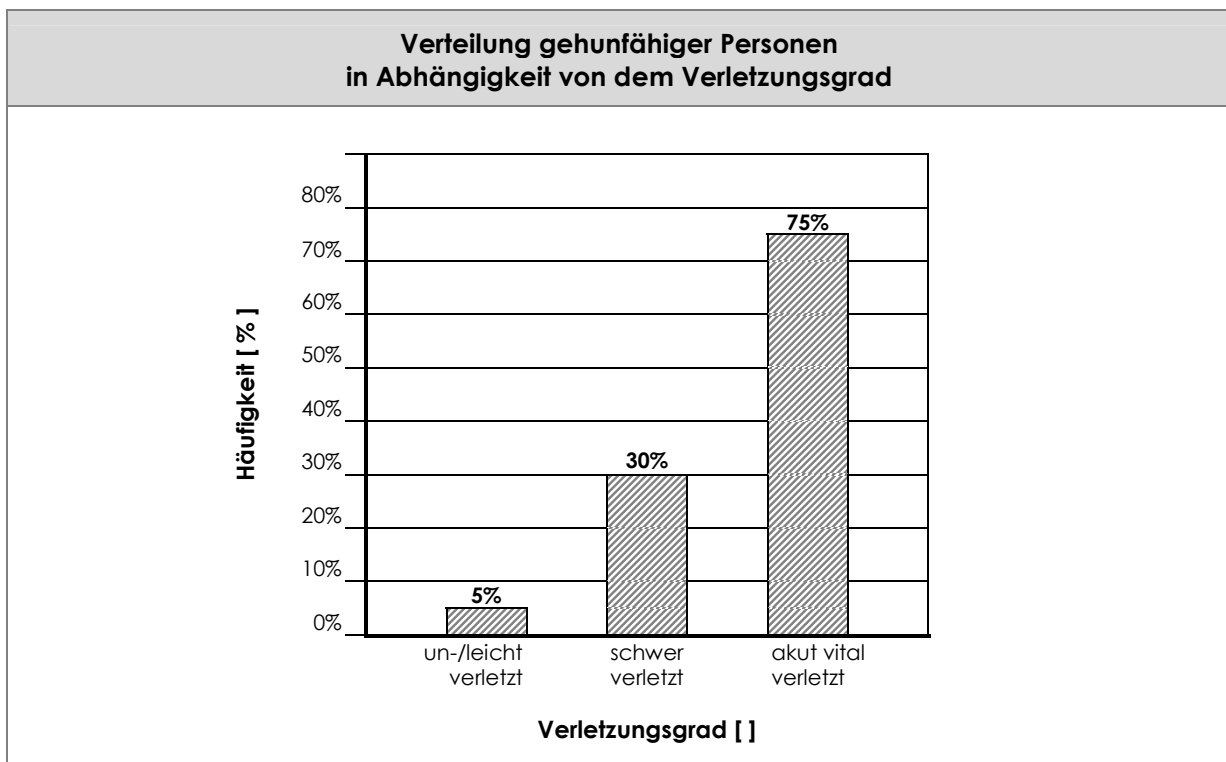


Abbildung 41: Verteilung gehunfähiger Personen in Abhängigkeit von dem Verletzungsgrad

5. Simulation

Da keine Erhebungen bekannt sind, wie viele Flugzeuginsassen sich nach einem Flugzeugunfall durchschnittlich nicht mehr selbst fortbewegen können, muss deren Zahl abgeschätzt werden. In Absprache mit verschiedenen Notärzten (Prof. Dr. Dr. Markus D. W. Lipp, Universitätsmedizin Mainz und Dr. Johannes Blau, Kreiskrankenhaus Hofheim) wurde folgender Ansatz gewählt:

- Der Anteil der gehunfähigen Personen ist abhängig vom Verletzungsgrad. Je schwerwiegender die Verletzungen sind, desto höher ist die Quote der gehunfähigen Flugzeuginsassen. Die Abbildung 41 zeigt, welche Annahmen getroffen wurden. Durch die Kombination der Verletzungsverteilung (Abbildung 37) mit den oben genannten Häufigkeiten für Gehunfähigkeit ergeben sich folgende Werte für die Gesamtheit der Passagiere.

Gehunfähige Passagiere			
Verletzungskategorie der Passagiere	Anteil der Passagiere je Verletzungskategorie	Anteil der Gehunfähigen je Verletzungskategorie	Anteil der Gehunfähigen an der Gesamtpassagierzahl
S1 - akut vital verletzt	15,0%	75,0%	11,25%
S2 - schwer verletzt	22,5%	30,0%	6,75%
S3 - un-/leicht verletzt	37,5%	5,0%	1,88%
S4 - tot	25,0%	0,0%	0,00%
Summe	100,0%	---	19,88%

Tabelle 17: Gehunfähige Passagiere

- Ist eine Person akut vital verletzt, befindet sie sich oft in einer Lage, die zeitintensive Rettungsmaßnahmen erforderlich macht. Oder umgekehrt formuliert: Je schwerwiegender die Verletzung eines Passagiers ist, desto länger dauert es, bis die Einsatzkräfte diesen aus einer Zwangslage befreit oder medizinisch stabilisiert haben und mit dem Transport aus dem Flugzeug beginnen können. Es wird folgender Zusammenhang zwischen dem Verletzungsgrad und der benötigten Zeit bis zum Abtransport angesetzt:

$$t_{\text{Befreiung}} = f_{\text{Befreiung}} \cdot (8 - \Omega) \quad (14)$$

mit:

- $t_{\text{Befreiung}}$ - Zeit in Minuten, die zur Befreiung einer Person aus einer Zwangslage benötigt wird
- $f_{\text{Befreiung}}$ - Befreiungsfaktor (Zufallsvariable zur personenabhängigen Differenzierung des Zeitbedarfs für Rettungen aus Zwangslagen)
- Ω - Verletzungsgrad (Tabelle 16)

Die Einführung des Befreiungsfaktors $f_{\text{Befreiung}}$ und die Verknüpfung mit dem Verletzungsgrad Ω berücksichtigt die Tatsache, dass Rettungsmaßnahmen durchaus unterschiedlich viel Zeit in Anspruch nehmen können.

5. Simulation

Die Verteilung des Befreiungszeitfaktors ist in stark vereinfachter Form an die Verteilung einer Glockenkurve nach Gauß angelehnt (Abbildung 42). In der Simulation wird für jeden Passagier ein Befreiungszeitfaktor mittels einer Zufallsvariable generiert. Somit ist die benötigte Zeit zur Befreiung einer eingeklemmten Person zum einen von der Schwere der Verletzung und zum anderen von einem Zufallswert abhängig.

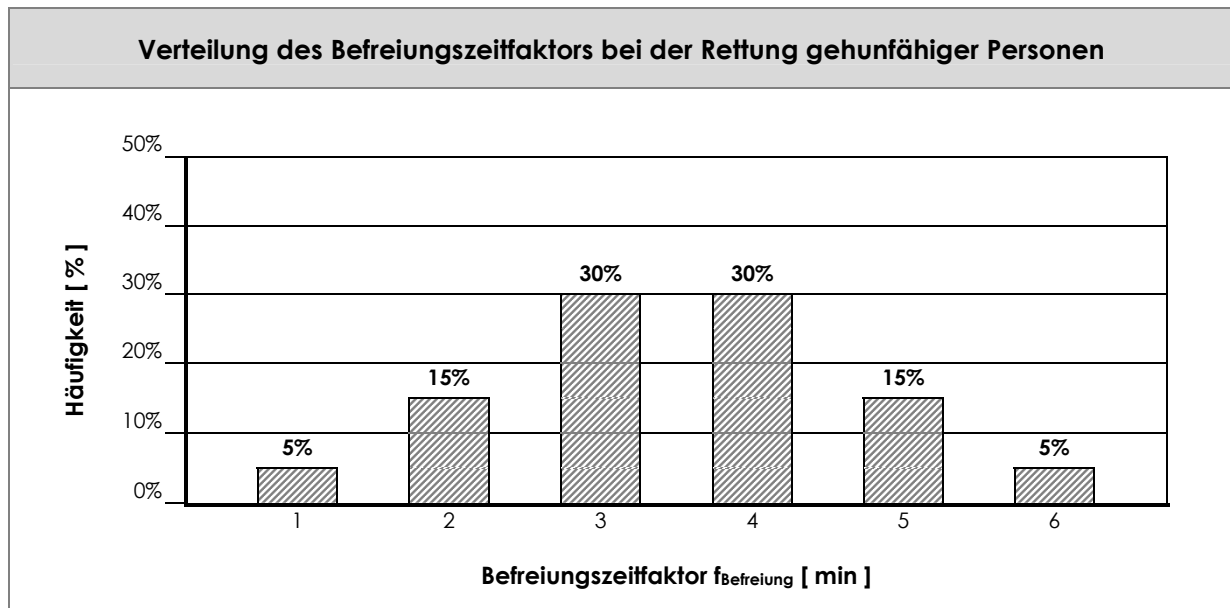


Abbildung 42: Verteilung des Befreiungszeitfaktors bei der Rettung gehunfähiger Personen

- Neben der Verletzung als Ursache dafür, dass Passagiere nicht eigenständig das Flugzeug verlassen oder den Sammelplatz erreichen können, sind auch Zwangslagen dafür verantwortlich. Hierunter werden alle Situationen verstanden, bei denen Personen physisch daran gehindert sind, sich selbstständig fortzubewegen, beispielsweise weil sie eingeklemmt oder eingeschlossen sind. Da das Auftreten von Zwangslagen und Verletzungen i. d. R. stark korreliert, wird auf die Modellierung von verletzungsunabhängigen Zwangslagen verzichtet. Die Personengruppe der un-/leicht verletzten Passagiere befindet sich im oben beschriebenen Modell mit 5% in einer Zwangslage und ist somit auch hinreichend berücksichtigt.
- Bei besonders schweren Unfällen oder besonderen Schadenslagen (z. B. Turnover = „Flugzeug liegt auf dem Rücken“) erhöht sich die Anzahl der gehunfähigen Passagiere. So geschehen bei dem Unfall einer MD-11 der China Airlines in Hongkong am 22. August 1999 [FSF o. J.b]. Bei solchen Szenarien werden die in Abbildung 42 dargestellten Quoten jeweils prozentual erhöht. Die Werte hierfür sind in Tabelle 31 in Abhängigkeit von dem Unfallszenario aufgeführt. Da der Anteil der gehunfähigen Passagiere unter den akut vital verletzten Passagieren bereits bei 75% liegt, findet hier keine Erhöhung mehr statt. Die Modifikation der Quote der gehunfähigen Passagieren wird nur bei un-/leicht verletzten sowie bei schwer verletzten Passagieren vorgenommen.

5. Simulation

5.2.1.6 Passagiervektor zur rechnerischen Umsetzung

Jeder einzelne Passagier wird als selbstständiges Objekt dargestellt, das sich durch eine Reihe von Variablen charakterisieren lässt. Unter Berücksichtigung seiner Umgebung und seines eigenen Zustandes können für jeden Passagier Veränderungen auftreten. Dies betrifft hauptsächlich seinen Aufenthaltsort und seinen körperlichen Zustand. Die mathematische Umsetzung erfolgt für jeden Passagier mittels eines Vektors. Der Passagiervektor $P_{i,n}(t)$ beschreibt den Ort und Zustand des i -ten Passagiers zum Zeitpunkt t im Szenario n .

Alle Passagiervektoren werden in einer Passagiermatrix zusammengefasst, die somit die Gesamtheit aller Passagiere abbildet. Die Passagiervektoren bzw. die Passagiermatrix enthält folgende Angaben zu jedem einzelnen Passagier:

Passagiervektor	
$P_{i,n}(t) =$	
$\begin{pmatrix} i \\ x \\ y \\ z \\ t \\ s \\ m \\ c \\ u \\ e \\ v \\ f \\ h \\ r \end{pmatrix}$	<ol style="list-style-type: none">1. i = Laufende Nummer des Passagiers2. x = X-Koordinate3. y = Y-Koordinate4. z = Z-Koordinate5. t = Türvorwahl (Präferenz für rechts oder links)6. s = Schwere der Verletzung7. m = Zeitpunkt des Beginns der medizinischen Versorgung8. k = Körperliche Konstitution9. g = Gehunfähigkeit10. e = Zwangslage („eingeklemmt“)11. d = Desorientierung12. f = Feuereinwirkung13. w = Wärmeeinwirkung14. r = Brandraucheinwirkung

Abbildung 43: Passagiervektor

Der Vollständigkeit halber ist zu erwähnen, dass die Passagiervektoren darüber hinaus noch einige Werte beinhalten, die aus programmiertechnischen Gründen erforderlich sind. Da diese Werte jedoch nicht die jeweilige Lage eines Passagiers in einer Unfallsituation genauer charakterisieren, sondern nur dazu dienen, Zwischenergebnisse zu speichern, werden sie hier nicht weiter erörtert.

5. Simulation

5.2.2 Einsatzkräfte

Die Einsatzkräfte stellen bekanntlich den Kern der vorliegenden Arbeit dar. In diesem Kapitel erfolgt eine Determination ihrer Handlungsmuster, die es erlaubt, in der Simulation eine Vielzahl von Einsatzkräften rechnerisch darstellen zu können. Die genauen Handlungsoptionen und Entscheidungskriterien werden bei der Erörterung des taktischen Vorgehens beschrieben. Danach wird ermittelt, wie viele Einsatzkräfte für Führungs- und Sicherungsaufgaben benötigt werden und wie viele Einsatzkräfte folglich für direkte Rettungsmaßnahmen zur Verfügung stehen. Zur Erarbeitung einer logischen und funktionierenden Simulation ist es hilfreicher, zuerst ein einfaches, idealisiertes Grundmodell zu entwickeln und dieses dann schrittweise an die Realität anzupassen. Im Anschluss werden daher Überlegungen angestellt, inwieweit die Einsatzkräfte durch die beengten Platzverhältnisse und die damit verbundene Begegnungen in ihren Bewegungsabläufen sowie durch die begrenzte Anzahl an Zugangsmöglichkeiten ins Flugzeug in ihrer Leistungsfähigkeit eingeschränkt werden. Auch der Umstand, dass die Rettungsarbeiten selbst zu Ermüdung und zu Leistungsminderung führen, wird in einem weiteren Schritt betrachtet.

5.2.2.1 Taktisches Vorgehen der Einsatzkräfte

Ganz allgemeingültig lässt sich für die Tätigkeiten der Einsatzkräfte die folgende Aussage treffen: Die primäre Aufgabe der Feuerwehr ist die Rettung von Menschenleben. Oftmals ist es hierzu erforderlich, Löschmaßnahmen durchzuführen, um die Rettung und ggf. eine medizinische Erstversorgung überhaupt erst zu ermöglichen. Danach erfolgt der Transport aus dem Gefahrenbereich und – je nach Zustand – die Übergabe zur weiteren medizinischen Versorgung oder zur sozialen Betreuung.

Die Feuerwehr bzw. Einsatzkräfte nehmen hierzu im Rahmen der Einsatzbewältigung eine Reihe von Aufgaben wahr, die verschiedenen Einheiten zugeordnet sind. Für die Simulation werden folgende Einheiten unterschieden: Großlöschfahrzeuge, Rettungstreppe, Angriffstrupps sowie Technische Einsatzleitung und Führungskräfte. Die Führungskräfte zeichnen sich dadurch aus, dass sie immer den Überblick über die gesamte Lage haben, die richtigen Prioritäten setzen und folglich immer die bestmöglichen Entscheidungen treffen. Die Mannschaften sind stets für Anweisungen erreichbar und führen alle Lösch- und Rettungsmaßnahmen zielsicher durch.

5. Simulation

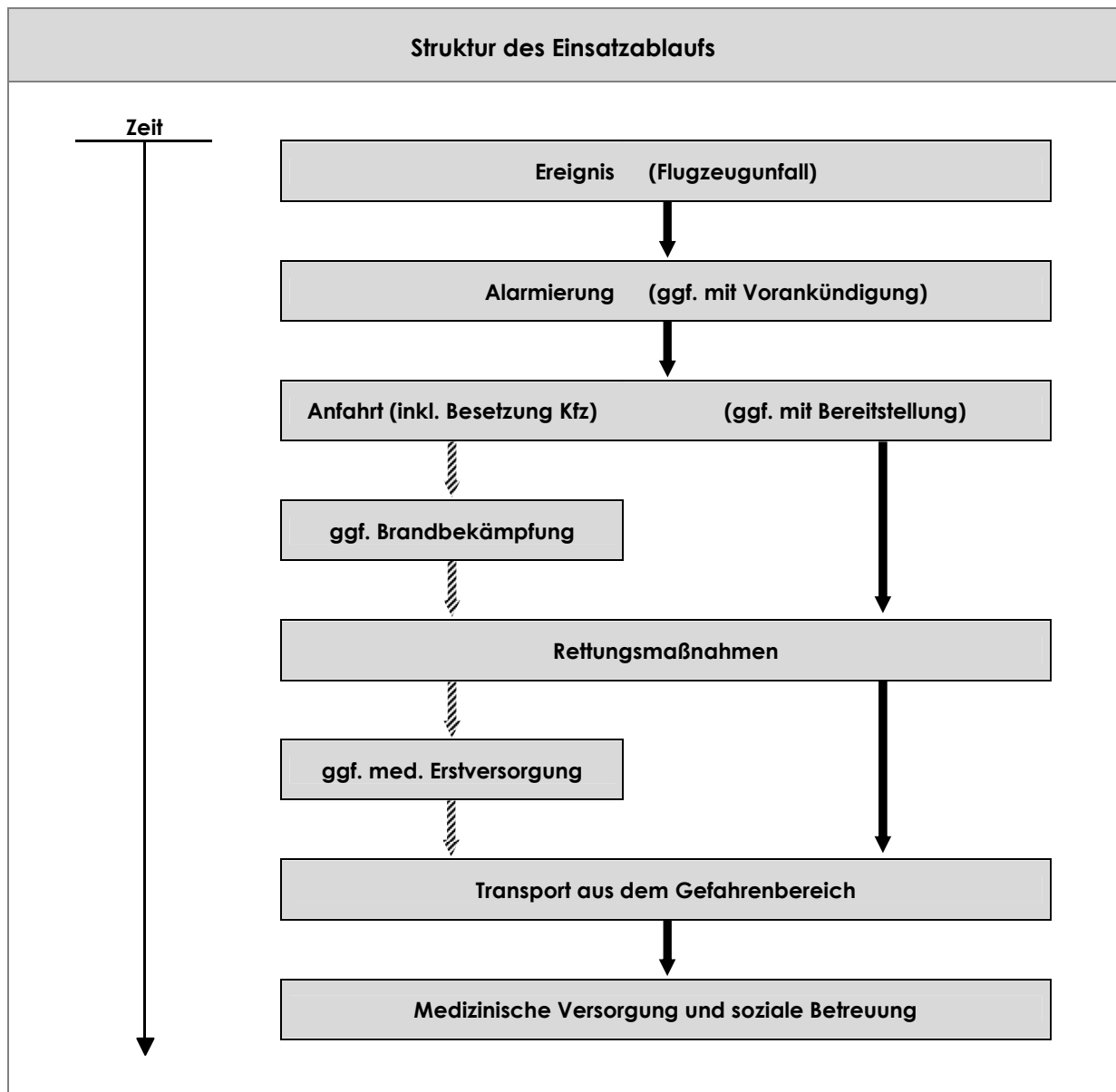


Abbildung 44: Struktur des Einsatzablaufs

Die Handlungsoptionen, Verhaltensregeln und Zeitfestlegungen für das taktischen Vorgehen basieren auf Dokumenten der Flughafenfeuerwehr Frankfurt/Main [FTC o. J. und Hahn 2001], auf Erfahrungen und Einschätzungen von Experten (siehe Expertenverzeichnis) sowie auf Auswertungen von Übungen an der Brandsimulationsanlage und der Flugzeugattrappe (FW3) der Flughafenfeuerwehr Frankfurt/Main. Sie sind im Einzelnen wie folgt definiert:

a) Trupps außerhalb des Flugzeugs

- Die Angriffstrupps sitzen von den Fahrzeugen ab und stehen einsatzbereit am Fahrzeug.

5. Simulation

- Wenn das Flugzeug zugänglich ist (d.h. es brennt nicht mehr unter dem Rumpf oder in direkter Nähe des Flugzeugs) laufen die Angriffstrupps direkt zum Flugzeug.
- Sind die Passagiere noch dabei, das Flugzeug über die Notrutschen zu verlassen oder leitet die Feuerwehr die Evakuierung ein, verteilen sich die verfügbaren Einsatzkräfte auf die Rutschen. Sie geben den Passagieren Hilfestellung, damit diese das Ende der Rutsche möglichst schnell verlassen. Dies dient dazu, Kollisionen mit nachrutschenden Passagieren und dadurch resultierende Verletzungen zu vermeiden (Kapitel 5.2.2.1).
- Die Rettungstreppe fährt die erste (vom Flugzeugbug aus nach hinten gezählt) Tür an, an der keine Rutsche aktiviert wurde und geht dort in Stellung. Die Rüstzeit der Rettungstreppe, also die Zeit, bis die Treppe ausgefahren und begehbar ist, beträgt 2:00 Minuten (4 Zeiteinheiten).
- Der erste Angriffstrupp (oder der nächstgelegene, wenn mehrere vorhanden sind) verschafft sich mittels der (zweiteiligen) Steckleiter Zugang zur Tragfläche und dringt im weiteren Verlauf über die Nottür am Flügel (over wing exit) in das Flugzeug vor.
- Ist eine Rettungstreppe vorhanden, betreten die Angriffstrupps, die die benachbarten Türen als Angriffsweg bzw. Einsatzziel haben, das Flugzeug über die Rettungstreppe anstatt über die Rutschen ins Flugzeug zu gelangen.
- Sind Rutschen vorhanden (d.h. ausgelöst worden), gelangen die Angriffstrupps über diese in das Flugzeug. Hierfür benötigt ein Angriffstrupp 1:00 Minute (2 Zeiteinheiten), zum Verlassen ebenso.
- Es kann jeweils nur ein Angriffstrupp eine Rutsche zeitgleich nutzen.
- Während Passagiere das Flugzeug über die Rutsche verlassen, kann die Rutsche nicht von Feuerwehreinheiten genutzt werden.
- Das Abseilen von Verletzten aus dem Flugzeug und das Retten über Steckleitern wird ausgeschlossen.
- Ist in dem Feld, in dem sich ein Trupp befindet, kein Zugang zum Flugzeug vorhanden, läuft der Trupp das Flugzeug von vorne nach hinten ab und nimmt den nächstgelegenen Zugang. Ist das Ende des Flugzeugs erreicht, umrundet der Trupp dieses und sucht auf der anderen Seite in gleicher Weise weiter.
- Trupps, die sich bereits wieder außerhalb des Flugzeugs befinden und einen Passagier mit sich führen, benötigen 1:00 Minute (2 Zeiteinheiten), um diesen zur Verletztenablage zu bringen und dort der medizinisch-sozialen Betreuung zu übergeben.
- Der Wechsel eines Pressluftatmers am Sammelplatz einschließlich kurzer Regenerations- und Trinkpause (beide Punkte sind äußerst wichtig für die Aufrechterhaltung der Leistungsfähigkeit im weiteren Einsatzverlauf) wird mit 4:00 Minuten (8 Zeiteinheiten) angenommen.

5. Simulation

b) Trupps innerhalb des Flugzeugs

- Die Angriffstrupps suchen das Flugzeug von vorne (d.h. von ihrem Eintrittspunkt) nach hinten ab.
- Für das Absuchen eines Sektors (ca. 4 Meter) benötigt ein Trupp 0:30 Minute (1 Zeiteinheit). Dieser Wert verdoppelt sich, wenn das Flugzeug über zwei Gänge verfügt. Die Zeit zum Absuchen vervierfacht sich, wenn die Kabine stark verraucht ist. Beide Erhöhungen der Absuchzeit sind unabhängig voneinander und können gleichzeitig eintreten. Dies würde dann einen Zeitbedarf von 4:00 Minuten (8 Zeiteinheiten) für das Absuchen eines verrauchten Sektors in einem Flugzeug mit zwei Gängen durch einen Trupp erforderlich machen.
- Findet ein Trupp einen Passagier, der nicht in der Lage ist, das Flugzeug aus eigener Kraft zu verlassen, wird der Trupp diesen zur Rettung aufnehmen, bis zum Sammelplatz bringen und dort der medizinisch-sozialen Versorgung übergeben. Hierbei ist es unerheblich, aus welchem Grund der Passagier die Fähigkeit verloren hat, das Flugzeug aus eigener Kraft zu verlassen. Mögliche Gründe sind die Schwere seiner Verletzung, eine Zwangslage (der Passagier ist eingeklemmt oder von Trümmerteilen eingeschlossen), Bewusstlosigkeit oder Desorientierung. Letzteres ist auf Grund eines Schockzustandes oder durch die Intoxikation von Atemgiften (also das Einatmen von Brandrauch) denkbar.
- Die Zeit, die ein Trupp zur Aufnahme eines verletzten Passagiers bzw. zur Befreiung aus einer Zwangslage (einschließlich der medizinischen Erstversorgung) benötigt, ist in Kapitel 5.2.1.5 beschrieben.
- Trupps, die einen Passagier retten, benötigen 0:30 Minute (1 Zeiteinheit) je Sektor. Sie gehen den Weg, den sie gekommen sind, zurück und nehmen hierbei den ersten möglichen Ausgang aus dem Flugzeug.
- Zum Verlassen des Flugzeugs über eine Rettungstreppe wird – wie beim Betreten auch – 0:30 Minute (1 Zeiteinheit) benötigt.
- Steht nur eine Rutsche zum Verlassen des Flugzeugs zur Verfügung, so beträgt der Zeitbedarf 1:00 Minute (2 Zeiteinheiten).
- Es wird angenommen, dass alle Einsatzkräfte unter Pressluftatmer (also mit umgebungs- unabhängiger Luftversorgung) vorgehen.
- Der Luftverbrauch und damit die Zeitdauer, die der Träger das Gerät nutzen kann, ist zum einen von persönlicher Kondition und körperlicher Belastung und zum anderen von Flaschenvolumen und Fülldruck abhängig. Vereinfacht wird angenommen, dass alle Trupps mindestens 18:00 Minuten (36 Zeiteinheiten) arbeiten können, bevor sie das Gerät wechseln müssen. Der Wechsel des Pressluftatmers erfolgt jeweils, sobald ein Trupp den Sammelplatz erreicht und die Zeitdauer von 18:00 Minuten (36 Zeiteinheiten) überschritten hat.
- In Bereichen, die bereits abgesucht wurden, können sich Trupps, die keinen Passagier retten, mit bis zu drei Sektoren pro Zeiteinheit fortbewegen.

5. Simulation

- Die Priorität der Trupps ist erstens Löschen, zweitens Türen Öffnen, drittens Retten und viertens Absuchen. Das bedeutet, dass ein Trupp zunächst mit dem Absuchen beginnt. Passiert er hierbei eine Flugzeugtür, versucht er diese zu öffnen (Kapitel 5.2.2.1), um weitere Zugangsmöglichkeiten bzw. Rauchabzugsöffnungen (Kapitel 5.2.4.5) zu schaffen. Findet der Trupp einen Passagier, der nicht selbstständig das Flugzeug verlassen kann, nimmt er diesen zur Rettung auf. Der Trupp bricht dann vorerst das Absuchen ab und bringt den Passagier zur Verletztenablage. Brennt es im Flugzeug, so wird der Trupp als Erstes Löschmaßnahmen vornehmen. Nachdem der Brand gelöscht ist, wird das Flugzeug weiter abgesucht.
- Die Löschdauer ist der verschiedenen Brandszenarien sind jeweils in Kapitel 5.2.4 beschrieben.

c) Flughafenlöschfahrzeuge

Auch wenn es bei einem Flugzeugunfall nicht zu einem Brand gekommen ist, muss jederzeit mit einem unmittelbaren Brandausbruch gerechnet werden. Die Kombination aus großen Mengen an Treibstoff, die oftmals infolge der mechanischen Belastung freigesetzt werden, und einer Reihe potenzieller Zündquellen wie heiße Oberflächen und Kurzschlüsse, stellen eine unmittelbare Gefahrenquelle dar. Folglich ist der Brandschutz auch bei einem nicht brennenden Flugzeug sicherzustellen. Die Aufstellung der Löschfahrzeuge erfolgt hierbei wie im Brandfall. Die wesentliche Schlussfolgerung daraus lässt sich vereinfacht folgendermaßen zusammenfassen: „Ein nicht brennendes Flugzeug wird wie ein brennendes Flugzeug behandelt“. Die (Groß-) Flughafenlöschfahrzeuge (im Weiteren soll der Einfachheit halber die gebräuchliche Abkürzung FLF verwendet werden) arbeiten daher nach folgenden Gesetzmäßigkeiten:

- Die FLFs treffen in der Regel zuerst bzw. mit den ersten Fahrzeugen ein.
- Die Eingreifzeit der FLFs (des ersten Zugs, wenn mehrere vorhanden sind) ergibt sich aus den Parametern, die ein Unfallszenario beschreiben (Tabelle 31).
- Die FLFs nehmen automatisch die richtige Position ein. Richtiges, der Situation angepasstes Handeln wird immer vorausgesetzt. Die grundsätzliche Aufstellung der Fahrzeuge ist der Tabelle 4 zu entnehmen. Diese erfolgt unabhängig davon, ob ein Brand vorhanden ist oder nicht.
- Die FLFs bleiben während der gesamten Rettungsmaßnahmen einsatzbereit in ihrer Position und stellen die Löschbereitschaft sicher.
- Als Basis zur Ermittlung der effektiven Löschleistung der FLF dient der Wert von 6 Litern Wasser-Schaum-Gemisch pro Minute und Quadratmeter. Dies ist ein Standardwert bei der Bekämpfung von Flüssigkeitsbränden (z. B. Tanklagern) und kann daher auch für die Simulation verwendet werden. In Verbindung mit der (Wasser-) Ausstoßrate und dem mitgeführten Wasservolumen ergibt sich hieraus die Löschleistung der FLFs.
- Es ist jedoch zu beachten, dass die effektive Löschleistung geringer ist als der theoretisch ermittelbare Wert. Zwei Gründe lassen sich hierfür benennen:

5. Simulation

- Zum einen lässt sich die Beaufschlagung des Brandes mit Löschmittel nicht so präzise durchführen, wie es rechnerisch wünschenswert wäre, und zum anderen tritt durch den Luftwiderstand bei jedem Wasserstrahl ein Verlust auf, der die Wassermenge, die den Brandort erreicht, reduziert. Es wird angenommen, dass die Besetzung der FLFs ebenfalls Einfluss auf die Löschleistung hat. Die FLFs können mit ein oder zwei Einsatzkräften (EK) besetzt werden. Bei einer Besetzung mit zwei Einsatzkräften wird eine Effektivität von 67% angenommen. Bei einer Besetzung mit nur einem Mann reduziert sich die Effektivität auf 50%. Grund hierfür ist, dass eine einzelne Einsatzkraft nicht ihre volle Konzentration fürs Löschen verwenden kann, sondern außerdem noch fahren bzw. rangieren und ggf. funken muss.
- Gleichzeitig fehlt ein zweiter Mann, der zusätzlich die Lageentwicklung sowie den Löscherfolg beobachtet und ggf. regulierend eingreift. Hierdurch vermindert sich unweigerlich die Effektivität der Löschmaßnahmen, obwohl die gleiche Wassermenge ausgestoßen wird.
- Für die technischen Werte der FLFs gibt es keine eindeutigen Festlegungen, die eine realitätsnahe Modellierung in der Simulation ermöglichen würden. Die Vorgaben der ICAO (Tabelle 1) definieren zwar die Mindestanforderungen (für alle Fahrzeuge in Summe), diese werden aber in der Praxis bereits von Fahrzeugen der vorherigen Fahrzeuggeneration deutlich übertroffen. Zudem gibt es nicht für jede Flughafenkategorie der ICAO eine zugehörige Fahrzeugklasse. Die verfügbaren Wassermengen und Ausstoßleistungen werden daher in Abhängigkeit vom Bemessungsflugzeug wie folgt festgelegt.

Löschkapazität der FLF in Abhängigkeit von der Flugzeugklasse						
Klasse des Bemessungsflugzeugs	Fahrzeugdaten FLF		Löschkapazität *1 *2 [Flächeneinheiten à 108m ²]			
	Ausstoß [Liter / min]	Tankvolumen [Liter]	pro Zeiteinheit *3		gesamt	
			1 EK (50%)	2 EK (67%)	1 EK (50%)	2 EK (67%)
1 (2 Türen)	6.000 (5.000) *4	6.000 (5.600) *4	2	3	5	6
2 (3 Türen)	6.000 *5	8.000 *5	2	3	6	8
3 (4 Türen)	6.000 *6	12.000 *6	2	3	9	12
4 (5 Türen)	6.000 *6	12.000 *6	2	3	9	12

Tabelle 18: Löschkapazität der FLF in Abhängigkeit von der Flugzeugklasse

5. Simulation

- *1 Da in der Simulation jede Flächeneinheit ($\approx 108 \text{ m}^2$) nur einen Zustand annehmen kann (brennt oder brennt nicht bzw. gelöscht) muss die Löschkapazität in natürlichen Zahlen angegeben werden. Hierbei können durch Rundungseffekte Ergebnisse zustande kommen, die sich nicht direkt aus den anderen Werten der Tabelle 18 herleiten lassen.
- *2 Es wird die Verwendung von AFFF („Aqueous Film Forming Foam“), also eines wasserfilm-bildenden Schaummittels, gemäß Tabelle 1 angenommen.
- *3 Eine Zeiteinheit beträgt 0:30 Minute. Dies ist zu beachten, da die Leistungsdaten der Fahrzeuge von den Herstellern in der üblichen Einheit „Liter pro Minute“ angegeben werden.
- *4 In Anlehnung an den Panther 4x4 [Rosenbauer o. J.]
- *5 In Anlehnung an den Z6 [Ziegler o. J., S. 1]
- *6 In Anlehnung an den Simba 8x8 [Münch 2005, S. 1]

5.2.2.2 Anzahl der verfügbaren Angriffstrupps

Die Anzahl der Trupps, die für Rettungsmaßnahmen im Flugzeug zur Verfügung stehen, hängt von drei Faktoren ab und zwar von der Gesamtanzahl der Einsatzkräfte, dem Zeitpunkt, an dem die Einsatzkräfte den Einsatzort erreichen, und der Aufgabenverteilung unter den Einsatzkräften. Die Anzahl der Einsatzkräfte insgesamt wird in der Simulation variiert (Kapitel 4.2 und Abbildung 28).

a) Eintreffzeiten der Einsatzkräfte

Die Einsatzkräfte lassen sich in der Simulation in drei Gruppen aufteilen, für die jeweils unterschiedliche Eingreifzeiten möglich sind (der Begriff „Gruppe“ wird hierbei nicht im Sinne einer taktischen Einheit mit einer fest definierten Anzahl an Einsatzkräften verwendet, sondern als Sammelbegriff für die nach ihren Eintreffzeiten unterschiedenen Einheiten). Die Anzahl von drei Gruppen ergibt sich aus folgenden Überlegungen:

- Einsatzkräfte, die für den Flugzeugbrandschutz verantwortlich sind, werden aufgrund der Vorgaben durch die ICAO sehr schnell den Schadensort erreichen. Die ICAO fordert für den Brandschutz eine Eingreifzeit von 2:00 bzw. maximal 3:00 Minuten (4 bzw. 6 Zeiteinheiten) bei günstigen Sicht- und Witterungsverhältnissen. Entsprechend sind die Flughafenfeuerwehren an Flughäfen positioniert und organisiert. Da die Flughafenlöschfahrzeuge unmittelbar bei Eintreffen mit den Löscharbeiten beginnen können, entspricht die Eingreifzeit der Eintreffzeit. In der Realität herrschen jedoch nicht immer günstige Sicht- und Witterungsverhältnissen. Nebel und Dunkelheit aber auch Regen, Schnee und Frost können zu signifikanten Verlängerungen der Eingreifzeiten führen. Die Eingreifzeit der ersten Gruppe wird daher für jedes Unfallszenario anhand der statischen Elemente wie z. B. Entfernung zur Schadensstelle oder Sicht- und Witterungsverhältnisse separat ermittelt. Die hierfür relevanten Parameter sowie deren zahlenmäßiger Einfluss ist in Tabelle 31 dargestellt.

5. Simulation

- Verfügt der Flughafen darüber hinaus noch über zusätzliche Kräfte wie z. B. weitere Einheiten zur Flugzeugbrandbekämpfung, die an einer anderen Stelle stationiert sind, oder Einheiten für den allgemeinen Brandschutz (Gebäudebrandschutz, technische Hilfeleistung, Umweltschutz), so werden diese Einheiten kurze Zeit später an der Schadensstelle eintreffen. Da deren Anfahrt zur Einsatzstelle unter den gleichen Sicht- und Witterungsverhältnissen erfolgt, unterscheidet sich die Eingreifzeit nur durch einen absoluten Zeitwert (der natürlich an jeden Flughafen angepasst werden kann). In der Simulation wird er mit einem Basiswert von 2:00 Minuten (4 Zeiteinheiten) für normale Fahrverhältnisse angenommen. Verfügt ein Flughafen nicht über Einsatzkräfte, die der Gruppe zugeordnet werden können, wird die Personalstärke an dieser Stelle einfach auf null gesetzt.
- Die dritte Gruppe stellen die öffentlichen Feuerwehren dar, die bei Flugzeugunfällen größeren Ausmaßes immer alarmiert werden. Der Zeitpunkt, an dem die öffentlichen Einsatzkräfte an der Schadensstelle eintreffen, kann frei gewählt werden. Die Grundeinstellung beträgt hier 25:00 Minuten (50 Zeiteinheiten) nach Unfalleintritt.

b) Funktionen der Einsatzkräfte

Für die rechnerische Zuordnung werden alle zur Verfügung stehenden Einsatzkräfte in eine der vier Funktionsgruppen „Führung“, „Flughafenlöschfahrzeuge“, „Rettungstreppe“ oder „Angriffstrupp“ eingeteilt.

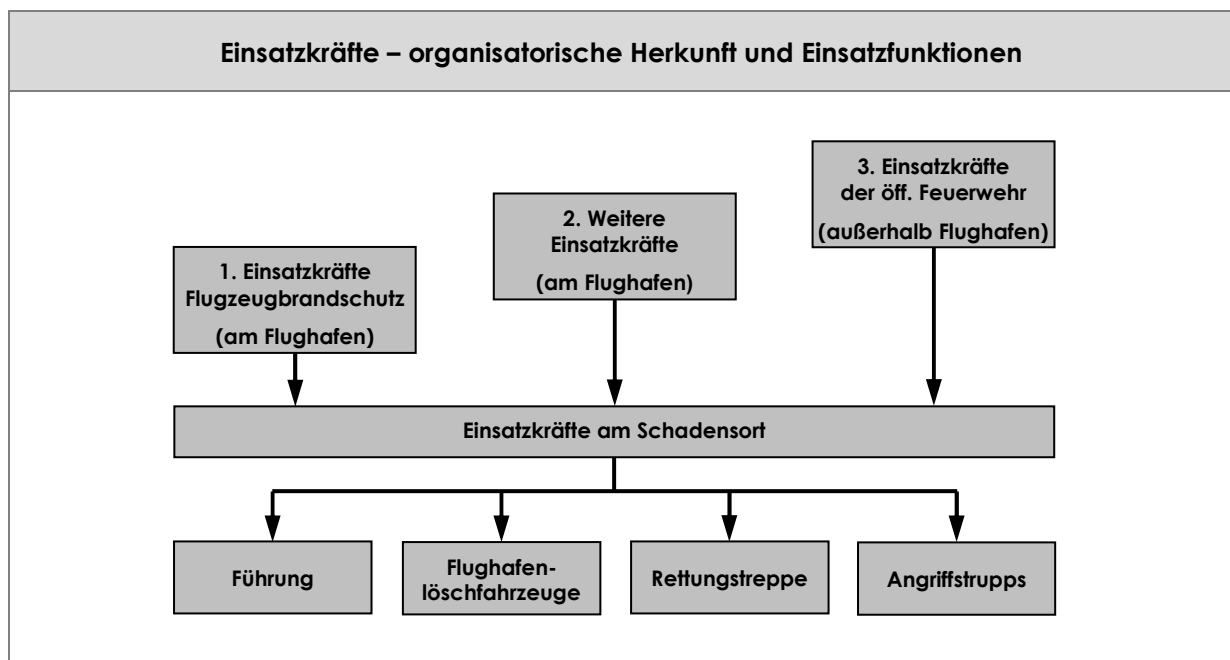


Abbildung 45: Einsatzkräfte – organisatorische Herkunft und Einsatzfunktionen

Um zu ermitteln, wie viele Einsatzkräfte zum Absuchen des Flugzeugs und zum Retten von Passagieren effektiv zur Verfügung stehen, wird folgender Ansatz gewählt:

5. Simulation

- Die FLFs bleiben während des gesamten Einsatzes besetzt, um jederzeit löschbereit zu sein. Pro verfügbarem FLF ist somit je nach gewählter Besetzung ein oder zwei Mann gebunden.
- Die Besetzung der Rettungstreppe (ein Mann pro Fahrzeug) steht nach der Positionierung des Fahrzeugs als weitere Einsatzkraft für Rettungsarbeiten am und im Flugzeug zur Verfügung.
- Die Führungskräfte aller Ebenen sind mit Führungs- und Koordinationsaufgaben gebunden. Sie stehen nicht für direkte Lösch- und Rettungsarbeiten zur Verfügung, wenngleich sie diese auch direkt vor Ort leiten.
- Die Anzahl der verfügbaren Einsatzkräfte, die zur Bereitstellung von Angriffstrupps verwendet werden können, ergibt sich auf der Gesamtanzahl an Einsatzkräften abzüglich der Führungskräfte und der FLF-Besetzung.

c) Anzahl der Führungs- und Einsatzkräfte

Die Feuerwehr ist wie alle operativen Einheiten der Gefahrenabwehr hierarchisch aufgebaut. Für die Gliederung solcher Organisationen wird die Führungsspanne (FüSp) nach der so genannten „2-bis-5er-Regel“ festgelegt [IdF NRW 2000, S. 25]. Diese besagt, dass eine Person nur zwischen zwei und fünf Personen bzw. Einheiten sinnvoll führen kann (Abbildung 46).

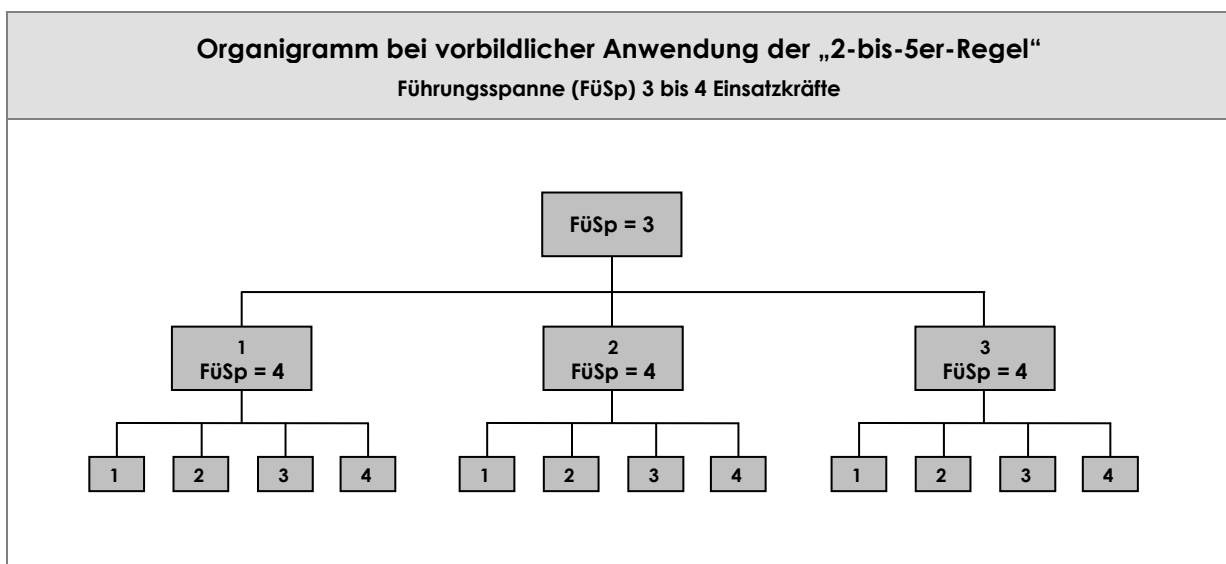


Abbildung 46: Organigramm bei vorbildlicher Anwendung der „2-bis-5er-Regel“

Dies lässt sich folgendermaßen erklären. Das Führen einer einzigen Person, die damit im Prinzip nur als „Durchreicher“ von Informationen in beide Richtungen dient, ist wenig zweckmäßig. In diesem Fall könnte der Führer die Befehle auch direkt an die Einheit geben und die Rückmeldungen von dort erhalten, ohne einen Unterführer „zwischenzuschalten“ (Abbildung 47). Beim Führen von mehr als fünf Einheiten wird die Grenze der Leistungsfähigkeit des Führers schnell erreicht.

5. Simulation

Die Menge an eingehenden Informationen, notwendigen Beurteilungen und Entscheidungen sowie erforderlichen Befehlen übersteigt quantitativ das Leistungsvermögen einer einzelnen Person (Abbildung 47). Aus diesen Gründen wird empfohlen, die Zahl der Einheiten, die einer Person unterstellt sind, zwischen zwei und fünf zu wählen (Abbildung 46). Diese Forderung wird auch bei der rechnerischen Umsetzung der Simulation berücksichtigt.

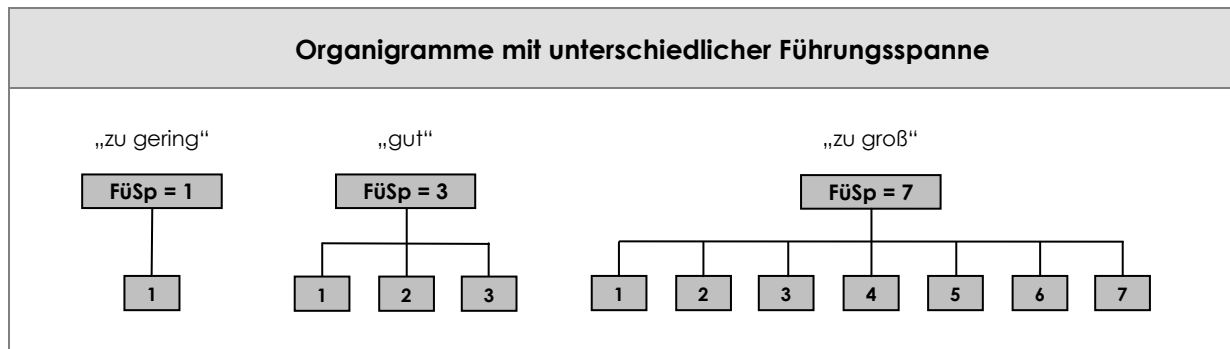


Abbildung 47: Organigramme mit unterschiedlicher Führungsspanne

Da die Größe einer Einheit von ihren Aufgaben abhängt und somit durchaus unterschiedlich ausfallen kann (die Fahrzeugbesetzung bei der Feuerwehr variiert beispielsweise zwischen eins und neun), und die Simulation darüber hinaus die verfügbaren Einsatzkräfte in einer Schleife hochzählen soll, muss eine rechnerische Lösung gefunden werden, die es ermöglicht, die Führungsspanne realitätsnah gemäß der „2-bis-5er-Regel“ zu berücksichtigen. Hierzu wird folgender Ansatz gewählt:

Es wird davon ausgegangen, dass die „2-bis-5er-Regel“ eingehalten wird. Jede Führungskraft befehligt rein rechnerisch im Durchschnittlich 3,5 Personen (bzw. Einheiten). Diese befehlen selbst wiederum 3,5 Personen und so weiter. Dieser abstrakte Wert ergibt sich aus der mathematisch aus einer idealtypischen Führungsspanne gemäß der „2-bis-5er-Regel“. Die Führungsebenen werden von der Mannschaftsebene aufsteigend nummeriert, auch wenn in vielen Organisationen in umgekehrte Richtung (oberste Führungskräfte = Ebene 1) gezählt wird. Die Tabelle 19 verdeutlicht die Nummerierung.

Ermittlung der Anzahl der Führungskräfte der ersten Ebene e_1 aus der Anzahl von Einsatzkräften in der Mannschaft e_0 mit:

$$e_1 = \frac{2}{7} e_0 \quad (15)$$

mit:

- e_0 - Anzahl der Einsatzkräfte in der Mannschaft
- e_1 - Anzahl der Führungskräfte der Ebene 1 (also direkt über der Mannschaftsebene)

5. Simulation

Allgemein lässt sich folgender Zusammenhang zwischen der Anzahl der Einsatzkräfte auf Mannschaftsebene und der Führungskräfteanzahl der n-ten Ebene definieren:

$$e_n = \left(\frac{2}{7}\right)^n \cdot e_0 \quad (16)$$

mit:

e_n - Anzahl der Führungskräfte n Ebenen über der Mannschaft

Die Summe aller Einsatzkräfte kann somit wie folgt berechnet werden:

$$e = e_0 + \frac{2}{7} \cdot e_0 + \left(\frac{2}{7}\right)^2 \cdot e_0 + \dots + \left(\frac{2}{7}\right)^n \cdot e_0 \quad (17)$$

mit:

e - Anzahl aller Einsatzkräfte

Die Gesamtanzahl an Einsatzkräften besteht also aus der Summe von Potenzen mit einer einheitlichen Basis (Anzahl Einsatzkräfte auf Mannschaftsebene) und einem einheitlichen Faktor a , deren Exponent alle natürlichen Zahlen von null bis n durchläuft. Wie man sieht, handelt es sich um eine geometrische Reihe der Form:

$$s_n = a + aq + aq^2 + \dots + aq^n \quad (18)$$

Da das Konvergenzkriterium ($|q| < 1$) mit $q = 2/7$ eingehalten ist, kann hier die folgende Vereinfachung angewendet werden:

$$s = \lim_{n \rightarrow \infty} s_n = \lim_{n \rightarrow \infty} a \frac{1 - q^n}{1 - q} = \frac{a}{1 - q} \quad (19)$$

Damit ergibt sich die vereinfachte Form:

$$e = \frac{e_0}{1 - \frac{2}{7}} = \frac{7}{5} \cdot e_0 \quad (20)$$

mit:

$a = e_0$ - Anzahl der Einsatzkräfte in der Mannschaft

$q = 3,5 (= 2/7)$ - Führungsspanne

5. Simulation

Für die Simulation ist jedoch entscheidend, wie viele Einsatzkräfte der Mannschaftsebene zur Verfügung stehen, da diese die Besetzung der Flughafenlöschfahrzeuge stellen und die Angriffstrupps bilden, die zur Menschenrettung und zu Löschmaßnahmen am Flugzeug vorgehen. Die gesuchte Anzahl ergibt sich aus der Umformung der Formel (20).

$$e_0 = \frac{5}{7} \cdot e = 0,714 \cdot e \quad (21)$$

Wird das Verhältnis r der Einsatzkräfte auf Mannschaftsebene e_0 zu der Gesamtanzahl der Einsatzkräfte e für eine einstelligen Zahl von Führungsebenen unter Verwendung der Formel

$$r = \frac{e_0}{e} = e_0 \cdot \frac{1}{\sum_{i=0}^n e_i} = \frac{e_0}{e_0 + e_1 + e_2 + \dots + e_n} \quad (22)$$

mit:

- r - Verhältnis (Relation) von Mannschaft zur Summe aller Führungskräfte
- n - Anzahl Führungsebenen

berechnet, so ergibt sich die Tabelle 19. Bei der Betrachtung der zeigt sich, dass das Verhältnis von Mannschaft zur Gesamtanzahl an Einsatzkräften gegen den Grenzwert 0,714 (= 71,4%) strebt, der bereits in Formel (21) enthalten ist. Dieses Ergebnis überrascht zunächst, da – relative gesehen – mit jeder zusätzlichen Führungsebene die Anzahl der Führungskräfte stärker wächst als die Anzahl der Einsatzkräfte auf Mannschaftsebene.

Verhältnis von Einsatz- und Führungskräften				
Anzahl der Führungsebenen	Mannschaft	Summe aller Einsatzkräfte	Summe der Führungskräfte	Verhältnis Mannschaft zu Sum. Einsatzkräfte
n	e_0	e	$\Sigma e_1 \text{ bis } e_n$	$e_0 \text{ zu } e$
0	1,0	1,0	0,0	100,000%
1	3,5	4,5	1,0	77,778%
2	12,3	16,8	4,5	73,134%
3	42,9	59,6	16,8	71,908%
4	150,1	209,7	59,6	71,565%
5	525,2	734,9	209,7	71,467%
6	1.838,3	2.573,2	734,9	71,440%
7	6.433,9	9.007,1	2.573,2	71,432%
8	22.518,8	31.525,9	9.007,1	71,430%

Tabelle 19: Verhältnis von Einsatz- und Führungskräften

5. Simulation

Ab einer Einsatzkräfteanzahl oberhalb von tausend ist der absolute Zuwachs der Führungskräfte jedoch unerheblich im Vergleich zur Gesamtanzahl aller Einsatzkräfte. Des Weiteren zeigt sich, dass der Bereich zwischen zwei und drei bzw. zwischen zwei und vier Führungsebenen auf Grund der Gesamtanzahl an Einsatzkräften für die vorliegende Aufgabenstellung besonders interessant ist. Hier entspricht die Summe aller verfügbaren Einsatzkräfte der Größenordnung, mit der auch bei realen Ereignissen i. d. R. zu rechnen ist. Da in diesem Bereich das Verhältnis von Einsatzkräften der Mannschaftsebene zur Gesamtanzahl der Einsatzkräfte noch nicht den Grenzwert von 71,4% erreicht hat, sondern sich noch erkennbar verändert, wird für die Modellierung folglich eine Berechnungsmethode gesucht, die diese Veränderung berücksichtigt. Es wird daher mit Hilfe der Regressionsrechnung eine Formel gesucht, die primär für den Bereich zwischen zwei und vier Führungsebenen das Verhältnis zwischen Mannschaft und Gesamtanzahl realitätsnah ermitteln kann. Unter dieser Maßgabe ergibt sich mittels linearer Regression die folgende Formel:

$$e_0 = 0,7143 \cdot e + 0,243 \quad (23)$$

Diese Funktion soll bei der Programmierung der Computersimulation verwendet werden, um bei einer gewählten Anzahl von Einsatzkräften die Anzahl der Einsatzkräfte auf Mannschaftsebene zu ermitteln, die zu „händischen“ Arbeiten eingesetzt werden können.

5.2.2.3 Leistungsfähigkeit der Angriffstrupps

Eine wichtige Größe bei der Modellierung der Einsatzkräfte ist deren Leistungsfähigkeit. Es ist selbsterklärend, dass leistungsfähige Einsatzkräfte ihre Aufgabe besser erfüllen können als leistungsschwache oder leistungsgeminderte Einsatzkräfte. Von Bedeutung ist dieser Aspekt vor allem, wenn nicht genügend Einsatzkräfte zur Verfügung stehen und die anhaltende Belastung die Leistungsfähigkeit der Einsatzkräfte merklich mindert und sich dadurch die Zeit vergrößert, bis alle Passagiere einer medizinischen Versorgung zugeführt werden können. Dieser Sachverhalt soll daher in der Simulation angemessen berücksichtigt werden. Zunächst muss erörtert werden, welche Faktoren zu einer Leistungsminderung führen und welche Einsatzkräfte davon betroffen sind. Danach wird eine mathematische Beschreibung der Wirkungsmechanismen für die Implementierung in der Simulation erarbeitet.

Die körperliche Konstitution und der Ausbildungsstand werden für alle Einsatzkräfte als gut angenommen. Alle Einsatzkräfte sind in der Lage, die während eines Einsatzes an sie gestellten Aufgaben sicher zu bewältigen. Eine unterschiedliche Ausprägung der Merkmale „körperliche Konstitution“ und „Ausbildungsstand“ innerhalb der Einsatzkräfte erfolgt nicht. Die maßgeblichen Einflussgrößen, die bestimmen, wie effektiv eine Einsatzkraft ihre Aufgaben wahrnimmt, sind:

- Die körperliche Verfassung infolge der bereits geleisteten Arbeit (gemessen an der Anzahl der geretteten Passagiere)
- Die Rahmenbedingungen des Einsatzes (also den statischen Elementen), die ggf. zu einer Erschwerung der Abläufe führen

5. Simulation

- Der zur Verfügung stehende Platz im Flugzeug

Diese Faktoren wirken auf jene Einsatzkräfte ein, die das Flugzeug absuchen und die die Passagiere letztendlich „per Hand“ retten. Die Führungskräfte und die Besatzung der Flughafenslöschfahrzeuge sind hier nicht betroffen. In der Simulation werden sie daher während des gesamten Einsatzes als uneingeschränkt leistungsfähig definiert und unterliegen keiner Ermüdung oder Leistungsminderung. Für die Führungskräfte und die Besatzung ist also keine Modellierung erforderlich. Die Betrachtung der Leistungsfähigkeit findet folglich nur für diejenigen Einsatzkräfte statt, die die Angriffstrupps stellen.

Um nun alle Faktoren, die zu einer Leistungsminderung bei den Einsatzkräften führen können, in einer praktikablen Weise zu berücksichtigen, wird der folgende Ansatz gewählt. Es wird ein Leistungsminderungsindex L eingeführt. Dieser trägt sowohl der körperlichen Belastung der Einsatzkräfte durch die Rettungsmaßnahmen als auch Erschwernissen infolge der allgemeinen Rahmenbedingungen des Einsatzes sowie Verzögerungen in den Arbeitsabläufen durch räumliche Zwänge Rechnung. Letztgenannter Punkt ist natürlich nur relevant, solange sich die Einsatzkraft im Flugzeug befindet. Für alle Einsatzkräfte wird in jedem Zeitschritt eine Zufallsvariable erzeugt und mit dem Leistungsminderungsindex verglichen. Ist die Zufallsvariable größer, geht die Einsatzkraft ihrer Tätigkeit in gewohnter Weise nach. Fällt die Zufallsvariable kleiner aus, so wird für den aktuellen Zeitschritt keine Handlung vorgenommen. Die Einsatzkraft „setzt eine Runde aus“. Natürlich entspricht die rechnerische Annahme, dass immer mit voller Leistung gearbeitet wird und zwischenzeitlich gelegentlich kurze Arbeitsunterbrechungen stattfinden, nicht uneingeschränkt der Realität. Über eine lange Sicht und bei einer Vielzahl von Einsatzkräften gibt dieses Modell jedoch sehr gut die durchschnittlich zu erwartende Leistungsfähigkeit aller Einsatzkräfte wieder. Das Modell bietet vor allem zwei Vorteile:

- Alle Faktoren, die zur Beeinträchtigung der Leistungsfähigkeit führen, können ohne Unterscheidung der Ursachen in die Rechnung einbezogen werden.
- Die Werte, die die Leistungsminderung beschreiben, können jeden prozentualen Wert annehmen. Die Beschreibung der Wirkung aller Faktoren, die zu einer Reduzierung der Leistungsfähigkeit führen (z. B. die statischen Elemente), kann somit beliebig differenziert erfolgen.

Die konkrete mathematische Umsetzung zur Berücksichtigung der verschiedenen leistungsmindernden Faktoren wird wie folgt realisiert:

5. Simulation

▪ Leistungsminderung durch körperliche Belastung

Das Retten von Passagieren ist für die Einsatzkräfte mit einer großen körperlichen Belastung verbunden. Die Passagiere müssen im Flugzeug unter ungünstigen Platzverhältnissen aufgenommen werden. Beim Verlassen des Flugzeugs ist oftmals ein Höhenunterschied von mehreren Metern zu überbrücken und die Passagiere müssen dann noch aus dem Gefahrenbereich getragen werden. Um die hierbei entstehenden Belastungen zu berücksichtigen, wird ein Leistungsminderungsindex L_{Pax} für gerettete Passagiere gebildet. Es wird für die Rechnung angenommen, dass die Leistungsfähigkeit mit jedem geretteten Passagier um 10 Prozentpunkte abnimmt. Als Untergrenze wird eine Leistungsfähigkeit von 50% angenommen. Es ergibt sich somit L_P in Abhängigkeit von der Anzahl der geretteten Passagiere:

$$L_P = 0,1 \cdot \sum Pax \quad (24)$$

mit:

- L_P - Leistungsminderung eines Trupps (in Abhängigkeit von der Anzahl an geretteten Personen)
- Pax - Geretteter Passagier

▪ Leistungsminderung durch begrenzte Platzverhältnisse

Ein weiterer Umstand, der zur Erschwerung bzw. Verlangsamung der Arbeit führt, ist die räumliche Enge in einem Flugzeug. Jeder Flugreisende (sofern er nicht die First-Class gewohnt ist) wird sich daran erinnern, wie eng die Gänge in Flugzeugen sind, vor allem wenn noch ein oder zwei Stücke Handgepäck mitgeführt werden. Bleibt nur ein Passagier stehen, um beispielsweise sein Handgepäck in ein Gepäckfach zu legen oder von dort zu entnehmen, verzögert sich i. d. R. der gesamte Ein- oder Aussteigevorgang. Es ist einleuchtend, dass die Angriffstrupps mit ähnlichen Problemen konfrontiert werden, was die räumlichen Verhältnisse angeht. Es wird daher angenommen, dass es immer dann zu Verzögerungen oder vielmehr zur Unterbrechung der Tätigkeit kommen kann, wenn sich mehr als ein Trupp in einem Sektor befinden. Wollen beispielsweise zwei Trupps in entgegengesetzter Richtung aneinander vorbei, wird ein Trupp zwischen die Sitzreihen treten, um den anderen Trupp vorbei zu lassen. Ein Trupp gibt also seine Tätigkeit für eine Zeiteinheit auf. Befinden sich mehr als zwei Trupps im selben Sektor, erhöht sich die Wahrscheinlichkeit, dass es zu Verzögerungen kommt. Diese Wahrscheinlichkeit wird für jeden beteiligten Trupp mit Hilfe eines Leistungsminderungsindex für räumliche Enge bzw. gegenseitige Behinderung bestimmt. Dieser Leistungsminderungsindex basiert auf folgendem Gedankengang. Treffen zwei in gegensätzliche Richtung laufende Trupp in einem Sektor aufeinander, muss ein Trupp Platz machen, um den anderen vorbei zu lassen. Ein Trupp unterbricht also seine Tätigkeit (hier: Fortbewegung). Der Erwartungswert für eine Verzögerung bei einem gleichzeitigen Aufenthalt von zwei Trupps in einem Sektor soll daher bei eins liegen. Dies ist erfüllt, wenn die Wahrscheinlichkeit für beide Trupps jeweils 50% beträgt.

5. Simulation

$$L_{\text{TrA}} = 0,40 + n_{\text{Tr}} \cdot 0,05 \quad \text{für} \quad n_{\text{Tr}} > 1 \quad (25)$$

mit:

L_{TrA} - Listungsminderungsindex eines Trupps (in Abhängigkeit von der Truppanzahl, die sich im gleichen Sektor befinden)

n_{Tr} - Anzahl der Trupps (im gleichen Sektor)

Die Wahrscheinlichkeit für eine Unterbrechung ihrer Tätigkeit steigt für jeden weiteren Trupp um 5% an. Der Erwartungswert für die Anzahl der Trupps in einem Sektor, die von einer Verzögerung ihrer Tätigkeiten betroffen sind, steigt (stark gestreckt) quadratisch mit deren Anzahl an, da der Erwartungswert durch ein Polynom zweiten Grades (Multiplikation der Truppanzahl mit dem Leistungsminderungsindex, der wiederum die Truppanzahl enthält) berechnet wird.

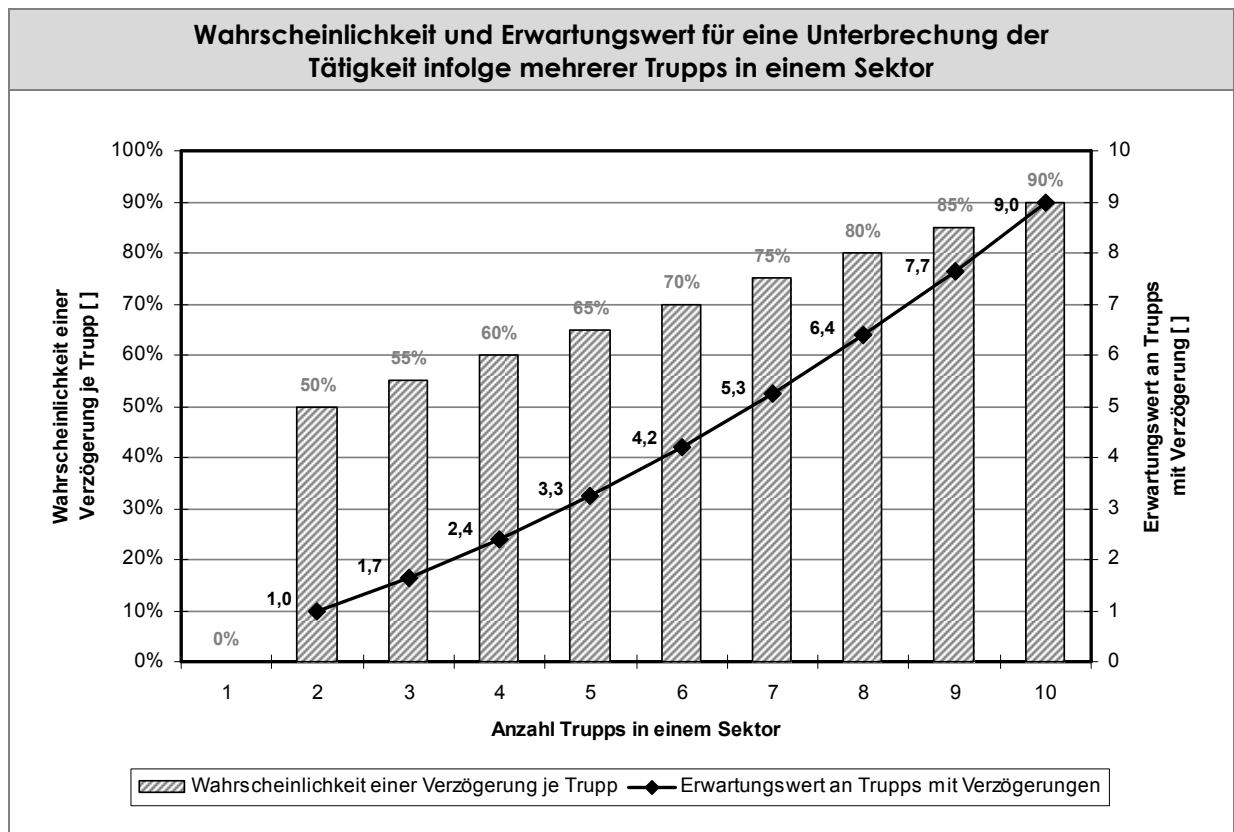


Abbildung 48: Wahrscheinlichkeit und Erwartungswert für eine Unterbrechung der Tätigkeit infolge mehrerer Trupps in einem Sektor

Befinden sich beispielsweise sechs Trupps im selben Sektor, so müssen bereits durchschnittlich vier von Ihnen ihre Tätigkeit unterbrechen (Abbildung 48), denn es gilt:

$$EW_{\text{TrA}} = L_{\text{TrA}} \cdot n_{\text{Tr}} = 0,40 \cdot n_{\text{Tr}} + 0,05 \cdot n_{\text{Tr}}^2 \quad (26)$$

5. Simulation

mit:

EW_{TrA} - Erwartungswert für die Anzahl an Trupps, die infolge der Truppenzahl in einem Sektor ihre Tätigkeit unterbrechen müssen

Zusätzlich wird noch berücksichtigt, dass größere Flugzeuge über zwei Gänge verfügen, wodurch sich die Wahrscheinlichkeit für eine gegenseitige Behinderung und einer daraus folgender Unterbrechung der Tätigkeit reduziert. Vereinfacht wird hierbei angenommen, dass sich die Trupps in diesem Fall gleichmäßig auf beide Gänge aufteilen und sich damit die Anzahl der Trupps halbiert, die sich in einem Gangsektor begegnen können. Um dies zu erreichen, wird die Gang-Anzahl bei der Berechnung des Leistungsminderungsindex berücksichtigt. Auf Basis des zuvor erläuterten rechnerischen Modell ergibt sich aus Formel (26) bei Einbeziehung der Gang-Anzahl als Quotient somit:

$$L_{TrA} = \left(\begin{array}{ll} 0 & n_{Tr} < 3 \\ \frac{1}{3} & \text{für } n_{Tr} = 3 \\ 0,40 + \frac{n_{Tr}}{n_{Gang}} \cdot 0,05 & n_{Tr} > 3 \end{array} \right) \quad (27)$$

mit:

n_{Gang} - Anzahl der Gänge im Flugzeug (1 oder 2)

Der Sonderfall von drei Trupps, die sich auf zwei Gänge verteilen, wird mit einem fest definierten Wert von $1/3$ (= 33%) gelöst, da es einen Gangsektor mit zwei Trupps und einen mit einem Trupp gibt. Der Erwartungswert für eine Tätigkeitsunterbrechung liegt somit bei 1. Die Verwendung des allgemeinen Rechenmodells hätte in diesem Sonderfall ansonsten zu einer zu starken Berücksichtigung des absoluten Gliedes (= 0,4) geführt.

Die Minderung der Leistungsfähigkeit infolge einer hohen Anzahl an Einsatzkräften pro Sektor wird bei einem Wert von 90% begrenzt (d.h. es sind dann nur noch 10% Leistungsfähigkeit vorhanden). Diese Begrenzung ist notwendig, um eine Selbstblockade zu verhindern, die sonst bei 12 Trupps pro Sektor (und Gang) eintritt. Es sei angemerkt, dass eine derart hohe Zahl an Einsatzkräften selbst in der Simulation unter großzügigen Annahmen kaum zustande kommt. Dies soll an einem kurzen Beispiel verdeutlicht werden:

Ein Flugzeug mit drei Türen verfügt in der Simulation über sieben Sektoren. Die Einsatzkräfte verteilen sich immer möglichst gleichmäßig. Um in jedem Sektor 12 Trupps mit jeweils zwei Einsatzkräften vorhalten zu können, werden im Flugzeug bereits 168 Einsatzkräfte benötigt. Hinzu kommen noch die Einsatzkräfte, die außerhalb des Flugzeugs tätig sind sowie die Besatzung der Flughafenlöschfahrzeuge und die Führungskräfte.

5. Simulation

Passagiere werden hier bei der Berechnung des Leistungsminderungsindex nicht berücksichtigt. Dies erklärt sich folgendermaßen: Findet die Evakuierung eines Flugzeugs statt, warten die Einsatzkräfte vor dem Betreten der Maschine ab, bis die gehfähigen Passagiere das Flugzeug (i. d. R. über die Rutschen) verlassen haben. Im Flugzeug verbleiben dann nur noch Personen, die sich infolge von Verletzung, Zwangslage oder Desorientierung nicht eigenständig aus dem Flugzeug begeben können und auf die Rettung durch die Einsatzkräfte angewiesen sind. Die gleichzeitige Präsenz von Einsatzkräften und flüchtenden Passagieren in einem Sektor kann daher für die Modellierung ausgeschlossen werden.

▪ Leistungsminderung durch ungünstige Rahmenbedingungen (statische Elemente)

Eine Reihe von äußeren Umständen können die Arbeit der Einsatzkräfte erschweren oder die Abläufe verlangsamen. Die Wirkungen bzw. Begründungen sind dem Kapitel über die statischen Elemente zu entnehmen (Kapitel 5.3). Wichtig an dieser Stelle ist die Tatsache, dass für verschiedene Rahmenbedingungen prozentuale Werte angegeben sind, um die sich die Leistungsfähigkeit oder die Arbeitseffektivität der Einsatzkräfte reduziert. Diese Werte sind voneinander unabhängig und können auch kumulativ auftreten. Daher können sie addiert werden und bilden somit den Leistungsminderungsindex L_{sE} , der die Auswirkungen aller statischen Elemente auf die Einsatzkräfte zusammenfasst. Bei der ungünstigsten Kombination gemäß der in Tabelle 31 festgelegten Werte wird die Leistungsfähigkeit auf 55% reduziert.

$$L_{sE} = \sum_{i=1}^n L_{sE,i} = L_{sE,1} + L_{sE,2} + \dots + L_{sE,n} \quad (28)$$

mit:

- L_{sE} - kumulierter Leistungsminderungsindex in Abhängigkeit von allen statischen Elementen
- $L_{sE,i}$ - einzelner Leistungsminderungsindex in Abhängigkeit von dem statischen Element i

▪ Kombination der leistungsmindernden Faktoren

Alle Faktoren, die zur Verringerung der Leistungsfähigkeit der Einsatzkräfte beitragen bzw. zu Verzögerungen der Abläufe führen, werden zu einem rechnerischen Wert zusammengefasst, der Wahrscheinlichkeit für Einsatzfähigkeit. In der Systematik der kybernetischen Risikoanalyse, die auf der Logik der zellulären Automaten beruht, besteht jedoch nur die Möglichkeit, eine Aktion durchzuführen oder zu unterlassen. Eine Aktion mit verminderter Leistungsfähigkeit zu verrichten, ist nur sehr aufwändig darstellbar. Um das Problem zu lösen, wird auf die Stochastik zurückgegriffen. Die Einsatzfähigkeit wird nicht als Faktor angesehen, der durch Multiplikation die jeweiligen Handlungen in ihrer Wirkung verringert, sondern als Wahrscheinlichkeit für ein vollständiges Gelingen.

In jeder Zeiteinheit wird daher für jede Einsatzkraft eine Zufallsvariable generiert. Liegt diese unterhalb der Einsatzfähigkeit, kann die Einsatzkraft eine Aktion wie vorgesehen ausführen, andernfalls entfällt in der jeweiligen Zeiteinheit die Handlung. Da die drei Einflussfaktoren voneinander stochastisch unabhängig sind, kann die Wahrscheinlichkeit für die Einsatzfähigkeit P_E aus dem Produkt der Gegenwahrscheinlichkeiten der jeweiligen Leistungsminderungsindices wie folgt ermittelt werden:

5. Simulation

$$P_E = (1 - L_P) \cdot (1 - L_{TrA}) \cdot (1 - L_{sE}) \quad (29)$$

mit:

- P_E - Wahrscheinlichkeit für die Einsatzfähigkeit eines Trupps (in einer Zeiteinheit)
- L_P - Leistungsminderung eines Trupps (in Abhängigkeit von der Anzahl an geretteten Personen)
- L_{TrA} - Leistungsminderung eines Trupps (in Abhängigkeit von der Anzahl an Trupps, die sich im gleichen Sektor befinden)
- L_{sE} - Leistungsminderung eines Trupps (in Abhängigkeit von den statischen Elementen)

Da alle Leistungsminderungsindices gemäß den oben beschriebenen Definitionen nur Werte zwischen null und eins annehmen, liegt die Wahrscheinlichkeit für die Einsatzfähigkeit eines Trupps dementsprechend ebenfalls immer zwischen null und eins. Somit liegen die möglichen Werte stets in einer sinnvollen Größenordnung.

5.2.2.4 Variationen in der Simulation

In der Simulation werden zwei Aspekte (1. untere Grenze der Leistungsfähigkeit / 2. Ablösung von erschöpften Trupps in Verbindung mit einer Begrenzung der Truppanzahl je Flugzeugtür) variiert und teilweise kombiniert. Dies dient dazu, den Einfluss des angenommenen Wirkungsmechanismus zu überprüfen und hilft, die erzielten Ergebnisse durch einen Vergleich zu interpretieren. Eine ausführliche Betrachtung findet in Kapitel 6.2.2 statt. Folgende vier Varianten werden analysiert:

Variante 1 - Keine Leistungsminderung, kein Ablösen von erschöpften Trupps und keine Begrenzung der Truppanzahl je Flugzeugtür

Die Variante 1 ist durch folgende Festlegungen gekennzeichnet:

- Eine Leistungsminderung gemäß der oben beschriebenen Modelle entfällt. Die Leistungsfähigkeit bzw. Einsatzfähigkeitswahrscheinlichkeit bleibt konstant bei 100%.
- Alle Einsatzkräfte können zeitlich unbegrenzt eingesetzt werden.
- Alle verfügbaren Trupps kommen gleichzeitig am und im Flugzeug zum Einsatz.
- Eine Ablösung von Einsatzkräften bei Erreichen einer Belastungsgrenze (gemessen an der Anzahl der geretteten Passagiere) findet nicht statt.

Variante 2 - Untere Leistungsgrenze 60%, kein Ablösen von erschöpften Trupps und keine Begrenzung der Truppanzahl je Flugzeugtür

Die Variante 2 ist durch folgende Festlegungen gekennzeichnet:

- Wie Variante 1
- jedoch mit einem unteren Grenzwert des Leistungsminderungsindex bzw. der Einsatzfähigkeitswahrscheinlichkeit von 60%. Diese Festlegung ist frei gewählt.

5. Simulation

Dem Wert liegt die Überlegung zugrunde, dass ein Trupp selbst dann, wenn er erschöpft ist oder unter erschwerten Bedingungen arbeiten muss, immer noch über (knapp) mehr als die Hälfte seiner Handlungsfähigkeit verfügt und näherungsweise noch halb so effektiv arbeitet wie ein gut erholt Trupp.

Variante 3 - Untere Leistungsgrenze 5%, kein Ablösen von erschöpften Trupps und keine Begrenzung der Truppanzahl je Flugzeugtür

Die Variante 3 ist durch folgende Festlegungen gekennzeichnet:

- Wie Variante 1
- jedoch mit einem unteren Grenzwert des Leistungsminderungsindex bzw. der Einsatzfähigkeitswahrscheinlichkeit von 5%. Diese Festlegung ist frei gewählt. Dem Wert liegt die Überlegung zugrunde, dass ein Trupp bis zur (fast) vollständigen Erschöpfung eingesetzt werden kann und gleichzeitig ein kompletter Stillstand vermieden wird.

Variante 4 - Untere Leistungsgrenze 5%, Ablösen von erschöpften Trupps und Begrenzung der Truppanzahl je Flugzeugtür

Die Variante 4 ist durch folgende Festlegungen gekennzeichnet:

- Der untere Grenzwert des Leistungsminderungsindex bzw. der Einsatzfähigkeitswahrscheinlichkeit beträgt 5%. Durch den Wechsel von erschöpften Trupps und erhaltenen Trupps soll das Erreichen der unteren Leistungsgrenze weitestgehend verhindert werden, soweit genügend Einsatzkräfte zur Verfügung stehen.
- Die Anzahl der direkt an den Rettungsmaßnahmen beteiligten Einsatzkräfte, also die Anzahl der Angriffstrupps, wird für Flugzeuge mit einem Gang nach der folgenden Formel angenommen, während weitere verfügbare Trupps als Reserve im Bereitstellungsraum verbleiben:

$$n_{Tr} = 3 \cdot n_{Tür} \quad (30)$$

mit:

- n_{Tr} - Anzahl der Trupps
- $n_{Tür}$ - Anzahl der Türen (auf einer Flugzeugseite)

Es wird davon ausgegangen, dass pro Tür jeweils drei Trupps arbeiten. Der erste Trupp ist im Flugzeug mit der Rettung eines Flugzeuginsassen beschäftigt, der zweite Trupp betritt oder verlässt das Flugzeug über die Rettungstreppe oder Rutsche und der dritte Trupp bringt eine gerettete Person zur Sammelstelle. Alle drei Tätigkeiten finden jeweils im Wechsel statt. Innerhalb eines Flugzeuges ist die Fortbewegung nur auf den Gängen sinnvoll möglich.

5. Simulation

Aufgrund der geringen Breite der Flugzeuggänge können die Einsatzkräfte, die in der Regel mit Atemschutzgeräten ausgerüstet sind oder gar einen Verletzten tragen, nicht aneinander vorbeilaufen. Daher arbeitet jeweils auch nur ein Trupp pro Türabschnitt im Flugzeuginneren. Da die einzelnen Vorgänge jeweils unterschiedlich viel Zeit in Anspruch nehmen, ist die Dreiteilung der Aufgaben nur eine idealisierte Beschreibung zur Modellbildung. Auch in der Simulation wird es bei drei Trupps zur Überlagerung gleicher Tätigkeiten kommen.

- Verfügt das Flugzeug über zwei Gänge, können sechs Trupps pro Türabschnitt arbeiten. Die Tür wird dann modellhaft von jeweils zwei Trupps zeitgleich genutzt. Diese Problematik kann jedoch vernachlässigt werden. Zwar bilden die Türen eine Engstelle, die Einsatztrupps sind im Verhältnis aber deutlich länger in den Flugzeuggängen mit ihren Tätigkeiten gebunden. Das Absuchen des Flugzeugs sowie das Aufnehmen und Transportieren eines Verletzten benötigt in Summe wesentlich mehr Zeit als das Passieren der Tür und variiert zudem in der Dauer. Treffen trotzdem zwei Trupps exakt zeitgleich an einer Tür an, wartet einer von ihnen 0:30 Minute (1 Zeiteinheit). Voraussetzung hierfür ist allerdings, dass eine Rutsche oder (optimalerweise) eine Rettungstreppe zur Verfügung steht. Es können dann also insgesamt drei Trupps bzw. sechs Einsatzkräfte (bei Flugzeugen mit zwei Gängen folglich sechs Trupps bzw. zwölf Mann) pro Tür eingesetzt werden. Hierbei ist es unerheblich, ob das Flugzeug von beiden Seiten oder nur von einer betreten werden kann. Der begrenzende Faktor ist die räumliche Enge innerhalb des Flugzeuges. Hieraus ergibt sich eine Modifikation von Formel (30), die zu Folgendem führt:

$$n_{Tr} = 3 \cdot n_{Tür} \cdot n_{Gang} \quad (31)$$

mit:

- n_{Tr} - Anzahl der Trupps
- $n_{Tür}$ - Anzahl der Türen (auf einer Flugzeugseite)
- n_{Gang} - Anzahl der Gänge im Flugzeug (entweder 1 oder 2)

- Sobald ein Trupp vom Flugzeug zum Sammelplatz zurückkehrt, wird überprüft, welcher Trupp aktuell über die beste körperliche Verfassung verfügt. Der Trupp mit der besseren Kondition (gemessen durch den Leistungsminderungsindex L_p , der die Belastung durch die Anzahl der bereits geretteten Passagiere wiedergibt) geht als nächstes in den Einsatz, unabhängig davon, ob es sich um einen ankommenden oder ruhenden Trupp handelt.

Die Festlegung, dass pro Tür nur maximal drei Trupps zum Einsatz kommen, widerspricht auf den ersten Blick dem Ansatz, die Anzahl der Einsatzkräfte in der Simulation zu variieren bzw. linear zu erhöhen. Drei Aspekte entkräften jedoch diesen Einwand:

- Um überhaupt drei Trupps je Tür einsetzen zu können, wird bereits eine sehr hohe Zahl an Einsatzkräften benötigt, die vielerorts in der Realität nicht vorhanden ist.

5. Simulation

- Stehen so viele Einsatzkräfte zur Verfügung, dass noch Reserven im Bereitstellungsraum gebildet werden können, begeben sich immer diejenigen Trupps für weitere Rettungsarbeiten ins Flugzeug, die über die höchsten Leistungsreserven verfügen. Dadurch können die Rettungsarbeiten effektiver durchgeführt werden, auch wenn sich die gleiche Anzahl an Einsatzkräften im Flugzeug befindet.
- Durch den Vergleich der vier Varianten kann bei der Auswertung der Ergebnisse eine Plausibilitätsprüfung der getroffenen Annahmen bezüglich der Leistungsminderung vorgenommen werden (Kapitel 6.2.2).

5. Simulation

5.2.2.5 Einsatzkraftvektor zur rechnerischen Umsetzung

Analog zu den Passagieren wird jede einzelne Einsatzkraft ebenfalls als selbstständiges Objekt dargestellt, das durch eine Reihe von Variablen beschrieben wird. Die mathematische Umsetzung erfolgt auch bei den Einsatzkräften mittels eines Vektors. Der Einsatzkraftvektor $EK_{i,n}(t)$ beschreibt den Ort und Zustand der i -ten Einsatzkraft zum Zeitpunkt t im Szenario n .

Auch hier werden alle Einsatzkraftvektoren in einer Einsatzkräftematrix zusammengefasst, die somit die Gesamtheit aller Einsatzkräfte abbildet. Die Einsatzkraftvektoren bzw. die Einsatzkräftematrix enthält folgende Angaben zu jeder einzelnen Einsatzkraft:

Einsatzkraftvektor	
$EK_{i,n}(t) =$	
$\begin{pmatrix} i \\ x \\ y \\ z \\ a \\ f \\ t \\ d \\ p \\ s \\ r \\ e \\ v \end{pmatrix}$	
1.	i = Laufende Nummer der Einsatzkraft
2.	x = X -Koordinate
3.	y = Y -Koordinate
4.	z = Z -Koordinate
5.	a = A bmarschzeitpunkt (1. oder 3. Abmarsch oder ext. Kräfte)
6.	f = F unktion (z. B. Führungskraft, Angriffstrupp, FLF-Besatzung)
7.	t = Aktuelle T ätigkeit (z. B. Absuchen, Retten, Löschen)
8.	d = D auer der Tätigkeiten unter Atemschutz
9.	p = P assagier (-Nr.), der aktuell gerettet wird
10.	s = S umme der geretteten Passagiere
11.	r = Betritt / verlässt LFZ in der Zeiteinheit über eine R utsche
12.	e = Wahrscheinlichkeit für E insatzfähigkeit in der Zeiteinheit
13.	v = V erzögerung (also Unterbrechung von 7. für eine Zeiteinheit)

Abbildung 49: Einsatzkraftvektor

Der Vollständigkeit halber ist auch hier zu erwähnen, dass die Einsatzkraftvektoren darüber hinaus noch einige Werte beinhalten, die aus programmiertechnischen Gründen erforderlich sind. Da diese Werte jedoch nicht die jeweilige Lage der Einsatzkraft in einer Unfallsituation genauer charakterisieren, sondern nur dazu dienen, Zwischenergebnisse zu speichern, werden sie hier nicht weiter behandelt.

5. Simulation

5.2.3 Medizinisches und soziales Personal

Im direkten Anschluss an die Rettungsmaßnahmen erfolgt nach Übergabe der Passagiere an die Mitarbeiter der notfallmedizinischen Dienste die oben beschriebene Sichtung (Triage). Daran schließen sich medizinische Versorgung und soziale Betreuung an. Typischerweise wird bei Schadenslagen der Größenordnung „Flugzeugunfall“ weder die medizinische noch die soziale Betreuung von Einsatzkräften der Feuerwehr bewerkstelligt.

Die Untersuchung der Leistungsfähigkeit der medizinisch-sozialen Versorgung fallen nicht in den Betrachtungsraum der vorliegenden Arbeit (Kapitel 4.3 „Systemgrenzen und Untersuchungsraum“). Vielmehr beschränkt sie sich auf die Einsatzkräfte, die in der Regel von der Feuerwehr gestellt werden und primär die Aufgaben „Flugzeugbrandbekämpfung“ und „Retten von Menschen aus Flugzeugen“ wahrnehmen. Es ist unumstritten, dass für den Gesamterfolg eines Einsatzes die medizinische Versorgung einen entscheidenden Betrag leistet. Daher wird für den rechnerischen Ansatz bei allen Schadenslagen angenommen, dass eine ausreichende medizinische Versorgung zur Verfügung steht. Dies bezieht sich vor allem auf die präklinische Phase, in der die oben beschriebene Triage durchgeführt und die verletzten Passagiere mit den zur Verfügung stehenden Mitteln und Kräften so gut wie möglich versorgt werden. Die Annahme einer schnellen und guten medizinischen Versorgung für eine große Anzahl an Verletzten wird in der Realität in den meisten Fällen in der Anfangsphase des Einsatzes nicht gegeben sein. Sie ist jedoch Voraussetzung für den theoretisch-rechnerischen Ansatz, um eine Abgrenzung zwischen den Arbeiten der Einsatzkräfte (insbesondere der Feuerwehr) und den notfallmedizinischen Diensten zu erzielen, ohne die eine Beurteilung der Leistungsfähigkeit der Einsatzkräfte nicht möglich ist.

Es geht hier also ganz bewusst nicht um eine zweistufige Beurteilung der Einsatzkräfte der Feuerwehr und des medizinischen Personals. Es wäre jedoch naheliegend, wenn sich die Verantwortlichen für den Bereich Notfallmedizin ebenfalls für eine Analyse ihres Arbeitsfeldes in einer ähnlichen Form entschließen würden.

5. Simulation

5.2.4 Brand

Brände können in Flugzeugen fast überall entstehen. In der Praxis gibt es jedoch gewisse Tendenzen, so dass sich Schwerpunkte benennen lassen. Voraussetzung ist immer die Existenz von Aktivierungsenergie. Diese liegt i. d. R. in Form von Wärme vor. Zumeist entstehen Brände an Bauteilen, die aufgrund ihrer Funktion bei Überlastung, Störung, Fehlbedienung oder Defekt große Mengen Wärmeenergie abgeben können (z. B. Bremsen oder Pumpen, die heiß laufen). Fehler an elektrischen Teilen (z. B. Kurzschluss, Überlastung) stellen die häufigste Ursache für den Ausbruch von Feuer dar. Darüber hinaus besteht noch die Möglichkeit, dass bei Not- und Bruchlandungen Funkenflug (i. d. R. hervorgerufen durch Metallteile, die auf der Landebahn schleifen) und Treibstoffaustritt in ungünstiger Weise zusammen auftreten und somit zu einer Entzündung führen. Diejenigen Brandfälle, die bei Flugzeugen auftreten, lassen sich in vier Brandkategorien und acht Gruppen bzw. Brandarten einteilen. Konkret werden folgende Brandszenarien unterschieden:

Flugzeugbrände - Brandarten, Entstehungsorte und Häufigkeiten					
Nr.	Brand-kategorie	Brandart (in der Simulation)	Brandentstehungsorte am und im Flugzeug	Häufigkeit in der Realität *1	Häufigkeit in der Simulation
1.	kein Brand	kein Brand	---	---	40%
2.	Außenbrand, Fläche	Flächenbrand, Voll~	am Boden unter dem gesamten Flugzeug *2	sehr gering	5%
3.		Flächenbrand, Teil~	am Boden unter einem Teil / der Hälfte des Flugzeugs *3	sehr gering	5%
4.	Außenbrand, Bauteil	Triebwerksbrand	Triebwerk	gering	10%
5.		Fahrwerksbrand	Fahrwerk	gering	10%
6.	Innenbrand	Kabinenbrand	Kabine incl. Cockpit, Küche, Toilette und Stromerzeuger (APU)	gering	10%
7.		Frachtraumbrand	Frachtraum und Technikraum (EE)	gering	10%
8.	Schwelbrand	Schwelbrand *4	unabhängig vom Ort „irgendwo“ im Flugzeuginneren	gering	10%

Tabelle 20: Flugzeugbrände - Brandarten, Entstehungsorte und Häufigkeiten

*1 Qualifizierte Schätzung, bezogen auf die Anzahl aller Brandfälle (Erfahrung und Abschätzung der Flughafenfeuerwehr Frankfurt/Main)

*2 In Anlehnung an die „Theoretical Critical Fire Area“ gemäß der NFPA [1998, S. 11]

*3 In Anlehnung an die „Practical Critical Fire Area“ gemäß der NFPA [1998, S. 11]

*4 Schwelbrände können nach einiger Zeit auch in offenes Feuer umschlagen. Diese Thematik wird unter der Brandart „Schwelbrand“ behandelt.

5. Simulation

Sicherlich ist auch hier eine weitere Differenzierung möglich, aber diese Kategorisierung bietet einen guten Kompromiss zwischen einer überschaubaren und zugleich sinnvoll modellierbaren Anzahl an Möglichkeiten (und somit eines vertretbaren Rechenaufwands) einerseits und einer hinreichenden Genauigkeit der Schadenslage andererseits. Gemäß dem Grundgedanken der zellulären Automaten erfolgt die Modellbildung der Brandszenarien mit Hilfe einfacherer Überföhrungsfunktionen auf Basis des Flächen- und des Innenrasters. Durch die modulare Struktur des Simulationsprogramms besteht die Möglichkeit, für zukünftige Anwendungen bei Bedarf eine stärker naturwissenschaftlich geprägte Modellierung vorzunehmen. Die wesentlichen Schadensfälle mit ihren unterschiedlichen Charakteristika (für Brandverlauf und Einsatztaktik) lassen sich jedoch in ihren Grundzügen mit Hilfe der Systematik der zellulären Automaten hinreichend genau abbilden.

Die in Tabelle 20 aufgeführten Brandarten sollen nun erörtert werden. Dies erfolgt nach einer einheitlichen Systematik. Dabei interessieren drei Gesichtspunkte:

- Brandverhalten je Brandart (in der Realität)
- Brandausbreitung je Brandart (in der Simulation)
- Löschung je Brandart (in der Simulation)

Für jede Brandart wird daher im Folgenden die Modellierung in der Simulation anhand dieser drei Aspekte hergeleitet und beschrieben.

5.2.4.1 Außenbrand in der Fläche

Bei den an dieser Stelle relevanten Bränden handelt es sich um so genannte „Poolfire“, also flächige Flüssigkeitsbrände. Für die Definition einer Schadenslage wird bei Flächenbränden zwischen Vollbrand und Teilbrand differenziert. Das wesentliche Merkmal ist hierbei die Größe der brennenden Fläche in Relation zur Flugzeuggröße. Ein Vollbrand umfasst die gesamte Fläche, die sich unter einem Flugzeug (einschließlich der Tragflächen) befindet. Alle Brände, die sich über kleinere Flächen als diese erstrecken, werden als Teilbränden bezeichnet. Diese Begriffsbestimmung entspricht nicht einer strengen Definition im Feuerwehrwesen. Sie eignet sich jedoch sehr gut für die Abgrenzung der verschiedenen Schadensszenarien in der Simulation und soll daher im Folgenden verwendet werden. Die Eigenschaften bezüglich Brand- und Löschverhalten unterscheiden sich bei Voll- und Teilbränden nicht voneinander. In beiden Fällen handelt es sich um einen Flüssigkeitsbrand. Die nachfolgenden Beschreibungen der für die Simulation getroffenen Annahmen und Modelle gelten daher gleichermaßen für Vollbrände wie für Teilbrände.

- **Brandverhalten Außenbrand (in der Realität)**

Die Betrachtung des Brandverhaltens der Außenbrände lässt sich in zwei Aspekte unterteilen: Die Ausbreitung des (Flüssigkeits-)Brandes und die Überwindung des Feuerwiderstandes der Flugzeughülle.

5. Simulation

Die Ausbreitungsrichtung und -geschwindigkeit von ausgetretenem Treibstoff lässt sich nicht pauschal angeben. Sie hängt in der Realität maßgeblich von der Geländeneigung, der Bodenbeschaffenheit (z. B. Beton / Wiese) und dem Volumenstrom ab.

Eine Analyse der Treibstoffe, die in der Luftfahrt verwendet werden, erfolgt in Kapitel 5.3.1 „Theoretische Merkmale von Flugzeugunfällen“. Vorweg sei angemerkt, dass Kerosin den mit Abstand bedeutendsten Treibstoff darstellt. Im Folgenden wird daher „Kerosin“ pauschal als Synonym für alle Treibstoffarten verwendet.

Die Querneigung der Start- und Landebahnen sind gemäß den Empfehlungen der ICAO auf 1% bis 2% zu begrenzen [ICAO 2009, S. 3-4]. Eine großflächige Ausbreitung von Kerosin kann daher nicht durch zügiges Abfließen verhindert werden. Gleiches gilt auch für die Längsneigung der Start- und Landebahn. Die mit Kerosin bedeckte Fläche A_K multipliziert mit der Höhe der Kerosinlache h_K entspricht dem Volumenstrom an austretendem Kerosin Q_K multipliziert mit der Zeit t .

$$Q \cdot t = A_L \cdot h_L \quad \Rightarrow \quad A_L = \frac{Q \cdot t}{h_L} \quad (32)$$

mit:

- Q - Volumenstrom des auslaufenden Kerosins $\left[\frac{\text{m}^3}{\text{sek}} \right]$
- t - Zeit [sek]
- A_L - Fläche der Kerosinlache $[\text{m}^2]$
- h_L - Höhe der Kerosinlache [m]

Die Fließgeschwindigkeit einer austretenden Flüssigkeit ergibt sich aus der Gegenüberstellung der potenziellen und der kinetischen Energie.

$$m \cdot g \cdot h_T = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v_{A0}^2 \quad \Rightarrow \quad v_{A0} = \sqrt{2 \cdot g \cdot h_T} \quad (33)$$

mit:

- m - Masse [kg]
- g - Erdbeschleunigung $\left[\frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right]$
- h_T - Höhe des Flüssigkeitsstand (hier Kerosin) im Tank oberhalb des Lecks [m]
- v_{A0} - Geschwindigkeit, hier: Fließgeschwindigkeit an der Austrittsöffnung $\left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right]$

Der Volumenstrom wird anhand des Rohrdurchmessers bzw. der Größe der Austrittsöffnung A_T am Tank und der Austrittsgeschwindigkeit an der Austrittsöffnung v_{A0} ermittelt:

5. Simulation

$$Q = A_{A0} \cdot v_{A0} \quad (34)$$

$$A_L = \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot d_L^2 \quad (35)$$

mit:

- A_{A0} - Fläche der Austrittsöffnung (= Leck) am Tank $\left[\frac{\text{m}^3}{\text{min}} \right]$
 A_L - Fläche der Kerosinlache $[\text{m}^2]$
 π - Kreiszahl Pi ($\approx 3,1415$) $[\]$
 d_L - Durchmesser der (kreisförmigen) Kerosinlache $[\text{m}]$

Werden Formel (32), (33) und (34) in (35) eingesetzt und nach d umgestellt, ergibt sich Formel (36), mit der der Durchmesser einer Kerosinlache berechnet werden kann:

$$d_L = \sqrt{\frac{4 \cdot t \cdot A_{A0} \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h_T}}{\pi \cdot h_L}} \quad (36)$$

Um also die mit Kerosin bedeckte Fläche zum Zeitpunkt t zu bestimmen, ist die Füllhöhe im Tank h_T , die Größe des Tanklecks A_T und die Höhe der Kerosinlache h_L notwendig. Daneben ist natürlich noch von Bedeutung, an welcher Stelle des Flugzeugs die Leckage besteht und von wo sich somit das Kerosin ausbreitet. Dabei wird bereits vernachlässigt, dass sich die Füllhöhe durch das Auslaufen des Kerosins verringert und somit im Umkehrschluss auch der austretende Volumenstrom nachlässt. Unberücksichtigt bleibt ebenfalls die Beschaffenheit des Untergrundes. Kann das Kerosin versickern oder wird es über Entwässerungsvorrichtungen abgeführt? Breitet es sich über eine ebene Fläche aus oder sammelt es sich in Bodenvertiefungen und zwischen Trümmerteilen? Es wird deutlich, dass eine genaue mathematische Betrachtung dieses Aspektes mehr Fragen aufwirft, als sie zu beantworten vermag. Daher erscheint es zweckdienlicher, im Folgenden ein einfaches Modell zur Darstellung der Brandausbreitung bei Flächenbränden zu verwenden.

Löschübungen an Flugzeugattrappen [Flughafenfeuerwehr Stuttgart 2002b] verdeutlichen, dass bereits geringe Mengen Kerosin zu einem Flächenvollbrand ausreichen. Zwar finden solche Übungen in einem (flachen) Wasserbecken statt, was zu einer gleichmäßigen und zugleich sehr sparsamen bzw. wirkungsvollen Verteilung des Kerosins führt, aber die anschauliche Erkenntnis, dass bereits mit überschaubaren Mengen ein großflächiger Brand möglich ist, kann auch auf andere Untergrundverhältnisse übertragen werden. Die hier verwendeten Mengen beliefen sich auf Werte zwischen 5.000 und 10.000 Litern Kerosin. Dies scheint auf den ersten Blick eine große Menge zu sein.

5. Simulation

Wird jedoch bedacht, dass beispielsweise eine Boeing 747-400 mit ca. 217.000 Litern [Boeing o. J.] betankt werden kann, bedeutet dies, dass es sich bei den genannten Mengen lediglich um einen Anteil im einstelligen Prozentbereich handelt. Verhältnismäßig geringe Mengen an Kerosin reichen also bereits aus, um einen katastrophalen flächigen Vollbrand zu erzeugen. Im Umkehrschluss ist allerdings festzustellen, dass ein Mehr an Kerosin nicht zwangsläufig zu einer Vergrößerung des Schadensmaßes führt. Eine größere Kerosintiefe führt nicht zwangsläufig zu einem größeren Brand (vorausgesetzt, das Kerosin kann sich nicht beliebig ausbreiten), sondern verursacht im Wesentlichen eine längere Branddauer. Ein anschauliches Beispiel hierfür ist der Brand von Öltanks. Diese brennen im Vollbrand auf der gesamten Oberfläche. Die Füllhöhe und damit die Menge des vorhandenen Öls bzw. Kerosins ist dabei aber zunächst unerheblich. Ein großes Volumen an Kerosin führt nicht zwangsläufig zu einem größeren Feuer. Darüber hinaus versickert das Kerosin, wenn es sich über die Breite der Startbahn hinaus ausbreitet, schnell im Boden oder wird durch Drainagesysteme abgeführt.

Der zweite - wenn nicht sogar der wesentliche - Aspekt eines flächigen Außenbrandes ist die thermische Wirkung auf den Flugzeugrumpf. Kommt es zu dessen Zerstörung, kann das Feuer ungehindert in das Flugzeuginnere vordringen. Die Passagiere in der Kabine sind dann dem Feuer schutzlos ausgeliefert. Eine Ausbreitung des Brandes von Außen auf das Flugzeuginnere findet statt, wenn die Außenhülle des Flugzeugs der thermischen Belastung nicht mehr standhalten kann.

Grundsätzlich werden drei Arten von Wärmeübertragung unterschieden:

- Wärmestrahlung (Oberflächen strahlen Wärme ab, z. B. Infrarotstrahlung)
- Wärmeströmung (flüssige oder gasförmige Teilchen bewegen sich und transportieren dadurch folglich die in ihnen enthaltene Wärme mit, z. B. heißer Brandrauch)
- Wärmeleitung (innerhalb eines festen Gegenstandes wird die Wärme von Teilchen zu Teilchen weitergegeben, z. B. „Löffel, der in heißer Suppe steckt, wird warm“)

Bei einem Außenbrand treten gleichzeitig Wärmestrahlung und Wärmeströmung auf. Die exakte Ermittlung ist jedoch mit einigen Schwierigkeiten behaftet:

- Bei dem Betrachtungsfall „Kerosinbrand unter Flugzeug“ handelt es sich nicht um ein geschlossenes thermodynamisches System, bei dem die durch Brand freigesetzte Wärmemenge vollständig auf die betrachtete Fläche des Flugzeugs einwirken würde. Aus diesem Grund entfällt diese Möglichkeit der Modellbildung.
- Die Wärmestrahlung lässt sich zwar rechnerisch bestimmen, ist aber mit vielen Unsicherheiten behaftet - Formeln (37) bis (41). Die Wärmebeaufschlagung des Flugzeugs durch Wärmeströmung in Form von heißem Brandrauch, die einen erheblichen Teil des Wärmeübertrags darstellt, bleibt hier jedoch unberücksichtigt. Wärmestrahlung:

5. Simulation

$$\dot{q} = \frac{\eta \cdot \dot{m} \cdot h_c}{4 \cdot \pi \cdot x^2} \cdot \tau_a \quad (37)$$

mit:

- \dot{q} - Wärmestrahlung $\left[\frac{\text{kW}}{\text{m}^2} \right]$
- η - Anteil emittierter Strahlung im Verhältnis zur freigesetzten Wärmemenge []
- \dot{m} - Brennstoffmassenstrom $\left[\frac{\text{kg}}{\text{sek}} \right]$
- h_c - Spezifische Verbrennungsenthalpie $\left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right]$
- π - Kreiszahl Pi ($\approx 3,1415$)
- x - Abstand zwischen Brandmitte und Betrachtungspunkt [m]
- τ_a - Atmosphärischer Transmissionskoeffizient []

Für diese gilt wiederum:

$$\tau_a = 2,02 \cdot (p_w \cdot x)^{-0,09} \quad (38)$$

$$\dot{m} = \dot{m}_\infty \cdot (1 - e^{-k \cdot d_L}) \quad (39)$$

$$p_w = RH \cdot p_w^{(0^\circ\text{C})} \quad (40)$$

$$x = x_{\text{Rand}} + t_{\text{HF}} \cdot v_{\text{Brand}} \quad (41)$$

mit:

- p_w - Partialdampfdruck des Luftwassergemisches [Pa]
- \dot{m}_∞ - Brennstoffmassenstrom bei unendlich großen Lachen $\left[\frac{\text{kg}}{\text{sek}} \right]$
- e - Eulersche Zahl ($\approx 2,7183$) []
- d_L - Durchmesser der (kreisförmigen) Kerosinlache [m]
- RH - relative Luftfeuchte [%]
- x_{Rand} - Abstand zwischen Brandrand und Betrachtungspunkt [m]
- t_{HF} - Hilfsfrist (Zeit bis zum Beginn wirksamer Löschmaßnahmen) [sek]
- v_{Brand} - Brandausbreitungsgeschwindigkeit $\left[\frac{\text{m}}{\text{sek}} \right]$

Angesichts dieser wenig befriedigenden rechnerischen Möglichkeiten wird eine andere Lösung zur Modellierung gewählt. Sie wird im Folgenden beschrieben.

▪ Brandausbreitung Außenbrand (in der Simulation)

Der oben dargelegte Ansatz, die Zunahme der mit Kerosin bedeckten Fläche und damit die Brandausbreitung mittels Betrachtung der mechanischen Energie - Formel (33) - und der

5. Simulation

hydrodynamischen Kontinuitätsbedingung - Formel (34) - abzuschätzen, zeigt auf, wie viele Größen fehlen bzw. wie konstruiert der Fall sein müsste, um die Formel (36) tatsächlich anwenden zu können. Eine exakte Berechnung ist daher auch mit aufwändigen Modellen kaum zu erreichen. Zudem erscheint hier auch keine Notwendigkeit zu bestehen. Für die Simulation gelten entsprechend folgende Annahmen eines vereinfachten Modells.

Jedes Flugzeug führt (unabhängig von seiner Größe und seinem Betankungszustand) so viel Kerosin mit sich und kann dieses auch in der Form freisetzen, dass dieses ausreicht, um eine Fläche mit Kerosin zu bedecken, die der gesamten Größe des Flugzeugs entspricht (Rumpflänge x Spannweite). Eine deutliche Ausweitung des Kerosins und damit eines möglichen Vollbrandes über diese Fläche hinaus wird als eher unwahrscheinlich und vor allem als irrelevant angesehen. Brände, die jenseits der Spannweite der Tragflächen stattfinden, haben keine signifikante Auswirkung auf das Flugzeug und die Passagiere.

In der Simulation gestaltet sich ein Brandverlauf wie folgt. Brennt ein Feld, so kann sich der Brand in der folgenden Zeiteinheit jeweils mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit auf die direkt (flächig) angrenzenden Felder ausbreiten (Abbildung 50). In jeder weiteren Zeiteinheit besteht wieder die Wahrscheinlichkeit, dass sich der Flächenbrand weiter auf die dann jeweils angrenzenden Felder ausbreitet. Die Wahrscheinlichkeit für die Brandausbreitung ermittelt sich wie folgt:

$$P_{\text{BrA,a}}(X) = 0,25 + 0,5 \cdot X + s_{\text{Wetter}} + s_{\text{Wind}} + s_{\text{LFZ}} \leq 1 \quad (42)$$

mit:

- $P_{\text{BrA,a}}$ - Wahrscheinlichkeit der **Brandausbreitung außen** []
- X - Zufallsvariable (zwischen 0 und 1) []
- s_{Wetter} - **Summand** für den Einfluss des **Wetters** []
- s_{Wind} - **Summand** für den Einfluss des **Windes** []
- s_{LFZ} - **Summand** für den Einfluss des Zustandes des Flugzeugs []

Um zu berücksichtigen, dass sich Brände nicht gleichmäßig und nicht völlig gleichartig ausbreiten, enthält die Formel (50) neben dem absoluten Glied (hier: 0,25) eine Zufallsvariable, die mittels eines Faktors (hier: 0,5) Werte zwischen 0 und 0,5 annehmen kann. Des Weiteren umfasst die Formel drei Summanden, die den Einfluss der Faktoren Wetter, Wind und Zustand des Flugzeugs widerspiegeln. Die Werte der Summanden ergeben sich abhängig von den Rahmenbedingungen bzw. den gewählten Parametern gemäß Tabelle 31. Für Wetter und Wind ist es leicht nachvollziehbar, dass diese Einfluss auf die Brandausbreitung haben. Die Berücksichtigung des Flugzeugzustandes begründet sich damit, dass je nach Unfallhergang bzw. dem daraus resultierenden Zustand des Flugzeugs Treibstoff in unterschiedlichen Mengen freigesetzt und verschiedenartig verteilt werden kann.

5. Simulation

Bricht das Flugzeug beispielsweise auseinander oder wird vollständig zertrümmert, tritt mit hoher Wahrscheinlichkeit eine große Menge Treibstoff aus und wird großflächiger verteilt, was eine anschließende Brandausbreitung deutlich begünstigt. Da die Brandausbreitungswahrscheinlichkeit durch die Addition der fünf Summanden bei bestimmten Konstellationen theoretisch Werte größer 1 annehmen kann, wird sie in der Simulation automatisch auf einen Maximalwert von 1 begrenzt.

Für die Modellierung der Brandausbreitung ist es unerheblich, ob sich das Feuer auf der Oberfläche einer Kerosinlache ausbreitet oder bereits brennendes Kerosin über eine Fläche fließt. Eine differenzierte Betrachtung der Brandausbreitung bei linearer Brandausbreitungsgeschwindigkeit und hyperbolischer (also im zeitlichen Verlauf abnehmender) Ausbreitung einer Flüssigkeit entfällt zu Gunsten einer einfachen linearen Modellierung im Sinne der zellulären Automaten.

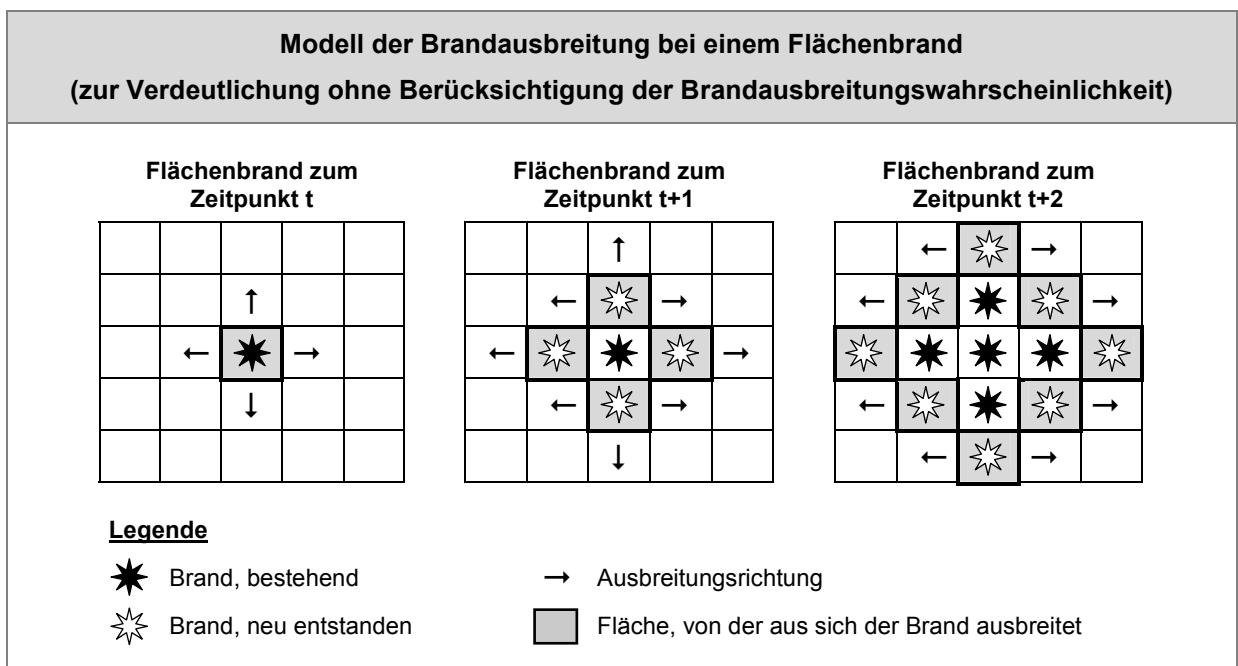


Abbildung 50: Modell der Brandausbreitung bei einem Flächenbrand

Dem in der Simulation modellierten Brandverhalten der Flugzeug-Außenhaut liegen folgende Gesetzmäßigkeiten und Überlegungen zugrunde: Für die Außenhaut und die tragende Struktur wird bei Flugzeugen i. d. R. eine Aluminium-Silizium-Legierung verwendet, das so genannte „Flugzeugaluminium“. Der Schmelzpunkt von (reinem) Aluminium liegt bei 659° Celsius [Fischer et al. 2008, S. 116]. Seit einigen Jahren kommen verstärkt auch Bauteile aus Glasfaserkohlestoff (GFK) zum Einsatz, deren Bedeutung nach derzeitiger Einschätzung noch deutlich zunehmen wird. Im Bauwesen wurden die Versagensgrenzen für GFK-Bauteile ermittelt. Erste Zersetzungserscheinungen treten bereits bei Temperaturen um 200° C auf [Ludwig 2009, S. 133]. Ab ca. 300° C findet der Umfang des Materialabbaus in bedeutendem Maße statt [Ludwig 2009, S. 113ff].

5. Simulation

Versuche mit der Einheitstemperaturkurve ergaben zudem, dass bereits nach einem Zeitraum von 2:40 bis 4:00 Minuten mit einem Brand des GFK-Bauteils selbst zu rechnen ist [Ludwig 2009, S. 187]. Die Widerstandsfähigkeit von GFK liegt also unter der von Aluminium. Eine differenziertere Betrachtung der verwendeten Materialien (Aluminium, GFK) wird nicht vorgenommen. Im Ergebnis ist jedoch festzuhalten, dass weder Flugzeugaluminium noch GFK-Bauteile einer vollflächigen Befuerung eines Kerosinbrandes lange standhalten können, unabhängig davon, wie sich das Materialversagen im Einzelnen darstellt. Um das Versagen der Außenhaut infolge thermischer Belastung zu modellieren, wird daher der folgende Ansatz gewählt: Der Feuerwiderstandswert orientiert sich an den von der ICAO geforderten Eingreifzeiten (zuzüglich Löschzeit), da deren strikte Zeitvorgaben primär auf Basis des geringen Feuerwiderstandswertes festgelegt wurden. Diese Grundüberlegung liegt übereinstimmend allen detaillierten Modellannahmen zur Feuerausbreitung in den Flugzeuginnenraum zugrunde.

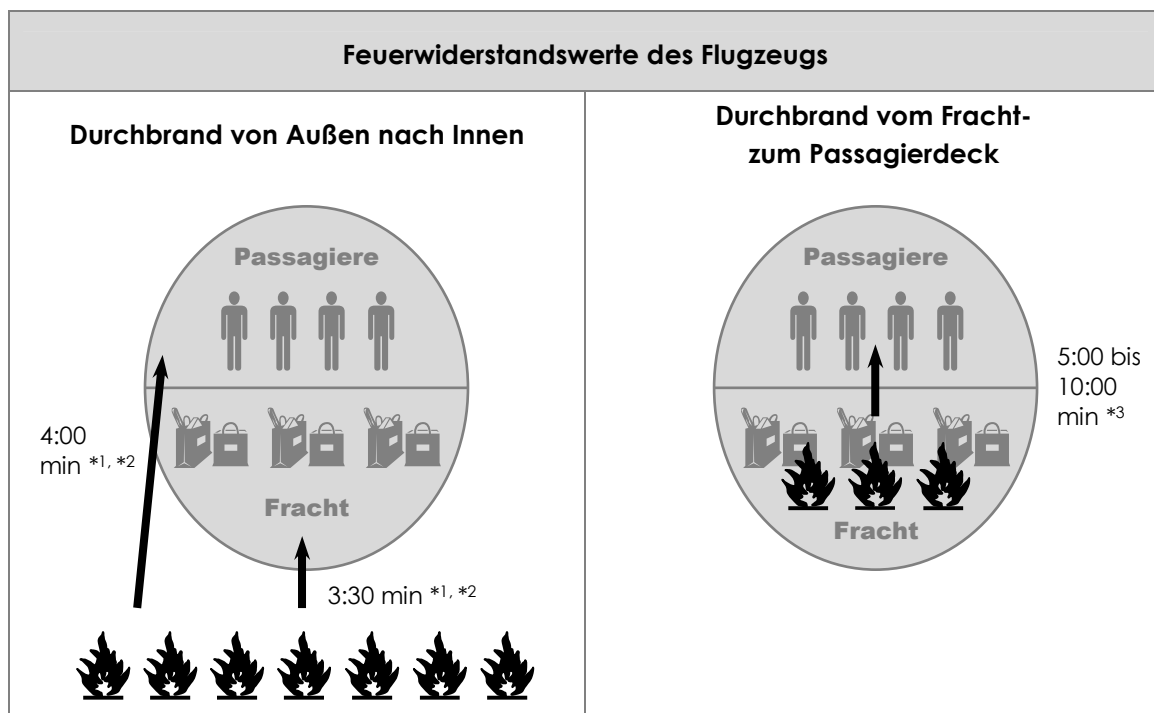


Abbildung 51: Feuerwiderstandswerte des Flugzeugs

- *1 Bei Flugzeugen der Klassen 3 und 4 (4 und 5 Türen) ist der Feuerwiderstandswert um 0:30 Minute (1 Zeiteinheit) höher.
- *2 Beschädigungen infolge des Unfalleintritts können zur Verringerung des Feuerwiderstandswertes zwischen 0:30 und 2:30 Minuten (1 und 5 Zeiteinheiten) führen.
- *3 Bei Bränden, die im Frachtdeck entstehen, siehe „Brandausbreitung Frachtraumbrand (in der Simulation)“.

5. Simulation

Es wird hierbei angenommen, dass ein Durchbrand der Außenhaut des Flugzeugs nach 3:30 Minuten (7 Zeiteinheiten) bei kleineren Flugzeugen (2 und 3 Türen) und nach 4:00 Minuten (8 Zeiteinheiten) bei größeren Flugzeugen (4 und 5 Türen) erfolgt. Die Unterscheidung zwischen den beiden Feuerwiderstandswerten resultiert aus der unterschiedlichen Materialstärke der Flugzeugtypen. Bei großen Maschinen weist die Außenhaut aufgrund der höheren Belastung infolge größerer Flughöhen üblicherweise eine etwas größere Dicke auf. Ist die Außenhaut eines Flugzeugs jedoch beschädigt, reduziert sich deren Feuerwiderstandswert. Je höher die mechanische Belastung bei Unfalleintritt ist, desto höher ist auch die Wahrscheinlichkeit, dass das Flugzeug Beschädigungen der Außenhaut erlitten hat, die dazu führen, dass ein Brand schneller ins Flugzeuginnere vordringen kann. Die Wahrscheinlichkeiten für eine Reduktion des Feuerwiderstandswertes in Abhängigkeit von den Unfallszenarien sind in Tabelle 31 aufgeführt. Hierbei wird unterschieden, ob es sich um eine mittlere, schwere oder sehr schwere mechanische Beschädigung handelt. Der Feuerwiderstandswert reduziert sich dann jeweils um 0:30, 1:00 oder 2:30 Minuten (1, 2 oder 5 Zeiteinheiten). Die Häufigkeiten hierfür sind gleich verteilt und liegen jeweils bei 33,3%. Des Weiteren wird angenommen, dass der Durchbrand der Außenhülle im oberen Bereich des Rumpfes (Kabinenbereich) 0:30 Minute (1 Zeiteinheit) länger benötigt als in den unten liegenden Frachtbereich.

Im Gegensatz zu einem Durchbrand ins Flugzeuginnere ist ein Durchbrand der Tragflächen und die damit verbundene weitere Freisetzung von Kerosin bei Außenbränden für die Modellbetrachtung an dieser Stelle nicht relevant, da bereits ein Flächenbrand vorhanden ist, der ein massives Auslaufen von Treibstoff voraussetzt.

- **Löschung Außenbrand (in der Simulation)**

Außenbrände verhalten sich immer nach den gleichen Regeln, unabhängig davon, ob es sich um Voll- oder Teilflächenbrände handelt. Jedes brennende Feld, das mit einer ausreichend großen Menge an Wasser (bzw. Wasser-Schaum-Gemisch) beaufschlagt wird, erlischt innerhalb derselben Zeiteinheit. Vereinfachend wird angenommen, dass in einem gelöschten Feld im Außenbereich nicht wieder ein Brand auftreten kann. Dies stellt auf den ersten Blick eine große Künstlichkeit bei der Modellierung des Löschvorgangs dar. Gerade von Löscheinätzen mit Schaummittel ist bekannt, dass die größte Gefahr darin besteht, dass der Schaumteppich durch angrenzende brennende Flächen zerstört wird und es zu einer erneuten Brandausbreitung auf bereits gelöschten Flächen kommt. Der Bereich des Flugzeugbrandschutzes unterscheidet sich hier insofern vom allgemeinen Brandschutz, dass ein Großteil der Löschtechnik speziell für den Fall eines Flugzeugbrandes entwickelt und dimensioniert wurde. So werden bei maximaler Pumpenleistung innerhalb von ein bis zwei Minuten große Mengen Wasser(-Schaum-Gemisch) ausgestoßen. Sind die Löschmittelvorräte der Fahrzeuge aufgebraucht, ist der Brand dann gelöscht oder das Flugzeug verloren. In dieser kurzen Zeit kann die Zerstörungsrate des Schaums durch angrenzende brennende Flächen vernachlässigt werden.

5. Simulation

Brennt es danach weiterhin unter dem Flugzeug, wird der Brand den Flugzeugrumpf zum Schmelzen bringen und sich ins Innere ausbreiten. Der maximale Schadensfall tritt ein. Auch in diesem Fall ist eine exakte Betrachtung der bereits gelöschten Flächen nicht mehr erforderlich.

5.2.4.2 Außenbrand an Bauteilen

Brände der außen liegenden Bauteile werden in die eigenen Kategorie „Außenbrände, Bauteile“ eingeteilt. Diese enthält die beiden Fälle „Fahrwerksbrand“ und „Triebwerksbrand“. Zwar gehören beide Bauteile zum Flugzeug, aber der Brand befindet sich außerhalb des Flugzeugrumpfes und wird i. d. R. von außen bekämpft. Daher wird die vorliegende Klassifizierung gewählt.

a) Triebwerksbrand

- **Brandverhalten Triebwerksbrand (in der Realität)**

Triebwerksbrände entstehen in der Regel, wenn es zu Undichtigkeiten der Kerosinzufuhr kommt und sich der Treibstoff an heißen Oberflächen entzündet. Ebenfalls denkbar ist ein Defekt, infolgedessen es zu einer Undichtigkeit der Brennkammer kommt. Dies kann sich allmählich über kleinste Leckagen aber auch schlagartig infolge einer Explosion ereignen.

- **Brandausbreitung Triebwerksbrand (in der Simulation)**

Bei der Ausbreitung von Triebwerksbränden werden zwei Gruppen von Triebwerken unterschieden, Triebwerke an Tragflächen sowie Hecktriebwerke. Letztere werden zur Vereinfachung wie APUs („auxiliary power unit“) behandelt. Brennt ein Triebwerk, das sich an einer Tragfläche befindet, länger als 6:00 Minuten (12 Zeiteinheiten), ohne dass mit der Brandbekämpfung begonnen wurde, so erfolgt ein Durchbrand der Unterseite der Tragfläche. Da in den Tragflächen der Treibstoff gelagert wird, ergibt sich hieraus eine Brandausbreitung in Form eines Flächenbrandes mit den oben beschriebenen Merkmalen. Bei Hecktriebwerken und APU kommt es ebenfalls nach 4 Minuten (8 Zeiteinheiten) zu einer Brandausbreitung. Hier schließt sich jedoch ein Innenbrand der Kategorie „Kabinenbrand“ an, da sich beide Einrichtungen oberhalb bzw. hinter der Kabine befinden.

- **Löschung Triebwerksbrand (in der Simulation)**

Für das vollständige Ablöschen eines Triebwerks wird ein Zeitbedarf von 1:30 Minute (3 Zeiteinheiten) veranschlagt. Des Weiteren gilt, dass das Löschen eines brennenden Triebwerks eine Brandausbreitung wirkungsvoll verhindert. Auch für Hecktriebwerke und APU gilt dies. Die schlechtere Erreichbarkeit auf Grund der konstruktiv bedingten hohen Lage dieser beiden Einrichtungen hat in der Simulation keinen Einfluss auf die reine Löschdauer, wohl aber auf den Zeitpunkt, zu dem das Löschen einsetzen kann.

5. Simulation

b) Fahrwerksbrand

- **Brandverhalten Fahrwerksbrand (in der Realität)**

Fahrwerksbrände entstehen in der Regel durch Überhitzung der Bremsen oder durch starke Reibung (z. B. bei blockierten Rädern). Ein reiner Fahrwerksbrand ist zunächst unproblematisch. Kritisch ist jedoch die Ausbreitung ins Flugzeuginnere.

- **Brandausbreitung Fahrwerksbrand (in der Simulation)**

Für das Fahrwerk selbst gibt es in der Simulation lediglich die zwei Zustände „brennt nicht“, was dem Normalzustand entspricht oder „brennt“. Eine Brandausbreitung innerhalb des Fahrwerks ist nicht möglich. Es besteht bei Fahrwerksbränden jedoch die Gefahr, dass sich der Brand durch den Fahrwerksschacht bis in die Kabine ausbreitet. In der Simulation wird daher angenommen, dass ein Fahrwerksbrand nach 2 Minuten (4 Zeiteinheiten) die Decke zwischen Fahrwerksschacht und Kabine überwunden hat und sich dann auf die Kabine ausbreitet. Die Folge ist ein Innenbrand mit der Spezifikation „Kabinenbrand“.

- **Löschung Fahrwerksbrand (in der Simulation)**

Das Modell zum Löschen eines Fahrwerksbrandes ist einfach. Nach einer Löschdauer von 1:30 Minute (3 Zeiteinheiten) ist das Feuer erfolgreich bekämpft. Mit dem Einsetzen der Löscharbeiten ist eine Brandausbreitung über den Fahrwerksschacht ausgeschlossen.

5.2.4.3 Innenbrand

Ein wesentlicher Faktor, der zur Beeinträchtigung des Gesundheitszustandes bzw. zur Verringerung der Überlebenschancen der Passagiere im Flugzeug beiträgt, sind Brände im Inneren des Flugzeugs. Die größte Gefahr geht hier (wie auch bei Bränden in Gebäuden) vom giftigen Brandrauch aus. Seine Entstehung und Wirkung wird im Kapitel 5.2.4.5 „Atemgift“ ausführlich beschrieben. Daneben sind die Passagiere vom Feuer selbst und der davon ausgehenden Wärmefreisetzung bedroht. Innerhalb eines Flugzeuges gibt es keine Brandabschnitte oder andere Schutzvorrichtungen, die die Passagiere von Feuer und Rauch trennen und damit schützen können. Vereinfacht ausgedrückt lässt sich die Lage in einem solchen Fall wie folgt beschreiben: Die Passagiere sind zusammen mit dem Feuer in einer Metallröhre eingeschlossen. Wie in Tabelle 20 ersichtlich, lassen sich zwei Arten von Innenbränden unterscheiden. Kabinenbrand und Frachtraumbrand. Deren charakteristische Merkmale sowie Besonderheiten bezüglich Ausbreitung und Löschmöglichkeiten werden im Folgenden genauer beschrieben. Wie bereits an anderer Stelle erwähnt sind die Erfahrungswerte für Flugzeugunfälle (von der Ursachenforschung abgesehen) im Detail oft sehr begrenzt. Dies gilt auch für das Wissen bezüglich Brandereignissen. Grundlage für die Modellierung sind daher Brandversuche, die von der Deutschen Forschungs- und Versuchsanstalt für Luft- und Raumfahrt (DFVLR), durchgeführt wurden [Marnert 1999, S. 144ff.].

5. Simulation

a) Kabinenbrand

- **Brandverhalten Kabinenbrand (in der Realität)**

Kabinenbrände entstehen oft durch technische Defekte, durch Überhitzung oder Fehlbedienung der Kücheneinrichtungen oder Zigarettenreste im Abfalleimer auf der Toilette. Entscheidendes Merkmal ist, dass sie bereits in der Kabine, d.h. im Flugzeugrumpf auf der Passagierebene entstehen.

- **Brandausbreitung Kabinenbrand (in der Simulation)**

Die Modellierung der Innenbrände bringt eine Künstlichkeit mit sich. Dies gilt in gleicher Weise für die Kabinenbrände wie auch für die später beschriebenen Frachtraumbrände. Die Ursache hierfür ist, dass die Simulation erst zum Zeitpunkt der abgeschlossenen Landung beginnt. Das Flugzeug ist also bereits zum Stehen gekommen und eine Evakuierung von Innen sowie ein Eingreifen der Einsatzkräfte von Außen sind möglich. Das Ausbrechen eines Innenbrandes exakt zum Zeitpunkt der Landung ist aber äußerst unwahrscheinlich (im Gegensatz zu einem Außenbrand als direkte Unfallfolge). In aller Regel wird ein Flugzeug den nächstgelegenen Flughafen anfliegen und eine Notlandung einleiten, sobald Rauch oder Feuer auftreten. Der Brand ist zum Zeitpunkt, an dem die Berechnung beginnt, also bereits vorhanden und hat das Entstehungsstadium überschritten. Die Entstehungsphase eines Brandes im Flugzeuginneren wird somit nicht simuliert. Jeder Kabinenbrand ist gemäß der zellulären Struktur demjenigen Sektor zugeordnet, in dem er entsteht. Wie bei allen Bränden nimmt die Ausbreitung im zeitlichen Verlauf zu.

Zunächst benötigt der Brand 2:30 Minuten (5 Zeiteinheiten), um sich jeweils nach vorne und nach hinten auf die angrenzenden Sektoren auszubreiten. Bis zu diesem Zeitpunkt ist die Brandentwicklung lokal begrenzt und somit auf den Entstehungssektor beschränkt. Nach der ersten Ausbreitung beträgt die Ausbreitungszeit nur noch 1:30 Minute (3 Zeiteinheiten). Danach erfolgt die Ausbreitung alle 1:00 Minute (2 Zeiteinheiten) um einen Sektor. Eine Brandausbreitung auf das tiefer gelegene Frachtdeck findet i. d. R. nicht statt, da sich (Feststoff-)Brände primär nach oben und nur sehr begrenzt nach unten ausbreiten. Bis zum Zeitpunkt eines möglichen Durchbrands vom Frachtdeck ins Passagierdeck können die Passagiere das Flugzeug verlassen und die Einsatzkräfte ins Flugzeug vordringen, um dort Hilfe zu leisten. Mit Eintreten eines Durchbrands besteht für die Passagiere, die sich im gleichen Sektor des Flugzeugs befinden, keine Überlebenschance mehr. In den angrenzenden Sektoren können sich die Passagiere sowie die Einsatzkräfte (die jetzt einen Löschangriff auf den betroffenen Sektor beginnen werden) aber weiterhin aufhalten und agieren.

Um der Tatsache Rechnung zu tragen, dass in der Entstehungsphase von Bränden, die bezüglich ihrer Wärmeemission und Ausbreitung zunächst noch keine direkte Gefahr darstellen, bereits durch die Freisetzung von Atemgiften eine unmittelbare Gefährdung der Passagiere besteht, wird folgender Ansatz gewählt: Für die Hälfte der Kabinenbrände (und auch der Frachtraumbrände) wird eine Freisetzung von Atemgiften angenommen, die analog der Modellierung von Schwelbränden (im Folgenden nach den Innenbränden beschrieben) stattfindet.

5. Simulation

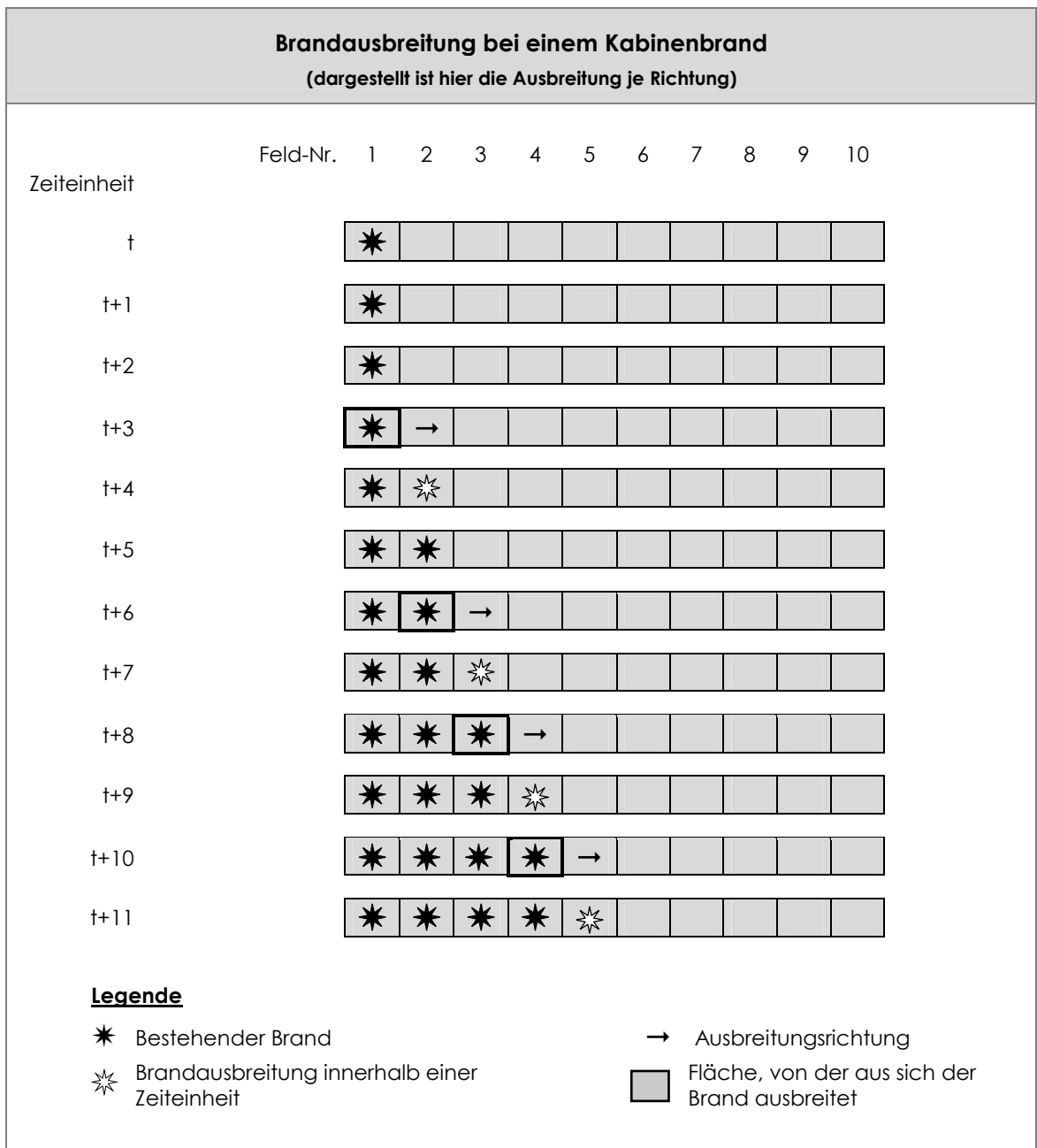


Abbildung 52: Brandausbreitung bei einem Kabinenbrand

Hierdurch wird berücksichtigt, dass die Passagiere unter Umständen bereits vor der Landung einer längeren Atemgiftexposition ausgesetzt sind. Die hat zur Folge, dass deren Atemgifttoleranz bereits teilweise ausgeschöpft ist und ggf. Einschränkungen bei der Handlungsfähigkeit bis hin zu Bewusstlosigkeit oder Tod auftreten.

5. Simulation

- **Löschung Kabinenbrand (in der Simulation)**

Es wird angenommen, dass ein Trupp zum Löschen eines Sektors 1:30 Minute (3 Zeiteinheiten) benötigt. Die Löschdauer bezieht sich hierbei auf einen Sektor mit einem Gang und einem Trupp mit einem Rohr. Bei Flugzeugen der Klassen 3 und 4, die über zwei Gänge in der Kabine verfügen, verdoppelt sich die erforderliche Löschdauer. Wird ein brennender Sektor von mehreren Trupps gelöscht (unabhängig davon, ob dies von einer oder zwei Seiten erfolgt), verringert sich die Zeit proportional. Wird ein brennender Sektor gelöscht, kann keine Brandausbreitung mehr in die Richtung erfolgen, aus der gelöscht wird. Hier zeigt sich nun eine weitere Künstlichkeit der Simulation. Rein rechnerisch wäre es bei der gewählten Modellierung möglich, dass ein einziger Trupp eine Kabine, die vollständig in Flammen steht, Sektor für Sektor löscht, bis der Brand vollständig bekämpft wurde. Diese rechnerisch vorhandene aber unrealistische Möglichkeit ist jedoch ohne Relevanz. Für die vorliegende Aufgabenstellung ist die Anzahl der geretteten Passagiere das Beurteilungskriterium. Da Passagiere, die das Flugzeug nicht aus eigener Kraft verlassen können, dem Feuer in einem Sektor schneller erliegen, als dieses gelöscht werden kann, wird es hier nicht zu einer Verfälschung des Einsatzerfolgs infolge einer unrealistischen Steigerung der Löschleistung kommen. Die Simulation bricht ein Schadensszenario immer ab, wenn alle Passagiere gerettet wurden oder keine Passagiere mehr zu retten sind. Das Löschen eines gesamten Flugzeugs durch einen Trupp ist somit ein irrelevantes Szenario.

- **b) Frachtraumbrand**

- **Brandverhalten Frachtraumbrand (in der Realität)**

Frachtraumbrände entstehen in der Regel durch technische Defekte oder Überhitzung von elektrischen Bauteilen, aber auch durch Selbstentzündung der Fracht. Der Technikraum (E-Compartment oder auch Avionik-Raum genannt) wird nicht gesondert betrachtet, sondern vereinfacht der Frachtebene zugerechnet.

- **Brandausbreitung Frachtraumbrand (in der Simulation)**

Die Ausbreitung von Bränden erfolgt im Frachtbereich nach den gleichen Gesetzmäßigkeiten wie bei Kabinenbränden. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit erhöht sich mit der Größe des Brandes und es findet stets ein Übergreifen auf benachbarte Sektoren statt. Es werden hierfür die selben Zahlenwerte angenommen wie bei Kabinenbränden (Abbildung 51). Neben der Brandausbreitung innerhalb der Frachtebene selbst kann es auch zu einem Durchbrand der Zwischendecke, die den Passagierbereich vom Frachtbereich trennt, kommen. Die Folge ist eine Brandausbreitung auf die Kabine. Um zu berücksichtigen, dass sich ein Brand abhängig von den konkreten Verhältnissen im Frachtraum unterschiedlich entwickeln kann, wird eine Zufallsverteilung verwendet. Ein Durchbrand der Zwischendecke erfolgt zu 50%, wenn diese dem Feuer 5:00 Minuten (10 Zeiteinheiten) ausgesetzt ist, und zu 50% nach 10:00 Minuten (20 Zeiteinheiten).

5. Simulation

- **Löschung Frachtraumbrand (in der Simulation)**

Auch für das Löschverhalten wird angenommen, dass hier die gleichen Wirkungszusammenhänge wie bei Löschvorgängen in der Kabine herrschen. Folglich werden die gleichen Zeiten für das Löschen eines Sektors benötigt. Dies gilt gleichermaßen für die Abhängigkeit von der Löschdauer von der Branddauer wie auch für den Einsatz mehrerer Trupps beim Löschen.

5.2.4.4 Schwelbrand

Schelbrände finden zwar im Flugzeuginneren statt, ihre Charakteristik unterscheidet sich aber so maßgeblich von den Bränden, die bisher unter der Kategorie „Innenbrände“ beschrieben wurden, dass hier zusätzlich eine eigene Kategorie „Schwelbrand“ gebildet wird.

- **Brandverhalten Schwelbrand (in der Realität)**

Schelbrände sind Brände, die über längere Zeit ohne nennenswerte Flammenbildung und Brandausbreitung bestehen. Streng genommen trifft dies auch auf Glimmbrände zu, die ein ähnliches Brandverhalten aufweisen. Schwel- und Glimmbrände unterscheiden sich per Definition hinsichtlich des beschränkenden Faktors. Während bei Schwelbränden ausreichend Brennstoff aber zu wenig Oxidationsmittel (i. d. R. Luftsauerstoff) zur Verfügung steht, fehlt es beim Glimmbrand an Brennstoff und nicht an Oxidationsmittel. Vereinfacht soll im Folgenden (trotz definitorischer Unschärfe) nur der Begriff Schwelbrand benutzt werden, da dieser im Feuerwehrwesen für beide Vorgänge gebräuchlich ist. Diese zwei Aspekte (geringe Brandausbreitung und geringe Flammenbildung) führen dazu, dass sie oft über längere Zeit nicht entdeckt werden oder sich nicht lokalisieren lassen. Charakteristisches Merkmal ist die latente Rauchentwicklung. Da Brandrauch bereits bei geringen Mengen seine toxische Wirkung entfalten kann, liegt hier seine Gefahr. Ohne ersichtlichen Brand findet eine Verrauchung des Flugzeugs statt. Zudem kann ein Schwelbrand jederzeit in einen offenen Brand umschlagen.

- **Ausbreitung Schwelbrand (in der Simulation)**

Schelbrände führen in der Simulation bereits zu einer Rauchentwicklung, bevor sie zu einem offenen Brand werden. Die Brenndauer eines Schwelbrandes vor der Landung (und damit vor Beginn der Simulation) wird über eine Zufallsvariable dargestellt. Die Spanne beträgt zwischen 1:30 und 20:00 Minuten (3 bis 40 Zeiteinheiten) und ist gleichmäßig verteilt. Hierdurch wird berücksichtigt, dass Brände im Flugzeuginneren, die bereits längere Zeit vor dem Unfalleintritt bestanden, aufgrund der erfolgten Rauchfreisetzung einen entscheidenden Einfluss auf den Gesundheitszustand und die Reaktionsfähigkeit der Passagiere haben. Diese Wirkung besteht jedoch nicht nur bei Schwelbränden, sondern kann bei allen Bränden im Flugzeuginneren auftreten. Aus diesem Grund wird dieses Modell auch für die Hälfte der Kabinen- und Frachtbrände verwendet. Die hierbei resultierende Rauchfreisetzung in Abhängigkeit von der Zeit ist im folgenden Abschnitt „Atemgifte“ beschrieben. Ein Schwelbrand bricht mit einer Häufigkeit von 50% in einen offenen Brand aus. Der Zeitpunkt, zu dem dies geschieht bzw. möglich ist, ist variabel. In der Simulation findet dieses Ereignis innerhalb des oben genannten Zeitraums mit der gleichen Häufigkeit (also mit 1 zu 38 je Zeiteinheit) statt.

5. Simulation

Der Entstehungsstandort ist gleich verteilt und kann folglich an jeder Stelle des Flugzeugs entstehen, also in allen Sektoren und gleichermaßen in der Kabine wie im Frachtbereich. Der genaue Ort wird auch hier mit einer gleich verteilten Zufallsvariable ermittelt. Schwelbrände können grundsätzlich keinen Durchbrand zur Folge haben. Erst wenn sie sich in einen „richtigen“ offenen Brand verwandeln, verfügen sie über genügend thermische Energie, um Teile der Flugzeugstruktur zu zerstören und zu überwinden. Diese Eigenschaften eines Brandes werden bei den anderen Brandformen beschrieben.

▪ Löschen Schwelbrand (in der Simulation)

Es wird angenommen, dass die Feuerwehr einen Schwelbrand wie einen Kabinen- oder Frachtbrand innerhalb von 1:30 Minute (3 Zeiteinheiten) löschen kann, sofern sie ihn lokalisiert hat. Die Schwierigkeit liegt hier eindeutig bei dessen Auffinden, da Schwelbrände in der Regel nicht sichtbar entstehen, sondern in Geräten, an Kabeln, hinter Verkleidungen oder an heißen, eng eingebauten technischen Einrichtungen. Dies entspricht der Einsatzerfahrung der Flughafenfeuerwehr Frankfurt/Main bezüglich des Auffindens von Schwelbränden in Flugzeugen. In der Simulation wird daher erst dann ein Löschversuch vorgenommen, sobald der Schwelbrand in einen offenen Brand übergegangen ist. Dies kann dazu führen, dass der Schwelbrand eigenständig erlischt und nicht während des Einsatzablaufs von den Einsatzkräften gefunden und gelöscht wird. Dies ist aus der Praxis bekannt. Oft wird die Ursache für Brandrauch erst vom Fachpersonal bei den anschließenden Wartungs- und Inspektionsarbeiten ermittelt.

5.2.4.5 Atemgift

Ein wesentlicher Faktor, der zur Beeinträchtigung des Gesundheitszustandes bzw. zur Verringerung der Überlebenschancen der Passagiere im Flugzeug beiträgt, sind die im Brandrauch enthaltenen Atemgifte. Eine Reihe von Stoffen, die bei Verbrennungsprozessen im Allgemeinen und speziell im Flugzeug freigesetzt werden, können zu gesundheitlichen Schädigungen führen. Vor allem Kunststoffe, aber auch Lackierungen und Beschichtungen werden im Brandfall zu extrem giftigen Gasen umgewandelt. Im Feuerwehrwesen wird allgemein von „Atemgiften“ gesprochen. Die Schadstoffe können in verschiedenen Aggregatzuständen vorliegen:

- Gasform
- Aerosole (= flüssig)
- Feststoff / Stäube

Die Wirkung der Atemgifte auf den menschlichen Körper lässt sich in drei Gruppen einteilen:

- Erstickende Wirkung (durch Verdrängung von Sauerstoff)
- Reiz- und Ätzwirkung
- Blut- und Nervengifte

5. Simulation

Für die vorliegende Fragestellung ist es jedoch von untergeordneter Bedeutung, in welchem Aggregatzustand die Atemgifte vorliegen und welche Wirkung im menschlichen Körper letztlich zur Schädigung führt. Von Bedeutung sind an dieser Stelle vielmehr die Auswirkungen der Schädigung, auf die im Folgenden näher eingegangen wird.

▪ **Ausbreitung und Wirkung von Atemgiften (in der Realität)**

Bei jedem Brand wird Kohlenmonoxid (CO) in kritischen Konzentrationen freigesetzt. Durch die schnelle Wirkung auf die (innere) Atmung (es handelt sich um ein Blut- und Nervengift, das die O₂-Aggregation, also die Sauerstoffanlagerung, an den roten Blutkörperchen verhindert [IdF NRW 1999, S. 14f.]), die bereits bei sehr geringer Konzentration eintritt, findet eine ernsthafte Gefährdung bzw. die letale Wirkung in der Regel zuerst durch CO statt. Für die Berechnung der Brandrauchfreisetzung und die Wirkung auf den Gesundheitszustand der Passagiere bedeutet dies, dass Kohlenmonoxid in der Simulation stellvertretend für alle vorhandenen Atemgifte als signifikanter Parameter verwendet werden kann. Eine weitere Betrachtung der sonstigen Atemgifte kann somit entfallen.

Auswirkungen von CO-Exposition (1)	
CO Konzentration [Vol-%]	Inhalationszeit und Folgen
0,003 %	(Maximale Arbeitsplatz-Konzentration bei 8-stündiger Arbeitszeit) für BRD
0,02 %	Leichte Kopfschmerzen innerhalb von 2 – 3 Stunden
0,04 %	Kopfschmerzen im Stirnbereich, breiten sich innerhalb von 1 – 2 Stunden im ganzen Kopfbereich aus
0,08 %	Schwindel, Übelkeit und Gliederzucken innerhalb von 45 Minuten, Bewusstlosigkeit innerhalb von 2 Stunden
0,16 %	Kopfschmerzen, Übelkeit, Schwindel innerhalb von 20 Minuten, Tod innerhalb von 2 Stunden
0,32 %	Kopfschmerzen, Übelkeit, Schwindel innerhalb von 5 – 10 Minuten, Tod innerhalb von 30 Minuten
0,64 %	Kopfschmerzen und Schwindel innerhalb von 1 – 2 Minuten, Tod innerhalb von 10 – 15 Minuten
1,28 %	Tod innerhalb von 1 – 3 Minuten

Tabelle 21: Auswirkungen von CO-Exposition (1)

Quelle: biomess o. J.

Der Anteil an Brandrauch nimmt in der Regel bei stetiger Brandentwicklung exponentiell zu, da bei Bränden meist unvollständige Verbrennungen stattfinden und somit zu den bereits vorhandenen Gasen je Zeiteinheit zusätzlich eine immer größere Menge weiterer Rauchgase und Partikel freigesetzt wird. In zwei Fällen trifft dieses Verhalten nicht zu. Einerseits bei vollständiger Verbrennung, da hier alle Kohlenstoffverbindungen in Kohlendioxid (CO₂) umgewandelt werden und andererseits bei Schwelbränden, da diese nicht unbedingt eine wachsende Brandentwicklung aufweisen.

5. Simulation

Für den Fall eines Flugzeugbrandes gibt es keine gesicherten Erkenntnisse, wie sich Brände und damit die CO-Konzentration entwickeln, da Flugzeuge nicht über Mess- und Aufzeichnungseinrichtungen für Brandrauch bzw. CO verfügen. Glücklicherweise sind solche Fälle (wie letztlich alle Flugzeugunfälle) relativ selten, so dass folglich keine Erfahrungswerte vorliegen.

Eine anhaltende Freisetzung von CO führt in einem geschlossenen System, wie es ein Flugzeug darstellt, aber in jedem Fall zu einer Erhöhung der CO-Konzentration. Die CO-Entwicklung muss also anderweitig bestimmt werden. Basierend auf der Auswertung zweier Flugzeugunfälle, bei denen der Brandrauch maßgeblich zur hohen Zahl der Opfer beigetragen hat, im Abgleich mit den Erkenntnissen, wie sich verschiedene CO-Konzentrationen auf den menschlichen Körper auswirken, soll ein Modell entwickelt werden.

Auswirkungen von CO-Exposition (2)	
CO Konzentration [Vol-%]	Symptome
0,005 %	MAK-Wert
0,01 %	auch nach längerer Zeit kein Vergiftungssymptome
0,02 %	Kopfschmerz nach 2-3 Stunden
0,03%	Vergiftungserscheinung nach 2-3 Stunden
0,04%	Vergiftungserscheinung nach 1-2 Stunden
0,05%	Halluzinationen nach 30-120 Minuten
0,1%	Gangstörungen, Tod nach 1-2 Stunden
0,15%	Tod nach einstündiger Inhalation
0,3%	tödlich nach 30 Minuten
0,8%	plötzlicher Erstickungstod

Tabelle 22: Auswirkungen von CO-Exposition (2)

Quelle: BF FFM 2001, S. 2

Zunächst lässt sich die Wirkung von CO auf den Menschen den Tabelle 21 und Tabelle 22 entnehmen. Es fällt auf, dass die Werte nicht exakt übereinstimmen. Die Abweichung ist jedoch gering, insofern geben sie den gleichen Sachverhalt wieder. Die für die Simulation gewählten Grenzwerte sind in der Tabelle 24 aufgeführt.

5. Simulation

Rauchentwicklung bei exemplarischen Flugzeugunfällen			
Unfall der AIR CANADA am 2. Jun. 1983		Unfall der SAUDIA am 14. Aug. 1980	
Zeit	Meldung / Lage	Zeit*1	Meldung / Lage
18:51	Sicherung der Toilettenpumpe fliegt mehrfach raus und lässt sich nicht mehr „reindrücken“. Ursache: Kabelbrand (kein Rauchmelder in der Toilette vorhanden) Crew denkt an Überlastung und widmet sich nicht weiter der Angelegenheit.	21:08	Start der Maschine
		21:14	Automatische Feuermeldung im Cockpit, Crew liest Notfallanweisungen und prüft, ob es sich nicht doch um Fehlalarm handelt.
		21:18	Crew hält Feuer für real und findet Rauch-Notfallanweisung.
ca. 18:55	Passagiere nehmen Rauch wahr, Toilette ist verrauchte, keine Flammen sichtbar, Crew versucht zweimal vergeblich Brand zu löschen.	21:19	Rauchschwaden ziehen bereits durch die Kabine. Erste Anzeichen von Panik bei Passagieren.
19:02	Crew verständigt Pilot über den Rauch in der Toilette.	ca. 21:23	In der Kabine bricht Panik aus.
19:04	Rauch füllt mittlerweile die halbe Kabine. Durch die Löschversuche verringert sich zunächst die Rauchentwicklung. Pilot leitet daher keinen (!) Notabstieg ein.	18:27*1	Giftige Gase breiten sich in der Kabine aus, viele Passagiere kollabieren. Trotz Nachfrage ordnet der Kapitän keine sofortige Evakuierung nach der Landung an.
19:05	Hauptstromversorgung fällt aus.	18:36*1	Landung, keine (!) Evakuierung, Maschine rollt weiter zur Vorfeldposition.
19:07	Ersatzstromversorgung fällt ebenfalls aus und damit auch die Fluglageanzeige. Batterie-Notsystem springt an. Einige Systeme arbeiten wieder.	18:40*1	Evakuierung angekündigt, Triebwerke laufen jedoch weiter.
ca. 19:09	Rauch im Cockpit ist so dicht, dass die Piloten kaum noch die Instrumente sehen können.	18:43*1	Triebwerke werden ausgeschaltet, von Außen sind bereits Flammen in der Kabine zu sehen, von innen werden keine Türen geöffnet *2.
ca. 19:12	Sämtliche Navigationseinrichtungen fallen aus, Tower lotst Maschine per Funkanweisung.	19:12*1	Es gelingt der Rettungsmannschaft, eine Tür von außen zu öffnen.
19:20	Landung, sofortige Evakuierung, Löschangriff der Flughafenfeuerwehr von Außen		Fazit: Alle 301 Insassen (Passagiere und Crew) tot
19:30	Wegen Schwierigkeiten mit den Hitzeschutzanzügen kann die Feuerwehr erst jetzt einen Innenangriff vornehmen.		
	Fazit: 26 Passagiere und 5 Crewmitglieder gerettet 15 Passagiere tot, davon 9 im Gang (2 haben im Rauch die Notausstiege übersehen)		

Tabelle 23: Rauchentwicklung bei exemplarischen Flugzeugunfällen

Quelle: Richter et al. 1997, S. 268f und S. 297ff.

*1 Es ist einleuchtend, dass die Maschine nach der Feuermeldung nicht noch 21 Stunden geflogen sein kann. Die Zeiten wurden so übernommen, wie sie in der Quelle angegeben sind.

5. Simulation

Der Zeitsprung ist vermutlich auf einen Fehler in den Aufzeichnungen oder der Literatur zurückzuführen. Ebenfalls denkbar wäre, dass der Autor die Zeiten des Startflughafens und des Zielflughafens vermischte. Zwischen Karachi in Pakistan und Riyadh bzw. Dschidda (gelegentlich auch „Jeddah“ geschrieben) in Saudi Arabien liegt ein Sprung von zwei Zeitzonen.

- *2 Bei diesem Flugzeugtyp müssen die Türen zum Öffnen einige Zentimeter nach innen gezogen werden. Vermutlich drückten die hinteren Passagiere in ihrer Panik die vorne stehenden Personen so stark an die Türen, dass ein Öffnen nicht mehr möglich war.

Über diese Erkenntnisse hinaus dienen die Flugzeugunfälle der Air Canada am 2. Juni 1983 und der Saudia am 14. August 1980 dazu, die Freisetzung von Atemgiften zu modellieren (Tabelle 23). Bei beiden Ereignissen kam es zu Innenbränden. Da in beiden Fällen in den Unfallberichten auf Basis der Gespräche zwischen Crew und Cockpit sowohl Aussagen zur Rauchentwicklung als auch zum Zustand und Verhalten der Passagiere vorhanden sind, können hier Rückschlüsse auf das Brandverhalten bzw. die Rauchentwicklung bei Innenbränden gezogen werden. Unbekannt bleibt in beiden Fällen natürlich die Zeitdauer, in der das Feuer unbemerkt, also mit vernachlässigbarer Rauchentwicklung, gebrannt hat. Dieser Zeitraum wird, wie es bereits im Kapitel 5.2.4.4 „Schwelbrand“ beschrieben wurde, mit einem Intervall von 1:30 bis 20:00 Minuten (3 bis 40 Zeiteinheiten) abgeschätzt.

▪ Ausbreitung und Wirkung von Atemgiften (in der Simulation)

Gesucht ist eine Funktion, mit der sich die beschriebenen Ereignisse mathematisch darstellen lassen. Das rechnerische Modell muss also zu den in Tabelle 1 angegebenen Zeiten jeweils eine CO-Konzentration ermitteln, bei der der Zustand der Passagiere mit den Symptomen aus Tabelle 21 und Tabelle 22 übereinstimmt. Da es sich bei einer Brandausbreitung um ein „natürliches“ exponentielles Wachstum handelt, wird als Basis eine e-Funktion mit der Zeit (vielmehr der Anzahl der Zeitschritte in der Simulation) im Exponenten verwendet. Dies erscheint plausibel, da der zur Verfügung stehende Luftsauerstoff im Flugzeug begrenzt ist und somit ein größerer Brand eine größere Menge an CO bedingt. Aus diesen Anforderungen ergeben sich die Formeln (43) und (44). Die Parameter in den beiden Formeln wurden iterativ im Abgleich mit den Zeit-CO-Konzentration-Beziehungen aus Tabelle 21 und Tabelle 22 ermittelt. Hieraus ergibt sich:

$$\Delta K_{CO}(t) = \frac{10}{42.288} e^{\frac{t}{10}} \quad (43)$$

mit:

- ΔK_{CO} - Veränderung der CO-Konzentration (je Zeiteinheit)
- t - Zeit in [0:30 min], da für die Simulation ein Halbminutenraster gewählt wurde
- e - Eulersche Zahl (= 2,7183)

sowie:

5. Simulation

$$K_{CO}(t) = \sum_{t=0}^t \Delta K_{CO}(t) = \sum_{t=0}^t \frac{10}{42.288} e^{\frac{t}{10}} \quad (44)$$

mit:

K_{CO} - CO-Konzentration zum Zeitpunkt t

Die Werte, die sich mit den Formeln ermitteln lassen, sind beispielhaft in der (Werte-) Tabelle 24 dargestellt.

Modell der CO-Entwicklung bei Bränden im Flugzeug				
Zeit [min]	Zeiteinheiten [0:30 min]	CO-Entstehung	CO-Konzentration	Wirkung (in der Simulation)
0:30	1	0,00026 %	0,00026 %	---
5:00	10	0,00064 %	0,00427 %	---
10:00	20	0,00175 %	0,01588 %	---
15:00	30	0,00475 %	0,04743 %	---
20:00	40	0,01291 %	0,13319 %	Desorientierung ab
25:00	50	0,03510 %	0,36631 %	Ohnmacht ab 0,30%
27:30	55	0,05786 %	0,60555 %	Tod ab 0,6%
30:00	60	0,09540 %	1,00000 %	---

Tabelle 24: Modell der CO-Entwicklung bei Bränden im Flugzeug

Sind Türen des Flugzeugs im Rahmen der Evakuierung oder durch die Feuerwehr zur Schaffung von Rauchabzugsöffnungen geöffnet worden, reduziert sich der Brandrauch im Flugzeuginnenen.

Entrauchende Wirkung von geöffneten Flugzeigtüren	
Anteil geöffnete Türen	Faktor für Rauch- und Wärmeabzug f_{RWA}
0	0
≥ 10%	33%
≥ 50%	67%
≥ 90%	100%

Tabelle 25: Entrauchende Wirkung von geöffneten Flugzeigtüren

Die entrauchende Wirkung ist hierbei abhängig vom Anteil der geöffneten Türen. Folgender Zusammenhang wird vereinfacht für die Modellierung zugrunde gelegt:

5. Simulation

Das Vorhandensein von Rauchabzugsöffnungen hat keinen Einfluss auf die zuvor beschriebene Rauchentstehung. Jedoch werden in jeder Zeiteinheit auch Teile des jeweils neu entstandenen Brandrauchs abgeführt. Dazu wird auf Basis von Formel (44) folgendes Rechenmodell gebildet:

$$K_{\text{CO,RWA}}(t) = f_{\text{RWA}} \cdot K_{\text{CO}}(t) \quad (45)$$

mit:

- $K_{\text{CO,RWA}}$ - CO-Konzentration bei Berücksichtigung eines Rauch- und Wärmeabzugs []
- f_{RWA} - Faktor zur Berücksichtigung eines Rauch- und Wärmeabzugs []

5. Simulation

5.3 Statische Elemente (Parameter)

Die statischen Elemente lassen sich in die drei Gruppen „Schadenslage“, „allgemeine Rahmenbedingungen“ und „Verletzungsverteilung“ einteilen. Sie definieren die Ausgangssituation und die Rahmenbedingungen, unter denen die Simulationen durchlaufen werden. Die Variationsbreiten der verschiedenen statischen Elemente und deren Einfluss auf die Abläufe, also auf die Verhaltensmuster der dynamischen Elemente, werden im Folgenden erörtert.

Bei der Diskussion, welches Kriterium zur Charakterisierung eines Szenarios eines Flugzeugunfalls das erste (und grundlegendste) Unterscheidungsmerkmal ist, gab es in Fachkreisen sehr unterschiedliche Auffassungen. Im Gespräch waren es vor allem die Schadensart und hier insbesondere die Brandarten (z. B. Außenbrand, Innenbrand), die Schadensentstehung (Kollision, Startabbruch etc.), der Schadensstandort (on/near Airport, off Airport), die Schwere des Schadensereignisses (überlebbar, nicht überlebbar) und die Alarmierungshistorie (angekündigte Notlandung oder Alarmierung nach Schadenseintritt), die als maßgebliche Punkte für die Bestimmung und Charakterisierung von Flugzeugunfällen genannt wurden. Dies zeigt, dass es selbst für Fachleute schwierig ist, ein einzelnes Merkmal zu benennen, das einen Flugzeugunfall hinreichend beschreibt. Es sind also zweifellos viele Merkmale, die für eine umfassende Lagebeschreibung wichtig sind. Letztlich ist ein Flugzeugunfall ein sehr komplexes Ereignis. Ein Schadensbild ergibt sich (ähnlich wie bei einem Puzzle) aus einer Vielzahl einzelner Detailinformationen. Zur Bearbeitung dieses Schadensbildes dienen die bereits angesprochenen statischen Elemente. Sie definieren die Ausgangssituation sowie die Rahmenbedingungen, unter denen die Rettungsmaßnahmen in der Simulation durchgeführt werden. Die statischen Parameter ändern sich im Lauf der Einsatzentwicklung in der Regel nicht mehr. Ein Beispiel für ein solches statisches Element ist das Wetter. Für die Modellierung der Simulation ist vor allem von Bedeutung, welche Parameter Einfluss auf den Ablauf der sich anschließenden Rettungsmaßnahmen haben. Der Sammlung und Aufbereitung der Parameter liegt folgende Vorgehensweise zugrunde:

- Zunächst werden alle denkbaren Unfallparameter zusammengetragen. Es folgt eine Prüfung auf Relevanz unter dem Gesichtspunkt der durchzuführenden Untersuchung (Zusammenhang von Einsatzerfolg und Einsatzkräfteanzahl).
- Im nächsten Schritt wird der Einfluss der Anzahl an Parametern sowie deren Ausprägungen auf den zu erwartenden Rechenaufwand erörtert.
- Als Konsequenz daraus wird geprüft, ob sich die Anzahl der Parameter und die Anzahl der Ausprägungen noch weiter zusammenfassen oder gruppieren lassen. Dies erfolgt mit der Absicht, den Rechenaufwand für die praktische Durchführung der Simulation zu verringern.
- Für die relevanten Parameter werden dann in einem weiteren Schritt die Auswirkungen auf das Einsatzgeschehen analysiert sowie die Wirkungszusammenhänge beschrieben und in Zahlen gefasst.

5. Simulation

5.3.1 Theoretische Merkmale von Flugzeugunfällen

Zur präzisen Beschreibung von Flugzeugunfällen ist eine Vielzahl an Merkmalen erforderlich, da die Schadensszenarien eine große Variationsvielfalt aufweisen. Um diese beträchtliche Bandbreite in eine praktikable Größenordnung zu überführen, wird die Systematik des morphologischen Kastens angewandt. Dies ist insofern notwendig, da alle Parameter, die als signifikant beurteilt werden, auch mathematisch in der Modellierung Eingang finden müssen.

Die Tabelle 26 „Parameter und ihre Ausprägungen bei Flugzeugunfällen“ dient hier als Ausgangspunkt. Zunächst werden alle Parameter mit ihren möglichen Ausprägungen aufgeführt. Zweifellos wird die Kombination aller unten aufgeführten Unfallparameter nicht jeden möglichen Flugzeugunfall erfassen. Der Anteil der nicht berücksichtigten Fälle darf aber als so gering eingeschätzt werden, dass er für das weitere Vorgehen als unrelevant beurteilt werden kann. Bei Tabelle 26 handelt es sich streng genommen um eine vieldimensionale Betrachtung gemäß der Methodik des morphologischen Kastens, die jedoch zum Zweck der besseren Übersichtlichkeit tabellarisch dargestellt wird. Im weiteren Verlauf erfolgt eine Betrachtung und Diskussion der Parameter und ihrer möglichen Ausprägungen. Ziel ist es hierbei, die Merkmale, die zur charakteristischen Beschreibung einer Schadenslage mit Flugzeugen erforderlich sind, auf eine Größenordnung zu reduzieren, die in einer Computersimulation sinnvoll erfasst und verarbeitet werden kann. Hierzu wird erörtert, inwieweit sich die aufgeführten Parameter und Parameterausprägungen zusammenfassen bzw. vereinfachen lassen oder ganz entfallen können.

Die Tabelle 26 ist wie folgt strukturiert:

- Die Parameter werden in der ersten Gliederungsebene in die zwei Kategorien „Umweltabhängige Parameter“ und „Unfallabhängige Parameter“ geteilt.
- In der Kategorie „Umweltabhängige Parameter“ (hier ist „Umwelt“ nicht zu verwechseln mit der häufig gebrauchten Bedeutung „Natur“) sind alle Größen beschrieben, die während bzw. nach dem Schadenseintritt vorherrschen und die unabhängig vom Flugzeugunfall bestehen.
- In der Kategorie „Unfallabhängige Parameter“ werden alle Größen aufgeführt, die erst durch das Eintreten des Unfalls zu Bedeutung kommen bzw. entstehen.
- Jede Kategorie wird in mehrere Klassen eingeteilt, diese wiederum in verschiedene Unterklassen. Am Ende ergeben sich hieraus die einzelnen Parameter mit ihren möglichen Ausprägungen.

5. Simulation

Parameter und ihre möglichen Ausprägungen bei Flugzeugunfällen				
Kategorie	Klasse	Unterklasse	Parameter	Ausprägung
Umweltabhängige Parameter	Wetter	Niederschlag	Niederschlagsart ^{*(3)}	Trocken / kein Niederschlag Nieselregen Starkregen Schneefall
			Zustand Fahrbahn ^{*(3)}	Normal Nass Schneebedeckt Vereist
		Wind	Windstärke ^{*(6)}	Windsstill Leicht windig Stark windig
			Windrichtung ^{*(6)} (zu Flugzeug u. Brand)	Neutral / unrelevant Nützlich Schädlich
		Sichtverhältnisse ^{*(2)}	Bewölkung / Nebel	Normal Nebel (CAT II/ III)
	Tageszeit ^{*(2)}			Tag Nacht
	Technik	Versagen von Technik		Volle Leistungsfähigkeit Versagen tritt ein
Unfallabhängige Parameter	Unfallobjekt	Flugzeugmuster	Nutzung	Passagierflugzeug Frachtflugzeug Kombimaschine Militärische Nutzung
			Triebwerksart	Düsentriebwerk (u. Turbofan) Propeller Turboprop(-eller)
			Anordnung Triebwerke	1 mittig 1 links + 1 rechts 1 links + 1 mittig + 1 rechts 2 links + 2 rechts
			Abmessung	Abhängig vom Flugzeugtyp
		Transportgut	Passagiere	Sitzanzahl
			Beladung	Gefahrgut (DGR) Fracht Koffer Tiere Crewcontainer
		Schadens- entstehung	Notlandung ^{*(1)}	
	Unfallzeitpunkt		Auf Position Rollverkehr (Taxing) Startphase Flugphase Landephase	
	Kollision ^{*(1)}		Keine Gelände Gebäude Fahrzeug Flugzeug	
	Dynamik		Geschwindigkeit	Geschwindigkeit = 0 (Stand) Rollgeschwindigkeit Startgeschwindigkeit (V ₁ / V ₃)
			Verzögerung	Keine Verzögerung / Stand Normale Verzögerung Max. Verzögerung
	Schadenslage	Standort	Lage zum Airport ^{*(1)}	On/near Airport Off Airport

⋮

⋮

⋮

⋮

⋮

5. Simulation

Parameter und ihre möglichen Ausprägungen bei Flugzeugunfällen						
Kategorie	Klasse	Unterklasse	Parameter	Ausprägung		
Unfallabhängige Parameter	Schadenslage	Standort	Abstand zur Feuerwache ^{*(1)}	Kurz Mittel Weit Sehr weit		
			Standort LFZ ^{*(1)}	Auf der Bahn Neben der Bahn Vor der Bahn Hinter der Bahn Vorfeld Gelände außerhalb		
			Untergrund ^{*(1)}	Beton Gras Freies Gelände Wald Wasser Gebäude		
		Zustand LFZ ^{*(4)}	Horizontale Lage des Flugzeugs ^{*(4)}	Normal Schräg (ein Fahrw. eingeknickt) Platt (alle Fahrw. eingeknickt) Turnover		
			Zustand Rumpf ^{*(4)}	Unbeschädigt Auseinander gebrochen Mehrfach zerteilt Zertrümmert		
		Treibstoff	Treibstoffart	Treibstoffart	Kerosin Flugbenzin Hydrazin	
				Treibstoffmenge	Abhängig vom Flugzeugtyp	
			Befüllungsgrad	Befüllungsgrad	Leer Halbvoll Voll	
				Leckagegrad	Keine Leckage Tropfender / geringer Austritt Massiver Austritt	
		Brand	Feuer ^{*(5)}	Feuer ^{*(5)}	Kein Brand Außen - Fläche Außen - Flügel Außen - Triebwerk Außen - Fahrwerk Innen - Kabine Innen - Fracht Schwelbrand (innen)	
				Rauch ^{*(5)}	Kein Rauch Leichte Verrauchung Massive Verrauchung	
		Betroffene Personen	Flugzeuginsassen	Unfallschwere ^{*(7)}	Unfallschwere ^{*(7)}	Keine Verletzten Leicht Normal Schwer
					Anzahl	Nur Crew Crew + Passagiere (0 bis 900+)
			Verhalten	Kommunikation (= Sprache + Kontakt)	Crew	Gute Verständigung Schlecht / nicht möglich
	Passagiere				Gibt klare Anweisungen Desorientiert / „planlos“	
	Evakuierung ^{*(4)}				Sofort Auf Anordnung der Feuerwehr	

Tabelle 26: Parameter und ihre möglichen Ausprägungen bei Flugzeugunfällen

5. Simulation

Legende für Tabelle 26

*(1...7) Relevante Parameter. Gleiche Nummern bedeuten, dass diese Parameter bereits durch andere Größen berücksichtigt sind oder aus unten beschriebenen Gründen zu einer Größe zusammengefasst werden. Die Nummerierung erfolgt hier in Anlehnung an Tabelle 31, die verbindlich die maßgeblichen Parameter und Werte für die Simulation enthält.

- **Niederschlag ^{*(3)} (Niederschlagsart und Zustand Fahrbahn)**

Die Parameter „Niederschlagsart“ und der „Zustand der Fahrbahn“ können zusammengefasst werden. Die wesentlichen Aspekte hierbei sind die Auswirkungen auf die Eingreifzeit (= Verzögerung) der Einsatzkräfte, die sich aus den wetterbedingten Fahrbahnverhältnissen ergeben, eine unterstützende Wirkung auf die Löschmaßnahmen bei starkem Regen und allgemein eine Erschwernis bei allen Rettungsarbeiten durch schlechtes Wetter. Ihre Eintrittshäufigkeit und ihre Auswirkungen auf die Rettungsmaßnahmen sind in Tabelle 31 dargestellt und nachfolgend beschrieben.

- **Wind ^{*(6)} (Windstärke und Windrichtung)**

„Windstärke“ und „Windrichtung“ lassen sich zusammenfassen, da nur ihr effektiver Einfluss (in Kombination beider Werte) auf die Löschmaßnahmen und die Rauchausbreitung von Bedeutung sind. Eine Beschreibung der Wirkungszusammenhänge findet im Kapitel 5.3.3 statt.

- **Tageszeit und Sichtverhältnisse ^{*(3)}**

Die Parameter „Tageszeit“ und „Sichtverhältnisse“ lassen sich zusammenfassen, da die maßgebliche Auswirkung in einer verringerten Sicht und somit in einer verlängerten Eingreifzeit der Einsatzkräfte besteht. Die Einsatzbereitschaft der Flughafenfeuerwehr muss rund um die Uhr bzw. bei kleineren Flughäfen zumindest in Zeiten mit Flugbetrieb gegeben sein. Hier hat die Tageszeit also keine Auswirkungen.

- **Versagen von Technik**

Das „Versagen von Technik“ wird aus der Betrachtung herausgenommen. Dies mag im ersten Moment überraschen, handelt es sich beim Untersuchungsobjekt doch um ein technisches System, bei dem der Ausfall oder die Fehlfunktion einzelner technischer Komponenten ein Fall ist, der selbstverständlich real eintreten kann. Die für die vorliegende Betrachtung relevanten technischen Komponenten, die im Untersuchungsraum vorkommen, lassen sich in zwei Gruppen einteilen: Flugzeug und Feuerwehrtechnik. Für die Flugzeuge gilt vereinfacht, dass ihre Funktionsfähigkeit nach einem Unfall ohne Bedeutung ist. Aus Sicht der Einsatzkräfte handelt es sich lediglich um eine Metallröhre, in der eine Vielzahl an Personen eingeschlossen ist, sowie mehrere Tanks mit großen Mengen brennbarer Flüssigkeit.

5. Simulation

Von Bedeutung ist dabei, ob sich die Türen öffnen lassen, um eine Evakuierung durchzuführen und den Einsatzkräften einen Angriffsweg verfügbar zu machen. Die Funktionalität der Türen wurde bereits in Kapitel 5.1.2.2 über die dynamischen Elemente beschrieben. Für Geräte und Fahrzeuge der Feuerwehr kann aufgrund der häufigen Überprüfung (bei Feuerwehrfahrzeugen werden die Grundfunktionen in der Regel täglich überprüft und eine umfassende Funktionsprüfung findet einmal pro Woche statt) eine Ausfallwahrscheinlichkeit angenommen werden, die so gering ist, dass sie im Rahmen dieser Untersuchung als irrelevant beurteilt werden kann.

▪ **Flugzeugmuster / Nutzungsart**

Flugzeuge lassen sich aus Sicht der zivilen Verkehrsflughäfen bezüglich ihrer „Nutzungsart“ in die folgenden Klassen einteilen: Passagiermaschine, Frachtmaschine, Kombimaschine (hier ist die Kabine in einen Passagier- und einen Frachtbereich geteilt), Militärmaschine. Die ersten drei Typen sind aus flugtechnischer Sicht gleich. Es handelt sich um identische „Flugzeugmuster“ (unter anderem: gleiche Abmessungen, gleiche Kerosinmenge). Die Einsatztaktik bezüglich der Brandbekämpfung unterscheidet sich hier also nicht. Lediglich die Größe des Passagier- bzw. Frachtbereichs variieren. Der Schutz und die Rettung von Menschenleben stehen bei der Flugzeugbrandbekämpfung an erster Stelle. Folglich ist ein voll besetztes Passagierflugzeug das brisanteste Objekt und somit Grundlage für die Bemessung einer Flughafenfeuerwehr sowie für die Überprüfung ihrer Leistungsfähigkeit. Da auch Passagiermaschinen neben dem Gepäck fast immer Fracht transportieren, ist das Risikopotenzial bezüglich Fracht ebenfalls bei allen drei Typen grundsätzlich vorhanden. Die Reduzierung auf eine Passagiermaschine ist somit statthaft. Militärmaschinen sind, wie in der Definition der Systemgrenzen erläutert, grundsätzlich von der Betrachtung ausgeschlossen.

▪ **Triebwerksart**

Die Frage, ob ein Flugzeug mittels Düsentriebwerk, Propeller oder Turboprop (umgangssprachliche Abkürzung aus Turbine und Propeller, fachlich korrekt „Propellerturbinenluftstrahltriebwerk“) angetrieben wird, ist aus Sicht des Brandschutzes von untergeordneter Bedeutung. Von allen drei „Triebwerksarten“ (Düsentriebwerk, Propeller und Turboprop) geht in unabgeschaltetem Zustand eine Gefahr für die Einsatzkräfte aus. Eine Annäherung ist in jedem Fall verboten. Für die Einsatztaktik der Flughafenlöschfahrzeuge wie für die Rettung der Passagiere ergeben sich keine Unterschiede. Bei einem Brand der Antriebssysteme muss in beiden Fällen die äußere Verkleidung geöffnet werden, um ein wirksames Löschen zu ermöglichen. Hinzu kommt noch, dass nahezu alle mittleren und großen Passagierflugzeuge mit Düsentriebwerken ausgestattet sind und Turbopropmaschinen nur selten vorkommen. Reine Propellermaschinen sind in der kommerziellen Luftfahrt faktisch nicht anzutreffen.

▪ **Anordnung Triebwerke**

Moderne Verkehrsflugzeuge verfügen je nach Flugzeugmuster über zwei, drei oder vier Triebwerke (der Sonderfall mit sechs Triebwerken wird ausgeschlossen, da dieser sehr selten ist und zudem im Passagierverkehr nicht regulär vorkommt).

5. Simulation

Die „Anordnung der Triebwerke“ ist für aus feuerwehrtaktischer Sicht von untergeordneter Bedeutung (Die Ausnahme Hecktriebwerk wird wie ein APU behandelt). Daher dient dieses Merkmal nicht als Parameter für die Definition von Flugzeugunfällen. Kommt es zum Brand eines Triebwerks, ist es unerheblich, welches Triebwerk brennt und wie viele nicht brennende Triebwerke vorhanden sind. Eine Schadenslagen, bei der mehrere Triebwerke gleichzeitig brennen (ohne dass das ganze Flugzeug in Flammen steht), sind in der Praxis derart unwahrscheinlich, dass dieser Fall nicht weiter betrachtet wird (der Ausfall mehrerer Triebwerk als Ursache für Flugzeugunfälle – ohne Brand – ist jedoch „üblich“). Die Verteilung der Triebwerksbrände ist im Weiteren unten dem Stichwort „Feuer und Rauch“ beschrieben

- **Abmessungen (des Flugzeugs)**

Die „Abmessungen“ eines Flugzeugs sind entscheidende Parameter bei einem Flugzeugunfall. An dieser Stelle müssen jedoch keine Überlegungen zu den möglichen Abmessungen angestellt werden. Alle ICAO-relevanten Einrichtungen an einem Flughafen werden auf Basis eines für den Flughafen fest definierten Bemessungsflugzeugs dimensioniert. Dies gilt auch für den Flugzeugbrandschutz. Somit ergeben sich die Abmessungen automatisch, wenn die Computersimulation für einen konkreten Flughafen oder für ein (frei) gewähltes Bemessungsflugzeug angewendet wird. Der modulare Aufbau der Flugzeuge in der Simulation und die sich daraus ergebenden möglichen Abmessungen wurden bereits weiter oben erläutert.

- **Sitzanzahl / Belegungsgrad / Passagieranzahl**

Im Rahmen der Simulation steht es dem Anwender frei, die „Passagieranzahl“ zu wählen. Hier wiederholt sich die Fragestellung, ob ein Maximalwert (der beim jeweiligen Flugzeugmuster durch die aktuelle Bestuhlung erreicht werden kann), ein Durchschnittswert, ein Quantil oder eine Verteilungsfunktion verwendet werden soll, in ähnlicher Weise wie zuvor bei der Wahl des für die Simulation zugrunde liegenden Flugzeugmusters. Es ist unstrittig, dass ein Unfallszenario mit einem Drei-Klassen-Flugzeug und geringem „Belegungsgrad“ und daraus resultierend hohem Einsatzerfolg (gemessen an den geretteten Flugzeuginsassen) zwar ein sehr positives Bild von der vermeintlichen Leistungsfähigkeit der Rettungsorganisationen abgeben wird, dies zur Vorbereitung auf den realen Einsatz jedoch als völlig ungeeignet gewertet werden darf. Genauso wenig spiegelt ein Maximalszenario, also größtes Flugzeug mit maximaler „Sitzanzahl“ und 100% „Belegungsgrad“, das tatsächliche Risiko wieder. Da die „Passagieranzahl“ letztlich für jeden Standort frei gewählt werden kann, obliegt es dem jeweiligen Anwender, in welcher Weise er sein Risiko abschätzen will. Für die Simulation bedarf es daher keiner vorgegebenen automatischen Gesetzmäßigkeit.

Anmerkung: Weitere Aspekte, die direkt mit den Passagieren in Zusammenhang stehen, sind in der Tabelle 26 unter der Kategorie „Betroffene Personen“ genannt und werden im Folgenden analog der Reihenfolge in Tabelle 26 erörtert.

5. Simulation

▪ **Beladung**

Die „Beladung“ spielt bei Flugzeugunfällen in der Regel nur eine untergeordnete Rolle. Zwar ist der Transport von Gefahrgut nicht generell ausgeschlossen, doch jene Arten von Gefahrgut, die im Ereignisfall für die Feuerwehr von besonderer Bedeutung wären (z. B. Klasse 1 – explosionsgefährliche Stoffe) sind grundsätzlich verboten. Dennoch verfügt jede Art der Beladung in der Regel über eine relativ hohe Brandlast. Dies erklärt sich aus dem hohen Kunststoffanteil in Passagiergepäck und Fracht. Zudem wird Fracht oft auf Holzpaletten transportiert und ist zum Schutz vor Feuchtigkeit und Schmutz in Kunststoffolie eingewickelt oder eingeschweißt. Somit unterscheidet sich die „Beladung“ verschiedener Maschinen aus Feuerwehrsicht faktisch nicht. Auch der Transport von Tieren hat keinen Einfluss auf die Einsatztaktik der Feuerwehr. Bei Abwägung der Schutzgüter ergibt sich, dass die Rettung von Menschenleben immer die höchste Priorität hat. Letztlich nützen auch den Tieren alle Maßnahmen, die zum Schutz der Passagiere vor Feuer, Wärme und Rauch durchgeführt werden. Die Entladung des Frachtbereiches wird sich, wenn noch möglich, immer an die Brandbekämpfungsmaßnahmen und das Absuchen der Kabine anschließen.

▪ **Notlandung ⁽¹⁾**

Das Kriterium „angekündigte Notlandung“ oder „unvorhergesehener Unfall“ hat direkten Einfluss auf die Eingreifzeit der Einsatzkräfte und damit auf den Einsatzerfolg. Häufigkeit und Auswirkungen werden in Tabelle 31 dargestellt und anschließend erläutert.

▪ **Unfallzeitpunkt**

Unter dem „Unfallzeitpunkt“ wird nicht die Uhrzeit, sondern die Flugphase verstanden (Abbildung 5), in der sich der Unfall ereignet. Für die rechnerische Betrachtung ist jedoch weder eine Differenzierung nach der Uhrzeit noch nach der Flugphase erforderlich. Einige Aspekte, die sich aus der Flugphase ergeben, sind bereits durch andere Parameter berücksichtigt, andere wiederum sind nicht relevant:

- Einige Flugphasen fallen grundsätzlich aus der Betrachtung heraus, da sich das Flugzeug zu diesem Zeitpunkt in der Regel außerhalb der Reichweite einer Flughafenfeuerwehr befindet. Für die relevanten Phasen wird der Aspekt „Eingreifzeit der Einsatzkräfte“ durch den Parameter „(1) Entfernung“ abgebildet.
- Brandschutztechnisch ist es nahezu unerheblich, in welcher Flugphase sich der Unfall ereignet. Auch bei landenden Maschinen ist üblicherweise noch so viel Treibstoff an Bord, dass es zu einem verheerenden Vollbrand kommen kann, insbesondere dann, wenn die Maschine zertrümmert oder der Treibstoff mit hoher Geschwindigkeit verwirbelt wird. Bezogen auf die vorliegende Brandlast ist es also unerheblich, ob es sich um die Flugphase „Start“ oder „Landung“ handelt.

5. Simulation

Der Sonderfall einer Notlandung ohne Treibstoff an einem Flughafen wie die Bruchlandung eines Airbus A310 der Hapag-Lloyd in Wien am 12. Juli 2000 [Flight Safety Foundation 2009] ist zwar nicht auszuschließen, aber so unwahrscheinlich, dass dieser Fall nicht weiter betrachtet wird.

Die Auswirkungen des Parameters „Unfallzeitpunkt“ sind somit hinreichend berücksichtigt und bedürfen keiner eigenen Modellierung.

- **Kollision ⁽¹⁾**

Das Thema „Kollision“ wird nicht als separater Parameter weitergeführt. Er wird mit den Parametern „Notlandung“ und „Untergrund“ zusammengefasst. Häufigkeit und Auswirkungen werden in Tabelle 31 dargestellt und anschließend erläutert.

- **Dynamik (Geschwindigkeit und Verzögerung)**

Die „Geschwindigkeit“ und die hieraus resultierende maximale „Verzögerung“ (= negative Beschleunigung) haben einen erheblichen Einfluss auf das Schadensausmaß, da die Kraft, die bei einem Unfall auf Flugzeug und Passagiere einwirkt, proportional zur Verzögerung ist. Bei Unfällen, die mit hohen Geschwindigkeiten oder bei „harter“ Landung (aus großer Höhe) entstehen, sind i. d. R. schwere Schäden zu erwarten. Dies trifft für Starts und Landungen bzw. für Steig- und Sinkflug zu. Im Rollverkehr und auf Position fallen die Geschwindigkeiten und somit auch die Schäden geringer aus. Aus Sicht der Einsatzkräfte interessiert jedoch nur das Schadensbild und nicht der physikalische Unfallhergang. Für die Modellierung in der Simulation sind daher weniger Ursache und Entstehung von Bedeutung sondern vielmehr das resultierende Schadensszenario. Die Unfallgeschwindigkeit beeinflusst vor allem die Verteilung der Verletzungsmuster und den Zustand des Flugzeugs. Beide Aspekte werden per Zufallsverteilung ermittelt und sind in Tabelle 31 unter „(4) Zustand LFZ und Evakuierung“ und „(7) Unfallschwere + Verletzungsverteilung“ zu finden. Insbesondere „(7) Unfallschwere + Verletzungsverteilung“ ist ein Parameter, der die Wirkung der Unfallgeschwindigkeit (und -verzögerung) sehr gut widerspiegelt. Somit sind die beiden Größen „Geschwindigkeit“ und „Verzögerung“ ausreichend in der weiteren Betrachtung enthalten.

- **Standort und Zustand LFZ ⁽¹⁾**

Alle Aspekte zum „Standort“ des Unfalls („Lage zum Airport“, „Abstand zur Feuerwehr“, „Standort des LFZ nach dem Unfall“, „Untergrund“) und zum „Zustand des Luftfahrzeugs“ („Zustand Fahrwerk“ und „Zustand Rumpf“) werden in der Computersimulation als Parameter für die Definition der Ausgangslage verwendet. Die Häufigkeitsverteilungen und die Auswirkungen der Standort- und Flugzeugparameter werden in Tabelle 31 dargestellt und daran anschließend beschrieben.

- **Treibstoffart**

In der Luftfahrt sind drei „Treibstoffarten“ üblich, die jeweils unterschiedliche Einsatzbereiche haben bzw. für unterschiedliche Flugzeugtypen verwendet werden.

5. Simulation

Dies sind Hydrazin, Kerosin und Flugbenzin. Hydrazin kommt ausschließlich im militärischen Bereich zum Einsatz. Da militärische Flugzeuge aber aus der Betrachtung ausgeschlossen sind, wird Hydrazin nicht weiter behandelt. Flugbenzin (AvGas) und Kerosin (Jet A-1) sind die in der zivilen Luftfahrt gebräuchlichen Treibstoffe. Flugbenzin wird bei Kleinflugzeugen, die mit Kolbenmotoren angetrieben werden, verwendet, Kerosin bei Turbinentriebwerken. Bei den gängigen Verkehrsflugzeugen kommt ausschließlich Kerosin zum Einsatz. Als Beispiel:

Am Flughafen Frankfurt wurden im Jahr 2005 5.590 Mio. Liter Jet A1 (Kerosin) getankt. Der Verbrauch von Flugbenzin lag im gleichen Jahr dahingegen lediglich bei 0,021 Mio. Liter AvGas (Flugbenzin).

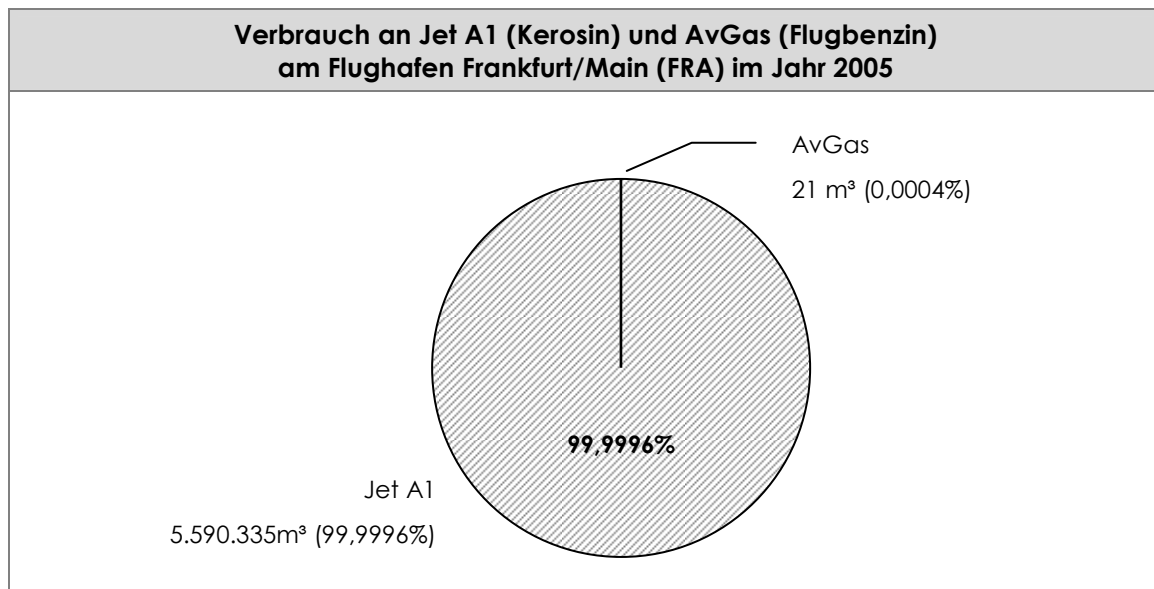


Abbildung 53: Verbrauch an Jet A1 (Kerosin) und AvGas (Flugbenzin) am Flughafen Frankfurt/Main (FRA) im Jahr 2005

Quelle: FJS – Frankfurt Jet Service GbR, 2005, telefonische Auskunft

In der kommerziellen Luftfahrt ist Flugbenzin faktisch bedeutungslos. Dennoch sei an dieser Stelle angemerkt, dass der wesentliche Unterschied zwischen den Treibstoffarten aus brandschutztechnischer Sicht im unterschiedlichen Flammpunkt liegt. Für Flugbenzin AvGas liegt er bei -40°C und für Kerosin Jet A bei 38°C [FTC o. J., S. 62]. Kommt es bei Flugzeugunfällen zu Treibstoffbränden, so verläuft die Brandentstehung in der Regel wie folgt. Durch mechanische Belastung kommt es zu einem Treibstoffaustritt (Abriss eines Triebwerks, Beschädigung von Tragflächen oder Center-Tank) und infolge der hohen Geschwindigkeit zu einer Verwirbelung und Vernebelung des Treibstoffs. Eine Entzündung findet an heißen Bauteilen (z. B. Triebwerk, Bremsen) oder durch Funkenflug statt. Hier spielt es dann keine Rolle mehr, um welche „Treibstoffart“ es sich handelt. Das Szenario, dass sich eine große Lache aus Treibstoff unter dem Flugzeug bildet ohne sich dabei zu entzünden (hier wäre der Flammpunkt von Bedeutung), ist eher unwahrscheinlich.

5. Simulation

Es sei an dieser Stelle noch der Hinweis gegeben, dass die Ausdehnung eines Flächenbrandes durch das Auslaufen und Ausbreiten von Treibstoff im Kapitel 5.2.4.1 ausführlich erläutert wird. Eine differenzierte Betrachtung der im zivilen Luftverkehr vorkommenden Treibstoffe erfolgt daher nicht. Für Flughäfen mit Klein- und Kleinflugzeugen ist hier ggf. eine Differenzierung bzw. eine Berücksichtigung von Flugbenzin sinnvoll. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit erscheint dies jedoch nicht notwendig.

▪ **Treibstoffmenge und Befüllungsgrad**

Die „Treibstoffmenge“ für Flugzeuge muss stets so gewählt werden, dass das Flugzeug seinen Zielflughafen auch bei ungünstigen Wetterverhältnissen (z. B. Wind, Regen) erreichen kann. Darüber hinaus muss es dem Piloten möglich sein, eine halbe Stunde Warteschleife zu fliegen, einmal durchzustarten und einen Ausweichflughafen anzufliegen. Die Menge an Reservetreibstoff ist so zu wählen, dass alle drei Manöver (im Extremfall) hintereinander ausgeführt werden können. Die Schlussfolgerung aus diesen Anforderungen ist, dass jedes landende Flugzeug über eine beträchtliche Menge Treibstoff (jeweils bezogen auf seine Größe) verfügt. Als Anhaltswert: Eine Boeing 747-400 verfügt über ein Tankvolumen von ca. 217.000 Litern [Boeing o. J.]. Selbst „Restmengen“ sind daher beträchtlich. Flugzeuge, die aufgrund akuter Schwierigkeiten eine Notlandung einleiten, haben üblicherweise noch mehr Treibstoff an Bord. Selbst bei Flugzeugen, denen noch genug Zeit bleibt, vor der Landung Treibstoff abzulassen, ist noch mit nicht zu vernachlässigenden Mengen zu rechnen. Gerade hier muss noch eine Reserve für mehrfaches Anfliegen und ggf. Durchstarten vorhanden sein. Wie alte Aufzeichnungen von Übungen am Löschbecken am Flughafen Frankfurt/Main und neuere Versuche am Löschbecken am Flughafen Stuttgart [Flughafenfeuerwehr Stuttgart 2002b] zeigen, können bereits mit relativ geringen Mengen Kerosin Feuer von beachtlicher Größe erzeugt werden. Es wird daher davon ausgegangen, dass bei jedem Flug - bezogen auf die mögliche „Treibstoffmenge“ und den verbleibenden „Befüllungsgrad“ - ein Vollbrand möglich ist.

▪ **Leckage**

Die Freisetzung von Treibstoff über kleiner „Leckagen“ wird nicht betrachtet. Sie sind von untergeordneter Bedeutung, da bei Flugzeugunfällen Brände in der Regel direkt bei der Landung bzw. dem Aufsetzen entstehen. Der Bruch von Tragflächen oder die Beschädigung des Tanks im Rumpf und das Freisetzen großer Mengen an Treibstoff (oftmals durch Verwirbelung überdies als „perfektes“ Zündgemisch) sind hier die Voraussetzung für größere Brände. Die Entzündung findet zumeist sofort an heißen Bauteilen oder durch bereits bestehende Brände statt. Ein allmähliches Auslaufen von Treibstoff und ein relativ spätes Entzünden sind eher unwahrscheinlich. Das Freisetzen von Treibstoff durch das Durchbrennen der Tankwandung (mit anschließender Brandausbreitung) als Folge eines Fahrwerk- oder Triebwerkbrandes wird im Abschnitt „dynamische Elemente“ beschrieben.

5. Simulation

- **Brand ⁽⁵⁾**

Das Verhalten eines „Brandes“ also die dynamische Entwicklung von Feuer und Rauch wurde bereits im Kapitel 5.2.4 dargestellt. Feuer und Rauch als Ausgangssituation eines Flugzeugunfalls werden in Tabelle 31 als Häufigkeitsverteilung dargestellt und daran anschließend erläutert.

- **Unfallsschwere ⁽⁷⁾**

Die Verteilung der „Unfallsschwere“ und deren Auswirkungen werden in Tabelle 31 und folgend beschrieben.

- **Kommunikation und Crew**

Es bestehen drei grundsätzliche Kommunikationsbeziehungen, bei denen einsatzrelevante „Kommunikation“ durch die „Crew“ stattfindet:

- Zuerst besteht eine Kommunikationsbeziehung innerhalb der Crew zwischen Cockpit und Kabine. Diese kann als problemlos und somit als jederzeit funktionsfähig angenommen werden. Beide Seiten sind das Fliegen gewohnt, sind für Notfallsituationen ausgebildet und kennen die entsprechenden Verfahren. Zudem arbeiten beide in der Regel bei der gleichen Luftverkehrsgesellschaft und sprechen zumeist die gleiche Muttersprache.
- Die zweite Kommunikationsbeziehung besteht zwischen Crew und Passagieren. Die Crew spricht fast immer Englisch und zumeist noch die Sprache des Herkunfts- oder Ziellandes. In Notfallsituationen beschränkt sich die Aufgabe der Crew vor allem darauf, entweder die Passagiere ruhig und auf ihren Sitzen zu halten, also Panik und unbedachte Evakuierungsversuche zu vermeiden, oder gezielt eine Evakuierung durchzuführen. Dann müssen die Passagiere dazu veranlasst werden, möglichst schnell und zugleich geordnet das Flugzeug zu verlassen. Selbst wenn einige Passagiere die Crew aufgrund sprachlicher Barrieren nicht verbal verstehen, dürften in Notfallsituationen bereits Gestik, Mimik, Tonfall und Sprechgeschwindigkeit ausreichen, um den Passagieren grob zu vermitteln, was von ihnen erwartet wird. Zudem sieht jeder, wie die anderen Passagiere handeln.
- Die dritte Kommunikationsbeziehung besteht zwischen den Einsatzkräften und dem Piloten. Für die Feuerwehr ist es wichtig zu erfahren, wie die Lage im Flugzeug ist, um beispielsweise eine Evakuierung zu Gunsten einer geordneten Räumung zu vermeiden. Letztlich wird sich das Vorgehen der Feuerwehr aber auch durch Kommunikation mit dem Piloten kaum ändern. Nach wie vor besteht die Hauptaufgabe darin, den Brandschutz sicherzustellen, das Flugzeug zu betreten, eine Evakuierung oder geordnete Räumung durchzuführen, das Flugzeug nach Gefahren (z. B. Brandstellen oder überhitzten Stellen) und Verletzten abzusuchen sowie die entsprechend notwendigen Maßnahmen (Löschen und Retten) zu ergreifen. Eine Ausnahme besteht: Stellt der Pilot die Triebwerke nicht ab oder rollt noch weiter bis zu der durch die Verkehrsleitung zugewiesenen Position, verwehrt er damit den Einsatzkräften einen schnellen Zugang zum Flugzeug.

5. Simulation

Im Falle eines Innenbrandes oder des Auftretens von Rauch in der Kabine besteht dann eine erhebliche Gefahr für die Passagiere (siehe die Unfälle der Air Canada und der Saudia in Tabelle 23). Da aus der Literatur nur dieses Ereignis bekannt ist, in dem den Einsatzkräften der Zugang zum Flugzeug verwehrt blieb, darf es als tragischer Einzelfall bezeichnet werden. Eine Wiederholung ist damit zwar nicht ausgeschlossen, die Eintrittswahrscheinlichkeit ist jedoch so gering, dass der Fall als nicht signifikant eingestuft wird und keinen Eingang in die Modellierung erhält.

Alle drei dargestellten Kommunikationsbeziehungen sind für die Simulation des Einsatzablaufs insofern unerheblich, als dass sie aller Erwartung nach die gleiche Zielsetzung verfolgen und die Durchführung der Standardmaßnahmen einleiten und ermöglichen. Signifikanten Einflüssen lassen sich rechnerisch kaum beziffern. Es ist somit zulässig, die Parameter „Kommunikation“ und „Crew“ bei der Computersimulation rechnerisch unberücksichtigt zu lassen.

▪ **Passagierverhalten (Panik und Desorientierung)**

Neben dem normalen „Passagierverhalten“ können zwei Varianten im Verhalten auftreten, die als einsatzrelevant bewertet werden: Panik und Desorientierung.

- Im Kapitel 5.2.1.1, Abschnitt c) ist ausgeführt, wie das Ausbrechen von Panik mit Hilfe einer Zufallsvariable beschrieben wird, die die Faktoren Feuer, Wärme und Rauch berücksichtigt. Somit ist „Ausbrechen einer Panik“ in der Simulation eine mögliche Reaktion des dynamischen Elements „Passagier“ auf die aktuelle Unfallsituation und kein Parameter zur Beschreibung des Unfallszenarios.
- Ähnliches gilt für die Desorientierung. Die Modellierung erfolgt im Kapitel 5.2.1.1, Abschnitt d). Hier wird noch zwischen ziel-/orientierungsloser Fortbewegung und Bewegungslosigkeit („Schockstarre“) unterschieden. Diese beiden Ausprägungen sind – im Gegensatz zur Panik - individuelle Zustände, die für jeden Passagier einzeln ermittelt und im Passagiervektor (Kapitel 5.2.1.6) gespeichert werden.

▪ **Evakuierung *(4)**

Die Durchführung einer „Evakuierung“ wird nicht als eigener Unfallparameter weitergeführt. Stattdessen erfolgt die Aktion „Evakuierung“ als (mögliche) Konsequenz auf die jeweilige Situation nach dem Unfalleintritt. Die Entscheidungsfindung, ob eine „Evakuierung“ stattfindet, wird im Kapitel 5.2.1.1 im Anschluss an Tabelle 11 erläutert. Zudem wird „Evakuierung“ im Folgenden als Modifikation der Simulation in Abhängigkeit von dem Merkmal „(4) Zustand LFZ und Evakuierung“ (Tabelle 31) betrachtet.

5. Simulation

5.3.2 Anzahl der Unfall- und Berechnungsvarianten

Gemäß der gewählten Methodik mit einer äußeren Schleife für die Anzahl der Einsatzkräfte und einer inneren Schleife für die Parameter (Abbildung 28) vervielfacht sich der Rechenaufwand mit jedem Parameter und jeder Parameterausprägung. Um die Funktionsfähigkeit der Gesamtsimulation zu gewährleisten, muss der Rechenaufwand bzw. die Anzahl der notwendigen Rechendurchläufe betrachtet und ggf. optimiert werden.

- **Einfluss der Anzahl von Parametern und Parameterausprägungen**

In Tabelle 27 ist die Anzahl der Kombinationen dargestellt, die sich in Abhängigkeit von der Anzahl an Parametern und der jeweiligen Anzahl an möglichen Parameterausprägungen ergeben. Der Vergleich einer Rechnung mit neun Parametern mit jeweils vier Ausprägungen, mit einem Rechenansatz, der zehn Parameter mit jeweils fünf Ausprägungen enthält, zeigt, wie groß die Unterschiede der Kombinationsanzahlen bereits sind, wenn die gewählten Werte nur geringfügig verändert werden. Im ersten Fall ergeben sich $262.144 (= 4^9)$ Kombinationen im zweiten bereits $9.765.625 (= 5^{10})$. Die beiden Fälle unterscheiden sich um den Faktor 37. Zwar wird die Anzahl der Parameterausprägungen für die einzelnen Parameter sehr unterschiedlich ausfallen, aber an dem grundsätzlich sehr großen Einfluss der Anzahl an Parameterausprägungen auf die gesamte Anzahl der Kombinationen ändert sich dadurch nichts. Um letztere und damit die (theoretisch) benötigte Rechenzeit in einem überschaubaren Rahmen zu halten, ist es zweckdienlich, die Anzahl der Parameterausprägungen zu reduzieren. Wie anhand der Tabelle 27 zu sehen ist, führt es zu einer deutlich größeren Erhöhung der möglichen Kombination, wenn die Anzahl der Parameterausprägungen erhöht wird anstatt die Anzahl der Parameter selbst. Im Umkehrschluss bedeutet dies, dass durchaus eine hohe Anzahl von Parametern verwendet werden kann, um ein Unfallszenario möglichst differenziert zu beschreiben, wenn gleichzeitig darauf geachtet wird, dass die Anzahl der möglichen Ausprägungen eines Parameters möglichst gering bleibt. Für die Ausprägung der Parameter kann das Skalenniveau und erst recht die jeweilige Skalierung nahezu beliebige gewählt werden. Im Rahmen der Simulation muss daher darauf geachtet werden, nur solche Ausprägungen und Skalierungen zu verwenden, die klar definieren und erfasst werden können und deren Auswirkungen sich rechnerisch darstellen lassen.

Am folgenden Beispiel soll dies kurz verdeutlicht werden. Für den Umwelteinfluss „Wind“ können zwei Parameter verwendet werden, Windstärke und Windrichtung. Die Windstärke kann in die in der Meteorologie üblichen 14 Stufen von Windstärke 0 (windstill) bis Windstärke 13 (Orkan) eingeteilt werden. Bei der Windrichtung würde mindestens eine Einteilung in die vier Himmelsrichtungen und die vier Zwischenrichtungen erfolgen, d.h. acht Ausprägungen für die Windrichtung. Es bestehen somit $112 (= 14 \times 8)$ Möglichkeiten, mit denen sich der Wind beschreiben lässt. Bei der Windstärke sind die unteren Windgeschwindigkeiten im Vergleich zur Austrittsgeschwindigkeit des Löschwassers irrelevant. Sie haben auch keine sonderliche Auswirkung auf den Brand.

5. Simulation

Die mittleren und höheren Windgeschwindigkeiten hingegen haben einen großen Einfluss auf die Wurfweite des Löschwassers und können das Feuer in Richtung des Flugzeugs treiben oder auch davon weg. Bei sehr hohen Windgeschwindigkeiten findet kein Flugbetrieb mehr statt, so dass hier auch nicht mit dem Auftreten von Unfällen zu rechnen ist. Liegen nur geringe Windstärken vor, ist es ebenso unerheblich, aus welcher Richtung der Wind auftritt, da er in diesem Fall keinen nennenswerten Einfluss auf die Löschmaßnahmen hat. Der Umwelteinfluss Wind kann somit als ein Parameter mit den Ausprägungen „nützlich“, „erschwerend“ und „neutral“ beschrieben werden. Die geographische Windrichtung als solches ist bei Löschmaßnahmen ohne Bedeutung. Von Interesse ist hier nur, ob der Wind in Löschrichtung, entgegengesetzt oder quer auftritt. Werden die beiden Windrichtungen „entgegengesetzt“ und „quer“ zusammengefasst, da sie im Endeffekt beide eine negative Wirkung auf die Löschergebnisse haben, ergeben sich nur zwei mögliche Ausprägungen für den Parameter Windrichtung. Auf diese Weise ergibt die Kombination aus Windrichtung und Windstärke unter dem Gesichtspunkt des Brandschutzes und der Löschwirkung nur sechs Möglichkeiten im Vergleich zu den 112 Möglichkeiten bei einer meteorologischen Betrachtung.

Kombinationen in Abhängigkeit von der Anzahl an Parametern und deren Ausprägungen						
		Anzahl der Parameterausprägungen				
		2	3	4	5	6
Anzahl der Parameter	4	16	81	256	625	1.296
	5	32	243	1.024	3.125	7.776
	6	64	729	4.096	15.625	46.656
	7	128	2.187	16.384	78.125	279.936
	8	256	6.561	65.536	390.625	1.679.616
	9	512	19.683	262.144	1.953.125	10.077.696
	10	1.024	59.049	1.048.576	9.765.625	60.466.176
	11	2.048	177.147	4.194.304	48.828.125	362.797.056
	12	4.096	531.441	16.777.216	244.140.625	2.176.782.336
	13	8.192	1.594.323	67.108.864	1.220.703.125	13.060.694.016
	14	16.384	4.782.969	268.435.456	6.103.515.625	78.364.164.096
	15	32.768	14.348.907	1.073.741.824	30.517.578.125	470.184.984.576
	16	65.536	43.046.721	4.294.967.296	152.587.890.625	2.821.109.907.456
	17	131.072	129.140.163	17.179.869.184	762.939.453.125	16.926.659.444.736
	18	262.144	387.420.489	68.719.476.736	3.814.697.265.625	101.559.956.668.416
	19	524.288	1.162.261.467	274.877.906.944	19.073.486.328.125	609.359.740.010.496
20	1.048.576	3.486.784.401	1.099.511.627.776	95.367.431.640.625	3.656.158.440.062.980	

Tabelle 27: Kombinationen in Abhängigkeit von der Anzahl an Parametern und deren Ausprägungen

5. Simulation

▪ Eintrittswahrscheinlichkeit von Parameterausprägungen bei der Monte Carlo-Methode

Das Bestreben, die Anzahl der möglichen Kombinationen zu reduzieren, mag vor dem Hintergrund, dass nicht alle Kombinationen berechnet werden sollen, sondern der methodische Ansatz der Monte Carlo-Methode, bei der Ergebnisse mit realitätsnahen Häufigkeiten generiert werden, gewählt wurde, zunächst verwundern. Dies lässt sich wie folgt erklären:

Da jede Parameterausprägung hinreichend oft berücksichtigt werden soll, muss eine ausreichend große Anzahl an Durchläufen erfolgen. Gerade Parameterausprägungen mit kleinen Wahrscheinlichkeiten machen dies erforderlich. Diese treten vor allem bei einer starken Differenzierung der einzelnen Parameterwerte auf. Gleichzeitig ist darauf zu achten, dass die Parameterwerte in möglichst vielen verschiedenen Kombinationen in die Berechnung einfließen. Dies spricht gleichermaßen für eine überschaubare Anzahl an Parametern und Parameterausprägungen. Für eine Parameterausprägung mit einer Eintrittswahrscheinlichkeit von (nur) 1% soll beispielhaft ermittelt werden, wie oft die Parameterausprägung zum Tragen kommt. Dies erfolgt mittels den Formeln (46) und (47) für binomialverteilte Variablen. Die Binomialverteilung wird verwendet, da bei der folgenden Berechnung nur zwischen „Eintreten“ und „nicht Eintreten“ einer Parameterausprägung unterschieden wird.

$$P(X = k) = \binom{n}{k} \cdot p^k \cdot (1-p)^{n-k} \quad (46)$$

mit:

- P - Wahrscheinlichkeit („dass k-mal X eintritt“) []
- X - Zufallsvariable (im vorliegenden Fall die Parameterausprägung, die jeweils betrachtet wird) []
- n - Häufigkeit des Experiments []
- k - Gewählte Häufigkeit []
- p - Eintrittswahrscheinlichkeit von X []

Hieraus lässt sich bekanntlich folgern:

$$P(a \leq X \leq b) = \sum_{k=a}^b \binom{n}{k} \cdot p^k \cdot (1-p)^{n-k} \quad (47)$$

mit:

- a - Untere Intervallgrenze für das Eintreten von X []
- b - Obere Intervallgrenze für das Eintreten von X []

Für große n ergeben sich hierbei jedoch schnell Werte, die nicht mehr mit den gängigen Taschenrechnern oder Computern berechnet werden können.

5. Simulation

Für große Zahlen – gemessen an der Standardabweichung mit ($\sigma > 3$) – ist es zulässig, die Berechnung näherungsweise über die Normalverteilung vorzunehmen und die Ergebnisse direkt aus einer stochastischen Verteilungstabelle für die Standardnormalverteilung abzulesen. Die Voraussetzung hierfür ist erfüllt, da die Standardabweichung bei einer Eintrittswahrscheinlichkeit von 1% und einem Stichprobenumfang von 1.000 den Wert 3,15 einnimmt. Es wird daher näherungsweise folgende Formel verwendet:

$$P(a \leq X \leq b) = \Phi(z_b) - \Phi(z_a) \quad (48)$$

mit:

- a - Untere Intervallgrenze für das Eintreten von X []
- b - Obere Intervallgrenze für das Eintreten von X []
- Φ - Wahrscheinlichkeit (dass X zwischen a-mal und b-mal eintritt) []
- z - Standardisierte Zufallsvariable []

Mit Hilfe der z-Transformation

$$z = \frac{x - \mu}{\sigma} \quad (49)$$

mit:

- μ - Erwartungswert von X []
- σ - Standardabweichung von X []

lässt sich Gleichung (48) zu

$$P(a \leq X \leq b) = \Phi\left(\frac{b - \mu}{\sigma}\right) - \Phi\left(\frac{a - \mu}{\sigma}\right) \quad (50)$$

umformen. Dadurch ist es möglich, die Ergebnisse direkt in der Verteilungstabelle „Standardnormalverteilung“ abzulesen, anstatt sie aufwendig zu berechnen. Somit ergibt sich folgendes Bild:

Bereits bei 1.000 Durchläufen beträgt die Wahrscheinlichkeit dafür, dass eine Parameterausprägung mit einer angenommenen Häufigkeit von 1% in einem Intervall von $\pm 20\%$ um den Erwartungswert liegt, 47,46%. Diese Wahrscheinlichkeit steigt mit der Anzahl der Durchläufe und beträgt bei 10.000 Durchläufen bereits mehr als 95% (Tabelle 28).

5. Simulation

Eintrittswahrscheinlichkeit und Vertrauensintervall von Parameterausprägungen in Abhängigkeit von der Anzahl an Durchläufen			
Anzahl Durchläufe	Erwartungswert bei 1% Wahrscheinlichkeit	Intervall (Erwartungswert $\pm 20\%$)	Wahrscheinlichkeit für Anzahl im Intervall
100 *1	1	1 (0 bis 2) *2	37,0% (92,1%)*2
300 *1	3	3 (2 bis 4) *2	22,5% (61,8%) *2
1.000	10	8 bis 12	47,5%
3.000	30	24 bis 36	72,9%
10.000	100	80 bis 120	95,4%

Tabelle 28: Eintrittswahrscheinlichkeit und Vertrauensintervall von Parameterausprägungen in Abhängigkeit von der Anzahl an Durchläufen

*1 Hier muss die Wahrscheinlichkeit herkömmlich ermittelt werden, da $\sigma > 3$ nicht erfüllt ist.

*2 Das Intervall wurde hier größer als Erwartungswert $\pm 20\%$ gewählt, damit die obere/untere Grenze des Intervalls mindestens um eins größer/kleiner ist als der Erwartungswert.

Tabelle 29 zeigt, in welchem Umfang die Wahrscheinlichkeit dafür, dass eine Parameterausprägung in einem definierten Intervall um den Erwartungswert liegt, mit der Vergrößerung der Intervallgrenzen steigt. Bei einem Intervall um den Erwartungswert mit einer dreifachen Standardabweichung wird hier eine Wahrscheinlichkeit von 99,74% erreicht. Ein Blick auf die absoluten Werte der Intervalle zeigt, dass selbst bei kleinen Häufigkeiten (gemäß Tabelle 31 liegt die kleinste Häufigkeit bei 1%) solche Parameterausprägungen hinreichend oft berücksichtigt werden. Eine Anzahl von 10.000 Durchläufen darf daher als ausreichend angesehen werden.

Eintrittswahrscheinlichkeit von Parameterausprägungen im Vertrauensintervall bei 10.000 Durchläufen			
Häufigkeit	Vertrauensintervall		Wahrscheinlichkeit für Anzahl im Intervall
1%	$\mu \pm \sigma$	90 bis 110	68,26%
1%	$\mu \pm 2\sigma$	80 bis 120	95,44%
1%	$\mu \pm 3\sigma$	70 bis 130	99,74%
5%	$\mu \pm \sigma$	478 bis 522	68,26%
5%	$\mu \pm 2\sigma$	456 bis 544	95,44%
5%	$\mu \pm 3\sigma$	435 bis 565	99,74%

Tabelle 29: Eintrittswahrscheinlichkeit von Parameterausprägungen im Vertrauensintervall bei 10.000 Durchläufen

5. Simulation

Um zu untersuchen, wie wahrscheinlich das gleichzeitige Auftreten mehrerer ungünstiger Rahmenbedingungen ist, wird exemplarisch betrachtet, welche Häufigkeitsverteilung für Unfälle vorliegt, bei denen zwei Parameter eine ungünstige Ausprägung aufweisen. Berücksichtigt werden dabei nur Ausprägungen mit einer Wahrscheinlichkeit von 3% oder geringer. Im Vorgriff auf die gewählten Parameter sowie deren möglichen Ausprägungen und Eintrittswahrscheinlichkeiten in der Simulation gemäß Tabelle 31 besteht die Ausgangslage, dass vier Parameter eine sehr ungünstige Ausprägung annehmen können:

<u>Parametergruppe</u>	<u>Ungünstige Ausprägung</u>		
(1) Entfernung + Kollision	On Airport, Gebäudekollision	1%	} $\Sigma = 4\%$
	On Airport, LFZ-Kollision	1%	
	Off Airport, Gebäudekollision	2%	
(2) Tageszeit + Sicht	Nebel	1%	1%
(3) Wetter + Fahrbahn	Regen, stark	3%	} $\Sigma = 5\%$
	Schnee	1%	
	Eis	1%	
(4) Zustand LFZ	Turnover	1%	} $\Sigma = 3\%$
	Zertrümmert	2%	

Wahrscheinlichkeit für ungünstige Ausprägungen bei mindestens zwei Parametern bei 10.000 Durchläufen			
Anzahl k an Durchläufen mit min. zwei ungünstigen Ausprägungen	Wahrscheinlichkeit $P(x \geq k)$	Anzahl k an Durchläufen mit min. zwei ungünstigen Ausprägungen	Wahrscheinlichkeit $P(x \geq k)$
5	100,000%	50	53,841%
10	100,000%	55	27,574%
15	100,000%	60	10,257%
20	100,000%	65	2,742%
25	99,997%	70	0,529%
30	99,913%	75	0,074%
35	98,995%	80	0,008%
40	93,977%	85	0,001%
45	53,841%	90	0,000%

Tabelle 30: Wahrscheinlichkeit für ungünstige Ausprägungen bei mindestens zwei Parametern bei 10.000 Durchläufen

5. Simulation

Die Wahrscheinlichkeit für ein Auftreten von mindestens zwei ungünstigen Parameterausprägungen beträgt $P(x>1) = 0,005135$ als Gegenwahrscheinlichkeit zu den Ereignissen $P(x=0)$ und $P(x=1)$. Unter Verwendung der Formel (50) ergibt sich die nachfolgenden (Wert-) Tabelle 30. Mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit wird bei 10.000 Durchläufen eine zweistellige Anzahl an Szenarien mit mindestens zwei ungünstigen Parameterausprägungen erzeugt. Der Anforderung nach Berücksichtigung von Extremereignissen ist damit in ausreichendem Maße Rechnung getragen.

▪ Anzahl an Durchläufen in der Simulation

Der Rechenaufwand, der sich konkret für die Simulation ergibt, soll an dieser Stelle berechnet werden. Wird die Tabelle 26 zu Grunde gelegt und zur vereinfachten Abschätzung angenommen, dass alle Parameter voneinander unabhängig sind, so ergibt sich mit der Formel

$$a_{\text{Kombi}} = \prod_{k=0}^{\infty} k^i = k^0 \cdot k^1 \cdot k^2 \cdot \dots \cdot k^i \quad (51)$$

mit:

- a_{Kombi} - Gesamtanzahl an Kombinationen
- Π - Produkt
- k - Anzahl an Parameterausprägungen
- i - Anzahl an Parametern mit k Ausprägungen

folgende, kaum fassbare Anzahl an Kombinationen:

$$a_{\text{Kombi, Tabelle 26}} = 2^9 \cdot 3^{10} \cdot 4^8 \cdot 5^2 \cdot 6^3 \cdot 8^1 = 85.594.564.303.257.600 = 8,6 \cdot 10^{16}$$

Wird hingegen die deutlich reduzierte und „verdichtete“ Tabelle 31 zu Grunde gelegt, so ergibt sich eine wesentlich geringere Anzahl von an Kombinationen.

$$a_{\text{Kombi, Tabelle 31}} = 3^3 \cdot 5^1 \cdot 6^1 \cdot 9^1 \cdot 10^1 = 72.900$$

Das Verhältnis der beiden Ergebnisse zueinander beträgt $5 : 10^{11}$ (!). Aber selbst die Anzahl von 72.900 Kombinationen liegt noch fast eine Zehnerpotenz über der zuvor betrachteten Anzahl von 10.000 Durchläufen. Da für Letztere nachgewiesen wurde, dass sie auch Parameterausprägungen mit kleinen Eintrittswahrscheinlichkeiten hinreichend berücksichtigt, wird zur Variation der Parameter die Monte Carlo-Methode mit einer Zahl von 10.000 Durchläufen gewählt.

5. Simulation

5.3.3 Gewählte Merkmale für die Simulation

Eine Differenzierung der möglichen Schadenslagen ist nur insoweit erforderlich und sinnvoll, als auch Auswirkungen auf die Einsatzabläufe festgestellt werden können. Diese Forderung zieht zwei Konsequenzen nach sich:

- Eine Einsatzlage muss sich signifikant von anderen möglichen Schadenslagen unterscheiden. Es wäre z. B. unnötig, ein Unterscheidungsmerkmal einzuführen, das spezifiziert, ob ein Flugzeug an einem Wochentag oder einem Wochenende verunglückt, wenn es keine Unterschiede in den Schichtplänen der Einsatzkräfte gibt und sich auch keine anderen grundsätzlichen Unterschiede benennen lassen.
- Die Unterschiede zwischen verschiedenen Parameterausprägungen müssen sich in ihren Auswirkungen zahlenmäßig beziffern lassen. Unterschiede, die sich nicht zahlenmäßig fassen lassen, sind für einen rechnerischen Ansatz, wie er im vorliegenden Fall gewählt wurde, nicht greifbar und somit letztlich ohne Relevanz. Beispiel:

Eine mögliche Unterscheidung wäre, ob ein Flugzeugunfall plötzlich und unvorhergesehen eintritt oder ob der Pilot aufgrund massiver technischer Probleme eine Notlandung einleitet. In letzterem Fall wäre als Folge der anhaltenden Notlage sicherlich zu beobachten, dass die Passagiere nervös und verängstigt sind. Zu prüfen wäre nun, ob dieser Zustand Auswirkungen auf die Verhaltensweisen der Passagiere hat. Lässt sich hier keine signifikante Änderung bei den Handlungsmustern im Vergleich zu Passagieren feststellen, die von einem Unfall völlig überrascht werden, wäre der Aspekt „Passagiere erwarten Notlandung/Unfall“ zwar vorhanden aber letztlich irrelevant und würde bei der Modellierung entfallen. Treten hingegen signifikante Unterschiede auf, lassen sich diese mathematisch beschreiben und somit in einer Simulation darstellen, unabhängig davon, ob der betrachtete Unterschied a) eine Größe um einen festen Betrag verändert oder b) die Eintrittswahrscheinlichkeit einer Auswirkung verändert. Um im Beispiel zu bleiben: Eine denkbare Folge könnte sein, dass Passagiere, die sich mit dem Gedanken einer „Bruchlandung“ vertraut machen, das Flugzeug sofort und zielstrebig verlassen. Die Passagierdurchflussrate an den Türen erhöht sich – Fall a), eine Größe wird um einen festen Wert verändert. Ebenso wäre es denkbar, dass Passagiere, die sich bereits über einen längeren Zeitraum in einem Angstzustand befinden, schneller und ggf. auch unbegründet in Panik verfallen. Die Eintrittswahrscheinlichkeit für das Ausbrechen von Panik würde sich dann erhöhen – Fall b).

Im Folgenden wird erläutert, wie die in Tabelle 31 aufgeführten Werte abgeschätzt wurden. Hierfür wird jeweils untersucht, inwieweit die aufgeführten Parameter Einfluss auf die Abläufe nach einem Flugzeugunfall haben. Besonders interessiert dabei, in welcher Relation diese Einfluss auf die Eingreifzeit sowie auf das Verhalten bzw. den Gesundheitszustand der Passagiere, auf die Rettungsmaßnahmen oder auf die Brand- und Rauchausbreitung haben.

5. Simulation

Es mag auf den ersten Blick verwundern, dass hierbei für die Parameterausprägungen i. d. R. zunächst keine präzise bezifferten Aussagen getroffen werden. Diese Vorgehensweise erfolgt in Anlehnung an die Systematik der Ausfalleffektanalyse bzw. der HAZOP. Da nicht die Parameterausprägungen per se von Bedeutung sind, sondern vielmehr ihre Auswirkungen auf die Einsatz- und Ereignisabläufe interessieren, bietet diese Vorgehensweise zwei Vorteile. Zum einen wird die Variationsbreite der Parameter stark reduziert. Zum anderen entfallen aufwendige Überführungsregeln, mit deren Hilfe aus physikalischen Parameterwerten zahlenmäßig greifbare Wirkungen berechnet werden können. An einem Beispiel soll dies verdeutlicht werden:

Bezogen auf den Aspekt „Sichtverhältnisse“ ist es unerheblich, zu welcher genauen Uhrzeit sich ein Flugzeugunfall ereignet. Entscheidend ist lediglich, ob er tags oder nachts, also bei Tageslicht oder im Dunkeln, eintritt und wie viele Flugbewegungen in den beiden Tageshälften stattfinden. Daraus ergibt sich dann eine Wahrscheinlichkeit für „günstige“ Sichtverhältnisse und eine für „ungünstige“. Die „exakte“ Berechnung, bei der erst sowohl das Datum als auch die Uhrzeit des Unfalls per Zufallsvariable ermittelt werden und dann für den betreffenden Tag ein Vergleich mit der Tageslichtzeit erfolgt, um eine Aussage über die aktuellen Sichtverhältnisse zu erhalten, erweist sich als deutlich aufwendiger, ohne einen Mehrwert zu enthalten.

5. Simulation

Unfallparameter und ihre Eintrittswahrscheinlichkeiten und Auswirkungen													
Nr.	Parameter	Parameter- ausprägungen	Modifikation in der Simulation										
			Häufigkeit	Eintreffzeit der Einsatzkräfte	Schwere der Verletzungen	Effektivität Angriffsstrups	Löschwirkung FLF	Ausbreitung Feuer, außen	Kabinenrauch	Passagiere gehurtfähig	Passagiere in Zwangslage *3	Durchbrand der LFZ-Hülle	Eigenständige Evakuierung
			%	Min.	+ %	+ %	+ %	+ %	+ %	+ %	%	%	%
(1)	Notlandung + Entfernung + Kollision	On Airport - Notlandung	33	1,0	-25,3	-	-	-	-	-	-	-	
		On Airport - kurz	3	1,5	-15	-	-	-	-	-	-	-	
		On Airport - normal	20	2,0	-15	-	-	-	-	-	-	-	
		On Airport - lang	8	3,0	-15	-	-	-	-	-	-	-	
		On Airport - Gebäudekollision	1	3,5	+25	-10	-10	-	-	-	-	-	
		On Airport - Flugzeugkollision	1	2,5	+25	-	-10	-	-	-	-	-	
		Off Airport - Wiese+Beton	22	5,5	+25	-	-	-	-	-	-	-	
		Off Airport - Wald	10	10,0	+50	-25	-50	-	-	-	-	-	
		Off Airport - Gebäudekollision	2	5,5	+100	-10	-10	-	-	-	-		
(2)	Tageszeit + Sicht	Gut (Tag/normal)	79	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
		Schlecht (Nacht)	20	+0,5	-	-5	-	-	-	-	-	-	
		Schlecht (Nebel - CAT II/III)	1	+1,5	-	-10	-	-	-	-	-	-	
(3)	Wetter + Fahrbahn	Normal	85	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
		Regen - leicht+mittel	10	+0,5	-	-	-	-	-	-	-	-	
		Regen - stark	3	+1,0	-	-	+35	-25	-	-	-	-	
		Schnee	1	+2,0	-	-5	-	-30	-	-	-	-	
		Vereisung	1	+4,0	+10	-10	-	+30	-	-	-	-	
(4)	Zustand LFZ + Evakuierung	Normal (ohne Evakuierung)	79	-	-5,38	-	-	-	-	-	-	+50	
		Schräg	9	-	+10	-	-	+5	-	-	+5	+10	+65
		Platt	5	-	+25	-	-	+5	-	-	+5	+15	+65
		Turnover	1	-	+50	-	-	+10	-	-	+50	+30	+50
		Zerteilt (3+)	4	-	+20	-	-	+10	-50	+10	+10	+50	+80
		Zertrümmert	2	-	+40	-	-30	+30	-100	+20	+20	+75	+100
(5)	Feuer + Rauch	Kein Brand	40	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
		Außen - Fläche	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
		Außen - Flügel/Teilfläche	5	-	-	-	-	-	-	-	-	+50	
		Außen - Triebwerk	10	-	-	-	-	-	-	-	-	+50	
		Außen - Fahrwerk	10	-	-	-	-	-	-	-	-	+50	
		Innen - Kabine	5	-	-	-	-	-	-	-	-	+100	
		Innen - Kabine + Rauch *1	5	-	-	-	-	-	-	-	-	+100	
		Innen - Fracht	5	-	-	-	-	-	-	-	-	+75	
		Innen - Fracht + Rauch *1	5	-	-	-	-	-	-	-	-	+95	
		Rauch (= Schwelbrand)	10	-	-	-	-	-	-	-	-	+95	
(6)	Wind	Normal	70	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
		Nützlich	20	-	-	-	+25	-	-50	-	-	-	
		Hinderlich	10	-	-	-	-25	-	+50	-	-	-	
(7)	Unfallschwere + Verletzungs- verteilung	Leichter	25	-	-50	-	-	-	-	-	-	-	
		Normal	50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
		Schwerer	25	-	+50	-	-	-	-	-	-	-	

Tabelle 31: Unfallparameter und ihre Eintrittswahrscheinlichkeiten und Auswirkungen

5. Simulation

- *1 Der Begriff „Rauch“ bedeutet in diesem Zusammenhang, dass der Brand aus einem Schwelbrand entstanden ist und bereits über einen längeren Zeitraum toxische Brandgase freigesetzt wurden.
- *2 Die Modifikation des Anteils der gehunfähigen Passagiere bezieht sich nur auf un-/leicht verletzte sowie schwer verletzte Passagiere (Kapitel 5.2.1.5).

(1) Notlandung + Entfernung + Kollision

Der Einsatz bei einer angekündigten Notlandung unterscheidet sich nur sehr geringfügig von einem unangekündigten Einsatz. Der wesentliche Unterschied liegt in der verkürzten Eingreifzeit, der mentalen Vorbereitung und der besseren (bzw. frühzeitigeren und ausführlicheren) Information über die wesentlichen Merkmale des aktuellen Fluges wie Flugzeugtyp, Schadensart, Insassen und Ladung. Alle Abläufe eines Einsatzes werden jedoch normalerweise genauso durchgeführt wie bei einem unangekündigten Einsatz. Das Feuer wird in gleicher Weise bekämpft, die Insassen in gleicher Weise gerettet. Bei einer angekündigten Notlandung begeben sich die Einsatzkräfte (das Vorhandensein praxistauglicher Notfallverfahren vorausgesetzt) mit ihren Fahrzeugen in vordefinierte Bereitstellungsräume im Start- und Landebahnsystem oder in dessen Nähe. Dies tritt in 33% der Fälle ein und verkürzt die Eingreifzeit auf 1:00 Minute (2 Zeiteinheiten). Es kann angenommen werden, dass ungefähr jeder zweite Unfall, der sich ereignet, als Notlandung angekündigt wurde. Dies geschieht, wenn der Pilot während des Landevorgangs Unregelmäßigkeiten angezeigt bekommt oder aufgrund technischer Schwierigkeiten vorzeitig landet. Wurde keine Notlandung angekündigt, so hängt die Eingreifzeit von der Entfernung der Schadensstelle zur Feuerwehr ab. Gleichermaßen selten ereignet sich eine Landung in relativer Nähe zur Feuerwehr (dann 1:30 Minute/3 Zeiteinheiten mit 3%) oder am äußersten Ende des Start- und Landebahnsystems (dann 3:00 Minuten/6 Zeiteinheiten mit 8%). Die höhere Eintrittswahrscheinlichkeit bei Letzterem erklärt sich damit, dass viele Unfälle erst durch ein zu frühes Aufsetzen (so genanntes „Undershot“) oder einem Hinausschießen über die Bahn (so genanntes „Overshot“) entstehen. In etwa 22% (On Airport, kurz: 2% + On Airport, normal 20%) der Fälle befindet sich das Flugzeug an einer Stelle im Bahnsystem, die innerhalb von 2:00 Minuten (4 Zeiteinheiten) erreicht werden kann. Kommt es zu einem Zusammenstoß mit einem Gebäude auf dem Flughafengelände (1%), wird eine Eingreifzeit von 3:30 Minuten (7 Zeiteinheiten) angesetzt, da in diesen Fällen die Zufahrt nicht so zügig und direkt wie im Start- und Landebahnsystem erfolgen kann.

Ebenfalls möglich ist, dass es zu einer Kollision mit anderen Fahrzeugen (Kfz) kommt. Solche Kollisionen werden aus der Betrachtung ausgeschlossen, da hier die physikalische Masse des Fahrzeugs wie auch die Anzahl der Fahrzeuginsassen im Vergleich zum Flugzeug rein mathematisch eine vernachlässigbare Größe darstellen. Relevant ist jedoch die Kollision mit einem anderen Flugzeug. Bei einer Kollision von zwei Flugzeugen besteht nur dann eine Überlebenschance für die Flugzeuginsassen, wenn sich der Unfall in direkter Bodennähe ereignet. Somit fallen Kollisionen off Airport grundsätzlich aus der Betrachtung heraus, weil in solchen Fällen nicht mit Überlebenden zu rechnen ist.

5. Simulation

Streng genommen müsste für Kollisionen, die sich am Flughafen ereignen, eine weitere Differenzierung der Lage erfolgen, um die Eingreifzeit zu ermitteln. Da das Ereignis „Kollision - on Airport“ aber nur eine sehr geringe Eintrittswahrscheinlichkeit hat, wird vereinfacht angenommen, dass die Eingreifzeit im Fall Flugzeug-Flugzeug durchschnittlich bei 2:30 Minuten (5 Zeiteinheiten) liegt und im Fall Flugzeug-Gebäude bei 3:30 Minuten (7 Zeiteinheiten). Die erhöhte Eingreifzeit bei einer Flugzeug-Gebäude-Kollision spiegelt den Umstand wider, dass es aufgrund des Unfallszenarios länger dauert, den Einsatzort zu erreichen und eine geeignete Fahrzeugposition für einen effektiven Löschangriff einzunehmen.

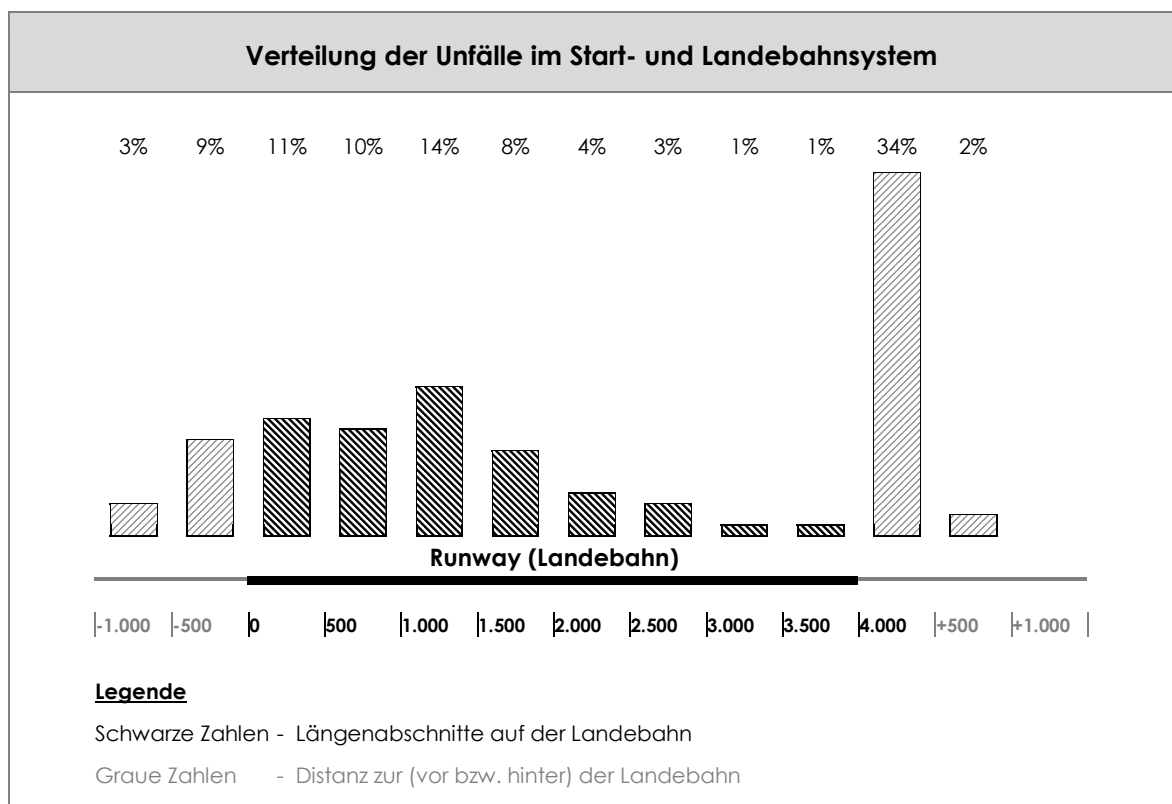


Abbildung 54: Verteilung der Unfälle im Start- und Landebahnsystem

Quelle: ICAO 1990, S. 36

Bei einem Unfall außerhalb des Flughafengeländes ist es nahezu unerheblich, ob es sich um eine angekündigte Notlandung handelt oder um einen unvorhersehbaren Unfall. Die Eingreifzeit wird hier maßgeblich von der Erreichbarkeit und den geografischen Gegebenheiten des Schadensortes bestimmt. Eine Bereitstellung im Start- und Landebahnsystem führt zudem nicht unbedingt zu einer besseren Zugänglichkeit der außerhalb gelegenen Schadensstelle. Bei Unfällen außerhalb des Flughafens („off Airport“) wird für eine Landung auf freien Flächen mit Beton oder Wiese (22%) und für Gebäudekollisionen (2%) jeweils eine Eingreifzeit von 5:30 Minuten (11 Zeiteinheiten) angenommen. Eine direkte Nähe zum Flughafen ist hier vorausgesetzt. Stürzt ein Flugzeug in einen flughafennahen Wald (10%), beträgt die Eingreifzeit 10:00 Minuten (20 Zeiteinheiten).

5. Simulation

Die Schwere der Verletzungsverteilung wird maßgeblich vom Schadensort bestimmt. Grundsätzlich gilt die Verletzungsverteilung nach Abbildung 37. Einige Schadenslagen bedingen jedoch einen höheren Anteil an Verletzten mit schwereren Verletzungen. Folglich müssen andere Unfälle wiederum leichter verlaufen. Am schwersten verlaufen in der Regel Unfälle außerhalb des Flughafens.

Veränderung der Verletzungsverteilung bei angekündigter Notlandung			
Entfernung und Kollision	Eintrittswahrscheinlichkeit	Veränderung Verletzungsverteilung	Gewichtete Veränderung Verletzungsverteilung
On Airport - kurz	3/100	-15%	-0,45%
On Airport - normal	20/100	-15%	-3,00%
On Airport - lang	8/100	-15%	-1,20%
On Airport - Gebäudekollision	1/100	+25%	0,25%
On Airport - Flugzeugkollision	1/100	+25%	0,25%
Off Airport - Wiese+Beton	22/100	+25%	5,50%
Off Airport - Wald	10/100	+50%	5,00%
Off Airport - Gebäudekollision	2/100	+100%	2,00%
Zwischensumme			8,35%
„normaler“ Unfall	33/100	-25,3%	-8,35%
Summe	100/100		0,00%

Tabelle 32: Veränderung der Verletzungsverteilung bei angekündigter Notlandung

Bei der Kollision mit Gebäuden erhöht sich die Schwere der Verletzungen um 100%, bei Abstürzen in den Wald um 50% und bei sonstigen Unfällen außerhalb um 25%. Kommt es am Flughafen zu Kollisionen mit Gebäuden, so wird eine Erhöhung von 25% angesetzt. Bei Gebäudekollisionen handelt es sich zumeist nicht um einen frontalen Zusammenstoß mit einem massiven. In diesem Falle wären die Überlebenschancen der Passagiere relativ gering. Wesentlich wahrscheinlicher ist es jedoch, dass ein Flugzeug ein Gebäude mit der Tragfläche streift oder mit einem kleineren Gebäude auf dem Vorfeld kollidiert. Deshalb fällt diese Unfallart nicht ganz so schwer aus wie eine Gebäudekollision außerhalb des Flughafens, bei der ein Frontalaufprall wahrscheinlicher und folgenreicher ist. Bei allen unvorhergesehenen Unfällen auf dem Flughafen (Kollision ausgenommen) wird die Verletztenverteilung um 15% verringert. Tritt während einer Flugphase ein technisches Problem auf, so dass eine angekündigt Notlandung vorgenommen wird, und erreicht das Flugzeug noch den Flughafen, so ist die Funktions- und Flugfähigkeit des Flugzeugs in der Regel noch so groß, dass auch eine „Bruchlandung“ weniger schwer verläuft als ein unerwarteter plötzlicher Unfall.

5. Simulation

Bei angekündigten Notlandungen kann daher von einer Reduzierung der Unfallschwere um 25,3% ausgegangen werden. Diese Zahl ergibt sich rechnerisch aus den zuvor gewählten Werten, da die Summe der mit der Eintrittswahrscheinlichkeit gewichteten Verletzungsveränderungen gleich null sein muss, um der durchschnittlichen Verteilung nach Abbildung 37 zu entsprechen. Hierzu ist folgende Hilfsrechnung erforderlich: Bei einer Eintrittswahrscheinlichkeit von 33% für eine angekündigte Notlandung mit normaler Verletzungsverteilung ergibt sich diese wie folgt:

$$-8,35\% \cdot \frac{33}{100} = -8,35\% \cdot \frac{100}{33} = -25,3\%$$

Der Zeitbedarf für Rettungsmaßnahmen erhöht sich bei Schadenslagen, die schwer zugänglich oder unübersichtlich sind oder einen großen Zerstörungsgrad aufweisen. Gebäudekollisionen am Flughafen oder außerhalb führen jeweils zu einer Steigerung des Zeitbedarf um +10%, Abstürze in den Wald zu einem Mehrbedarf von +25%. Bei diesen Schadenslagen verringert sich darüber hinaus auch die effektive Löschwirksamkeit der Flughafenlöschfahrzeuge aus den vorgenannten Gründen. Gebäudekollisionen am Flughafen oder außerhalb führen jeweils zu einer Minderung von 10%, Absturz in den Wald von 50%.

(2) Tageszeit und Sicht

Einschränkungen durch Nebel oder tiefliegende Wolken kommen je nach Standort mit sehr unterschiedlicher Wahrscheinlichkeit vor. Man denke nur an den Vergleich von zwei internationalen Verkehrsflughäfen wie London (mit dem berühmten Londoner Nebel) und Dallas, das fast in der Wüste liegt. Die Eintrittswahrscheinlichkeit für Sichteinschränkungen durch Nebel (so genannte CAT II/III-Wetterlagen) müssen folglich für jeden Standort einzeln gewählt werden. Für die vorliegende Simulation wird eine Häufigkeit von 2% gewählt. Dies entspricht einer Lage in Mitteleuropa. Bei CAT II/III-Wetterlagen handelt es sich nicht um bodennahen Tiefnebel. Dieser ist für den Luftverkehr aufgrund seiner sehr geringen Höhe in der Regel ohne größere Bedeutung. Die relevanten Wetterlagen sind nahezu unabhängig von der Tageszeit. Eine Ausnahme stellt der „Frühnebel“ dar (nicht zu verwechseln mit einer geschlossenen Wolkendecke, die im Lauf des Tages aufklärt und jederzeit eine ausreichende Sicht im Landeanflug ermöglicht). Der „Frühnebel“ tritt verglichen mit den „herbstlichen Nebeltagen“ nur selten und zudem zeitlich sehr begrenzt auf. Wetterlage und Sichteinschränkung aufgrund der Tageszeit sind also näherungsweise stochastisch unabhängig und können daher behelfsweise im Modell miteinander kombiniert werden. Für letztere ist eine Betrachtung des Flugplans notwendig. Die Anzahl der Flugbewegungen, die im Tageslicht stattfinden, hängt von der geografischen Lage bzw. dem Breitengrad ab. Im Jahresdurchschnitt steht die Sonne an jedem Ort der Erde 12 Stunden lang am Himmel (Bewölkung nicht berücksichtigt). Hinzu kommen Dämmerungszeiten, die mit wachsender Entfernung zum Äquator zunehmen. Die Verteilung ist jedoch sehr unterschiedlich.

5. Simulation

Während am Äquator jeden Tag von 6:00 bis 18:00 Uhr die Sonne scheint, wechselt die Tagesdauer jenseits der Wendekreise im Verlauf eines Jahres zwischen null und 24 Stunden. Die (bürgerliche) Dämmerung beträgt in Deutschland im Mittel eine gute halbe Stunde (exemplarisch: Am geografischen Standort Bayern durchschnittlich 36:00 Minuten, weiter nördlich einige Minuten mehr [Westram 2013]), so dass sich die tägliche Zeitspanne, in der sichtbares Licht zur Verfügung steht, um reichlich eine Stunde erhöht. Für einen mitteleuropäischen Flughafen kann daher exemplarisch eine durchschnittliche Tageslichtzeit von 5:30 bis 18:30 Uhr, also 13 Stunden lang, angenommen werden. Unter der rein rechnerischen Annahme eines ganzjährigen Mittel zwischen Sommer- und Winterzeit, also ganzjährig +0:30 Stunden, wird für die Simulation Tageslicht für die Zeit zwischen 6:00 bis 19:00 Uhr determiniert.

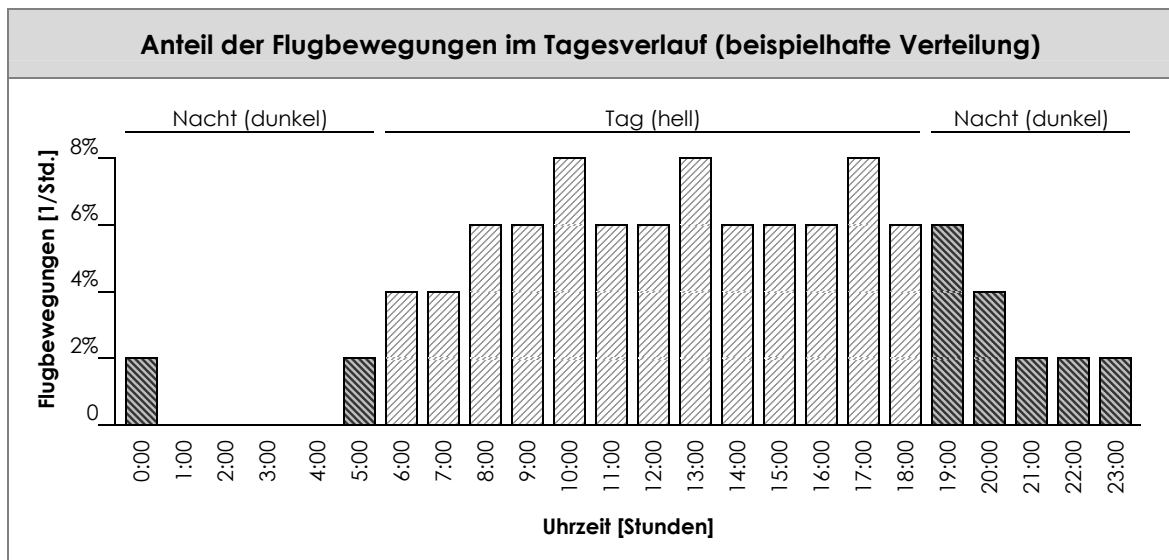


Abbildung 55: Anteil der Flugbewegungen im Tagesverlauf (beispielhafte Verteilung)

Im beispielhaft gegebenen Flugplan entfallen 80% der Flugbewegungen auf Tageslichtzeiten und 20% auf Nachtzeiten. In der Kombination aus „Tageszeit und Sicht“ ergibt sich somit gute Sicht mit einer Wahrscheinlichkeit von 79%, Dunkelheit mit 20% und schlechte Sicht mit 1%. Bei Dunkelheit erhöht sich die Eingreifzeit um 0:30 Minute (1 Zeiteinheit) und die Rettungsmaßnahmen werden um 5% erschwert. Bei schlechter Sicht (Nebel) steigt die Eingreifzeit um 1:30 Minute (3 Zeiteinheit), die Rettungsmaßnahmen laufen 10% weniger effektiv ab.

(3) Wetter und Fahrbahnzustand

Das Wetter und damit verbunden der Fahrbahnzustand haben maßgeblichen Einfluss auf die Eingreifzeit. Die hier aufgeführten Werte beziehen sich auf die Klimazone der gemäßigten Breiten, wie sie in Mitteleuropa (z. B. London, Frankfurt, Paris) aber auch in New York oder Peking vorherrscht. Für Standorte, die sich hiervon deutlich unterscheiden, müssen die Werte entsprechend angepasst werden.

5. Simulation

Flughäfen wie z. B. Atlanta oder Dubai, die in warmen und trockenen Gegenden liegen, müssen weder mit Auswirkungen durch Niederschlag noch durch Frost rechnen. Flughäfen in den tropischen Breiten (z. B. Bangkok, Kuala Lumpur) sind zwar vor Frost sicher, sind aber starken Beeinträchtigungen durch heftige Niederschläge in der Monsunzeit ausgesetzt. Nicht zu vergessen sind auch Flughäfen mit langen kalten Winterperioden (z. B. Moskau). Die folgenden Witterungslagen werden exemplarisch für die gemäßigten Breiten angenommen, um in der Simulation mit realitätsnahen Werten rechnen zu können. In 85% der Fälle herrscht eine Wetterlage, die keine Auswirkungen auf die Eingreifzeit oder sonstige Vorgänge hat. Leichter bis mittlerer Regen tritt mit einer Wahrscheinlichkeit von 10% auf und erhöht die Eingreifzeit um 0:30 Minute (1 Zeiteinheit). Starker Regen (3%) verlängert sie um 1:00 Minute (2 Zeiteinheiten). Schnee (1%) führt zu einer Erhöhung der Eingreifzeit um 2:00 Minuten (4 Zeiteinheiten), Eis (1%) sogar um 4:00 Minuten (8 Zeiteinheiten). Bei Starkregen steigt die Löschwirkung der Flughafenlöschfahrzeuge um 25% und die Brandausweitung bei Flächenbränden sinkt um 25%. Schnee und Eis führen zu einer Effektivitätsminderung der Rettungsmaßnahmen um 5% bzw. 10%. Dies erklärt sich durch das langsamere Vorankommen beim Transport von Verletzten durch die Verlangsamung der Abläufe sowie die größere körperliche Belastung der Einsatzkräfte.

Zudem führt ein vereister Untergrund zu einer Erhöhung der Verletzungsschwere um 5% (z. B. geringere Bremswirkung des Flugzeugs beim Landen und daher größere Auftreffgeschwindigkeit bzw. größere Verzögerung und somit stärkere Belastung der Passagiere; Ausrutschen der Einsatzkräfte beim Verletztentransport; mehr Verletzungen bei der Nutzung der Rutschen durch Ausrutschen und damit verbunden nicht rechtzeitiges Entfernen von der Rutsche und dadurch wiederum Verletzungen durch nachrutschende Passagiere). Die Flächenbrandausbreitung wird durch Schnee um 30% verringert (das Kerosin sickert in den Schnee), während sich ausgelaufenes Kerosin auf vereisten Flächen schneller ausbreiten kann, so dass in diesem Fall mit einer Erhöhung der Brandausbreitung um 30% gerechnet wird.

(4) Zustand LFZ und Evakuierung

Infolge des Unfallereignisses kann sich der Zustand des Flugzeugs stark verändern. Solche starken mechanischen Einwirkungen gehen in der Regel mit einer Veränderung der Verletzungsverteilung einher. Es wird davon ausgegangen, dass ein Flugzeug zu 79% relativ unversehrt und in normaler Lage (bezüglich seines Zustandes) zum Stehen kommt. Die Schwere der Verletzungen nimmt dann um 5,38% ab (Herleitung: Tabelle 33). Dieser Wert ergibt sich rein rechnerisch aus den hier gewählten Werten, die nachfolgend aufgeführt sind. Da eine mittlere Verletztenverteilung zugrunde gelegt wird (Abbildung 37), muss die Schwere der Verletzungen in manchen Fällen geringer ausfallen, wenn auch Schadenslagen mit erhöhten Verletzungsmustern vorliegen. In 9% der Fälle knickt das Bugrad ein (oder reißt ab), in 5% alle Fahrwerke. Mit einer Wahrscheinlichkeit von 1% landet das Flugzeug auf der Oberseite („auf dem Rücken“), ein so genannter „Turnover“. In 4% der Fälle bricht das Flugzeug bzw. der Rumpf in zwei oder mehrere große Teile auseinander. Zu einer vollständigen Zerstörung der Flugzeugstruktur (Zertrümmerung) kommt es in 2% aller Unfälle.

5. Simulation

Aus der Gesamtheit aller Flugzeugunfälle ergibt sich im Durchschnitt die bereits bekannte Verletzungsverteilung. Wenn modellhaft angenommen wird, dass bei einigen Flugzeugunfällen, die starke Auswirkungen auf den Zustand des Flugzeuges bzw. den Rumpf haben, die Verletzungsverteilung deutlich schwerer ausfällt, so muss es wiederum auch Flugzeugunfälle geben, bei denen diese leichter ausfällt. Die Auswirkungen des Zustandes des Flugzeugs auf die Verletzungsverteilung der Passagiere müssen also in der Summe neutral sein. Aus den Veränderungen der Verletzungsverteilung ergibt sich - jeweils gewichtet mit den Eintrittswahrscheinlichkeiten für schwere Unfälle - ein Wert, der sich auch als Produkt der Eintrittswahrscheinlichkeit für leichtere Unfälle und der gesuchten Abschwächung der Verletzungsverteilung darstellen lassen muss.

Veränderung der Verletzungsverteilung bei „normalem“ Zustand des Flugzeugs			
Zustand LFZ	Eintrittswahrscheinlichkeit	Veränderung Verletzungsverteilung	Gewichtete Veränderung Verletzungsverteilung
Schräg	9/100	+10%	0,9%
Platt	5/100	+25%	1,25%
Turnover	1/100	+50%	0,5%
Zerteilt (3+)	4/100	+20%	0,8%
Zertrümmert	2/100	+40%	0,8%
Zwischensumme			4,25%
„normaler“ Unfall	79/100	-5,38%	-4,25%
Summe	100/100		0,00%

Tabelle 33: Veränderung der Verletzungsverteilung bei „normalem“ Zustand des Flugzeugs

Bei einer Eintrittswahrscheinlichkeit von 79% für einen „normalen“ Flugzeugunfall mit günstigerer Verletzungsverteilung ergibt sich diese wie folgt:

$$-4,25\% \cdot \frac{79}{100} = -4,25\% \cdot \frac{100}{79} = -5,38\%$$

Die Werte für die Eintrittswahrscheinlichkeiten und die Veränderungen der Verletzungsverteilung sind Schätzungen für mittlere und große Verkehrsflugzeuge. Sie beruhen auf der Beobachtung der Flugzeugunfälle der letzten 10 bis 20 Jahre. Sie sind statistisch nicht exakt ermittelt und stellen nur eine ungefähre Größenverteilung zueinander dar, um eine Differenzierung der Schadenslagen in der Simulation zu realisieren.

5. Simulation

Bei allen Unfällen, die zu einer deutlichen physischen Veränderung des Flugzeug führen (d.h. alle außer den zuerst beschriebenen 79%), wird die Crew immer eine Evakuierung einleiten, da in diesen Fällen mit einer Verschlechterung der Lage oder einem Auftreten von Bränden gerechnet werden muss. Ist das Flugzeug näherungsweise noch in einem normalen Zustand und einer normalen Lage, wird die Crew in der Hälfte der Fälle eine Evakuierung einleiten. Dies ist eine Schätzung auf Basis der bisherigen Erfahrungen. Nur bei akuter Gefahr (z. B. Rauch oder Feuer in der Kabine) werden die Crew oder die Passagiere mit höherer Wahrscheinlichkeit eine Evakuierung vor Eintreffen der Feuerwehr durchführen. Die Wahrscheinlichkeiten hierfür sind bei den dynamischen Elementen im Abschnitt über die Türen beschrieben.

Bei einer vollständigen Zerstörung des Flugzeugs ist mit einer Verschlechterung der Löschwirkung der Flughafenlöschfahrzeuge um 20% zu rechnen, da sich die Flugzeugteile in solchen Fällen in der Regel über eine große Fläche verteilen und zugleich die filmbildende Wirkung des Schaummittels nicht zur Wirkung kommen kann.

Bei Zerteilung und Zertrümmerung des Flugzeugs erhöht sich der Anteil der Passagiere, die sich aufgrund ihrer Verletzungen nicht mehr selbst fortbewegen können. Dies erklärt sich durch die starke mechanische Einwirkung, die bei diesen Schadenslagen stattgefunden hat. Rechnerisch wird diese Auswirkung einerseits indirekt durch die höheren Verletzungszahlen und direkt durch eine Erhöhung des jeweiligen Anteils an nicht mehr gehfähigen Passagieren (Zerteilung: +10% / Zertrümmerung: +20%) berücksichtigt. Daneben erhöht sich auch die Anzahl der Passagiere, die unabhängig von ihren Verletzungen eingeklemmt oder anderweitig am Fortbewegen gehindert sind. Generell beträgt ihr Anteil 5%. Für Unfälle mit Zerteilung des Flugzeugs beträgt er 10%, bei Zertrümmerung 20%. Im Falle eines Turnovers erhöht sich der Anteil auf 50%. Dies erscheint zunächst sehr viel. Der Unfall einer MD-11 der China Airlines in Hongkong am 22. August 1999 [FSF o. J.b] veranschaulicht jedoch, dass mit einer solchen Größenordnung gerechnet werden muss. Bei diesem Unfall gab es kaum ernsthafte Verletzungen (was als großer Glücksfall angesehen werden muss), aber alle Passagiere hingen kopfüber in den Sitzen und mussten größtenteils einzeln von den Einsatzkräften befreit werden.

(5) Feuer + Rauch

Feuer und Rauch werden im Rahmen dieser Arbeit als dynamische Elemente beschrieben, da sie sich fortlaufend in jeder Zeiteinheit in Abhängigkeit von der aktuellen Lage entwickeln. Ihr Ausgangszustand zum Zeitpunkt der Landung bzw. des Unfalleintritts wird jedoch als statisches Element definiert und hier aufgeführt, da die Ausprägung dieses Parameters zur Bestimmung der Anfangssituation dient. Die verschiedenen Brandfälle sind von entscheidender Bedeutung bei der Untersuchung von Flugzeugunfällen, da sie eine der größten Gefährdungen für die Flugzeuginsassen darstellen. Aus diesem Grund erfolgt hier eine relativ differenzierte Betrachtung. Zunächst lassen sich die Fälle „kein Brand“, „Außenbrand“, „Innenbrand“ und „Schwelbrand“ unterscheiden.

5. Simulation

Sie haben neben der Festlegung des Brandfalls in der Ausgangssituation keinen Einfluss auf andere Abläufe. Der einfachste Fall ist, dass kein Brand vorliegt (40%). Außenbrände können in verschiedenen Formen vorliegen. Als Vollbrand, bei dem das gesamte Flugzeug im Feuer steht (5%), als Teilflächenbrand – in der Regel unter einem Flügel mit Leckage – (5%) oder als Triebwerksbrand (10%) sowie als Fahrwerksbrand (10%). Bei Triebwerksbränden erfolgt des Weiteren eine Unterscheidung zwischen den Triebwerken. Von Bedeutung ist hier vor allem, ob es sich um ein Hecktriebwerk (in 10% der Triebwerksbrände) handelt. Diese sind auf Grund ihrer Lage deutlich schwieriger zu erreichen. Bei Bränden im Flugzeuginneren wird zwischen Bränden in der Kabine (5%) und im Frachtbereich (5%) unterschieden. In beiden Fällen kann die Brandursache ein vorangegangener Schwelbrand sein. Dann hat zum Zeitpunkt der Landung (also der Ausgangspunkt der Simulation) bereits eine massive Verrauchung stattgefunden. Frachtbrand und Kabinenbrand in Verbindung mit Verrauchung treten beide jeweils in 5% der Fälle auf. Möglich ist auch ein Schwelbrand, der ohne merkliches Feuer zu einer Verrauchung im Inneren führt (10%). Die Häufigkeiten entstammen der Tabelle 20.

(6) Wind

Die Kombination aus Windrichtung und Windstärke wurde bereits oben erläutert. Generell gilt, dass die Windverhältnisse stark von der Lage des Flughafens abhängen. Aufgrund der großen freien Flächen im Start- und Landebahnsystem, die über keinerlei Windschutz verfügen, herrscht auch an Flughäfen in eher windarmen Gegenden meist eine gewisse Luftbewegung. Die Wirkung des Windes beruht in einer Erhöhung bzw. Reduzierung der Wurfweite des Löschwassers. Gleichzeitig kann der Wind das Feuer in Richtung des Flugzeugrumpfs oder von diesem fort treiben. Letztere Wirkung wird nicht weiter differenziert betrachtet. Es wird angenommen, dass die deutliche Modifizierung der Löschmaßnahmen diese Wirkung hinreichend berücksichtigt. Die hier verwendeten Werte sind daher geschätzte Durchschnittswerte. In 70% der Fälle hat der Wind keine Bedeutung für den Einsatzverlauf. In 20% hat er eine unterstützende Wirkung. Die Löschmaßnahmen der Flughafenlöschfahrzeuge werden in ihrer Wirkung um 25% erhöht. Die Wahrscheinlichkeit für einen positiven Effekt ist höher als für einen nachteiligen. Dies erklärt sich damit, dass Flugzeuge soweit möglich gegen den Wind starten und landen. Da die Feuerwehr einen Löschangriff standardmäßig von vorne durchführt (Abbildung 12 bis Abbildung 15), wird der Wind i. d. R. von den Flughafenlöschfahrzeugen in Richtung Flugzeug wehen und somit die Löscharbeiten häufiger begünstigen statt diese zu erschweren. Mit einer Wahrscheinlichkeit von 10% hat der Wind jedoch nachteilige Wirkungen und erschwert die Brandbekämpfung. Die Effektivität beim Löschen sinkt um 25%.

Daneben kann der Wind noch Einfluss auf die Verrauchung im Flugzeuginneren haben. Bei geöffneten Türen oder großen Rissen im Rumpf (Zerteilung) erhöht bzw. reduziert sich die Verrauchung um 50%.

5. Simulation

(7) Unfallschwere / Verletzungsverteilung

Es ist einleuchten, dass nicht jeder Unfall die gleiche Anzahl an Verletzten in jeder Verletzungskategorie erzeugt. Die oben angegebenen Werte der ICAO sind Durchschnittswerte, die natürlich nicht jedem Unfallereignis gerecht werden. Ein berühmtes Beispiel, das sehr eindrucksvoll zeigt, dass nicht jeder Unfall eine ähnliche Anzahl und Verteilung der Verletzungsgrade erzeugt, ist der Unfall einer MD-81 der SAS am 27. Dezember 1991 mit 123 Passagieren und 6 Besatzungsmitgliedern [Richter et al. 1997, S. 420ff.]. Obwohl die Maschine bei einer Notlandung auf einem Feld in drei Stücke zerbrach, verlief der Unfall verhältnismäßig harmlos. Es gab lediglich 84 Leicht- und nur 8 Schwerverletzte. Um die Unterschiede der möglichen Verletzungsverteilungen bei Flugzeugunfällen zu berücksichtigen, wird folgender Ansatz gewählt:

Zunächst wird per Zufallsvariable bestimmt, ob ein Unfall der normalen Verletzungsverteilung entspricht oder schwerer bzw. weniger schwer ist als der Durchschnittswert. Im zweiten Schritt wird das konkrete Ereignis berücksichtigt. In Abhängigkeit von den gewählten Parametern fällt der Unfall schwerer oder leichter aus. Der Zustand des Flugzeuges nach dem Unfall und die Art des Landens bzw. des Untergrundes dienen als Indiz dafür, ob mit mehr oder weniger Toten und Schwerverletzten zu rechnen ist. Zunächst erscheint die Erkenntnis banal, dass bei schweren Unfällen in der Regel mehr Schwerverletzte entstehen als bei leichten Unfällen. Da die Angaben zur Verletzungsverteilung relativ sind, also in Prozent angegeben werden, hat eine Erhöhung eines Anteils immer eine Verringerung der anderen zur Folge. Die Frage ist nun, nach welcher Systematik die Neuverteilung der Verletzungsgrade vorgenommen wird. Hier sind sechs grundlegende Varianten denkbar (Abbildung 56):

a) Erhöhung der äußersten Klasse zulasten aller anderen Klassen

Alle Verletzungsklassen bis auf eine werden reduziert. Der einen Klasse werden sämtliche subtrahierten Anteile zugeschlagen.

b) Verschiebung durch alle Klasse

Alle Verletzungsklassen bis auf eine werden reduziert. Der einen Klasse werden sämtliche subtrahierten Anteile zugeschlagen.

c) Gleichmäßige, in der Mitte gespiegelte Umverteilung

Die eine Hälfte der Verletzungsklassen wird reduziert, die andere Hälfte erhält diese Anteile zusätzlich. Die Verschiebung erfolgt zwischen den beiden äußeren Klasse (1 und 4) sowie zwischen den beiden inneren (1 und 4). Alle Klassen werden um den gleichen Anteil verändert.

d) Ungleichmäßige, in der Mitte gespiegelte Umverteilung

Ähnlich wie bei Variante c) wird die eine Hälfte der Verletzungsklassen erhöht und die andere reduziert. Die Verschiebung erfolgt auch hier zwischen den beiden äußeren Klasse (1 und 4) sowie zwischen den beiden inneren (2 und 3). Die äußeren Klassen werden hierbei jedoch stärker verändert als die inneren.

5. Simulation

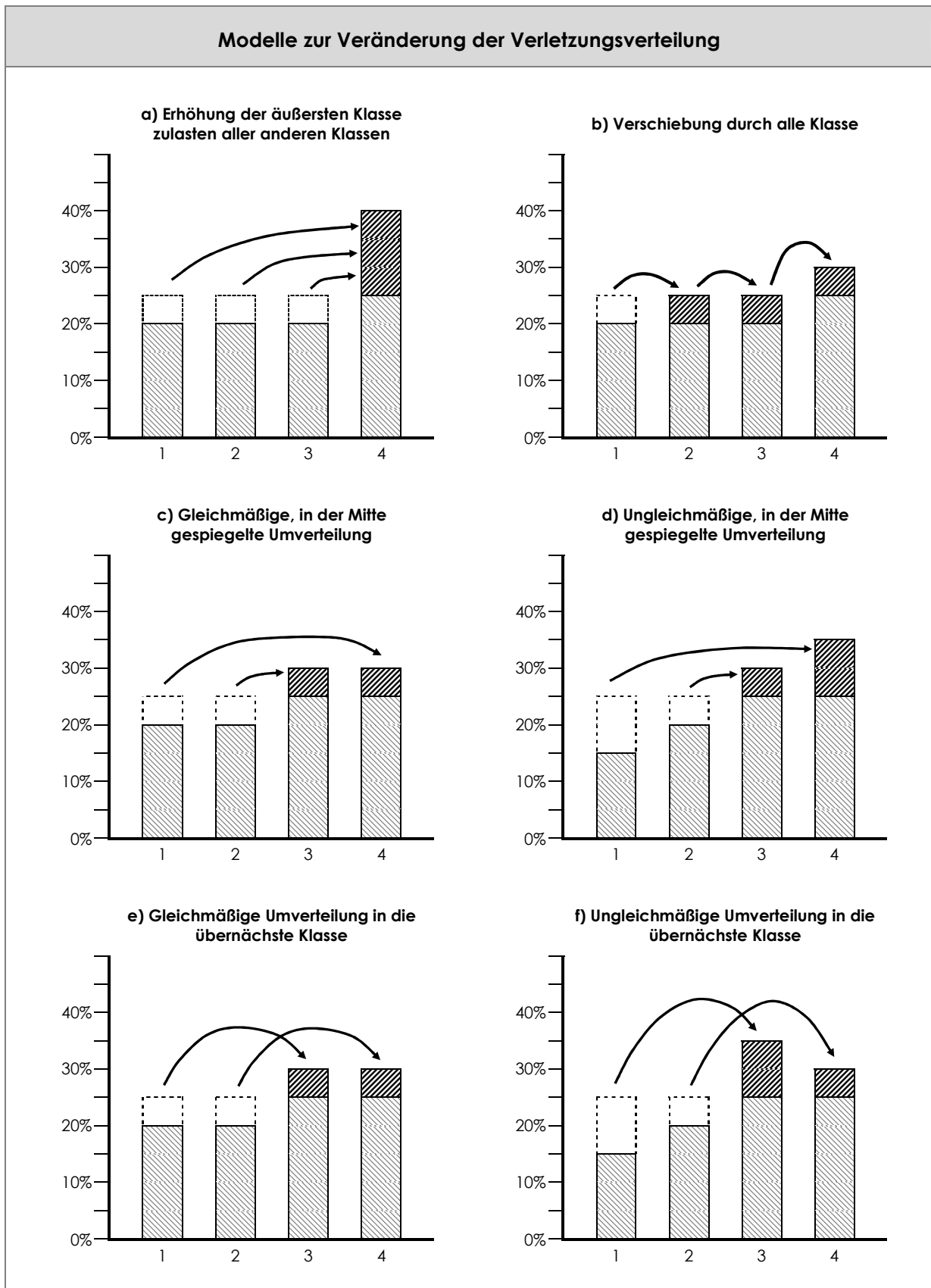


Abbildung 56: Modelle zur Veränderung der Verletzungsverteilung

5. Simulation

e) Gleichmäßige Umverteilung in die übernächste Klasse

Die Hälfte der Verletzungsklassen wird reduziert, die andere Hälfte erhält diese Anteile zusätzlich. Die Verschiebung erfolgt jeweils in die übernächste Klasse, also von 1 nach 3 und von 2 nach 4 bzw. in umgekehrte Richtung. Alle Klassen werden um den gleichen Anteil verändert. Im Ergebnis entspricht die Variante e) der Variante c). Sie wird aber zur bildlichen Gegenüberstellung mit f) trotzdem dargestellt.

f) Ungleichmäßige Umverteilung in die übernächste Klasse

Wie bei Variante e) wird die Hälfte der Verletzungsklassen reduziert, die andere Hälfte erhält diese Anteile zusätzlich. Die Verschiebung erfolgt jeweils in die übernächste Klasse (von 1 nach 3 bzw. von 2 nach 4), jedoch mit unterschiedlich großen Anteilen.

Für die rechnerische Umsetzung der Simulation wird Variante b) gewählt. Da die Anteile der Verletzungsgrade nicht (wie in den Abbildungen der Einfachheit halber angenommen) gleich verteilt sind, ist mit der Variante b) ein gleitender Übergang zwischen den einzelnen Klassen möglich. Von jeder Verletzungsklasse rutscht ein relativer Anteil in die nächsthöhere (oder tiefere) Klasse. Dies berücksichtigt, dass sich bei einer Veränderung der Unfallschwere in den beiden mittleren Verletzungsklassen, also bei „akut vital verletzt“ und „schwer verletzt“ die Zunahme und die Abnahme überlagern. Dies soll an einem Beispiel erläutert werden:

Fällt ein Flugzeugunfall leichter aus, als es der durchschnittliche statistische Wert erwarten lässt, werden einige Passagiere nur leichte Verletzungen davontragen, die ansonsten schwer verletzt worden wären. Die Anzahl der schwer verletzten Personen nimmt dadurch ab. Gleichzeitig werden aber auch weniger Passagiere akut vital verletzt. Dies wiederum bedeutet, dass einige Passagiere also nur schwer verletzt statt akut vital verletzt werden. Die Folge ist eine Zunahme der schwer verletzten Passagiere. Die Verletzungsklasse „schwer verletzt“ erfährt also eine Verschiebung von Personen in die Verletzungsklasse „un-/leicht verletzt“ und erhält gleichzeitig eine Zunahme an Personen zulasten der Verletzungsklasse „akut vital verletzt“. Modell b) kann diesen Mechanismus am besten darstellen.

Ein Beispiel soll dies zahlenmäßig verdeutlichen (Abbildung 57). Hierfür werden folgende Annahmen getroffen:

- 200 Passagieren
- Unfallschwere um 40% erhöht
- Variante b) „Verschiebung durch alle Klassen“ wird zur Ermittlung verwendet

5. Simulation

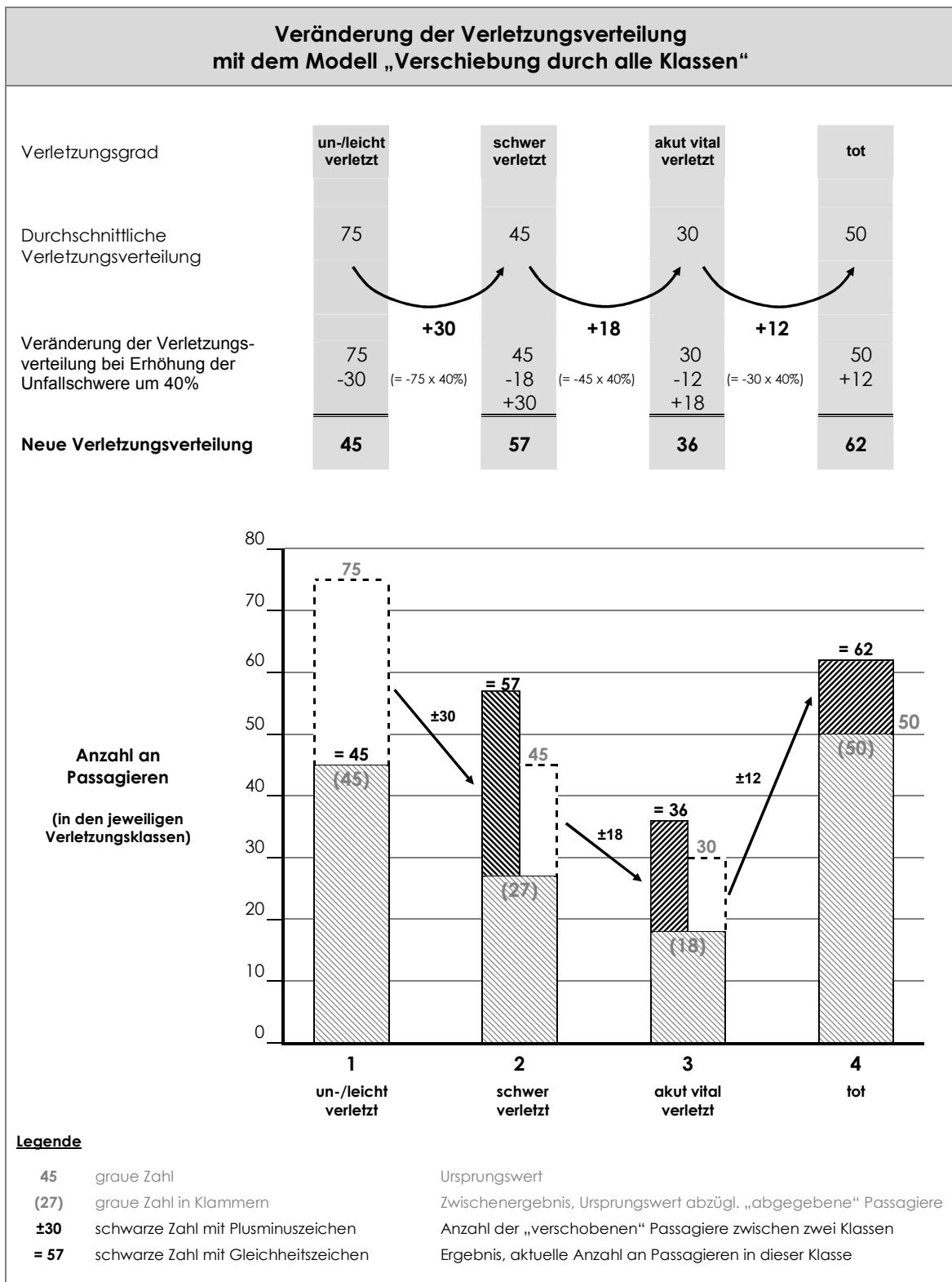


Abbildung 57: Veränderung der Verletzungsverteilung mit dem Modell „Verschiebung durch alle Klassen“

5. Simulation

5.4 Problematik paralleler Berechnungen und Gleichzeitigkeit der Abläufe

In Bereich der technischen Informationsverarbeitung ist eine Gleichzeitigkeit von mehreren Abläufen nicht realisierbar. Zwar sind Rechnersysteme dazu in der Lage, in Bruchteilen einer Sekunde eine Vielzahl an Rechenoperationen auszuführen, dennoch erfolgt die Abarbeitung chronologisch und nicht parallel. Eine Operation wird nach der anderen durchgeführt, unabhängig von der Gesamtanzahl an Operationen. Dies ist eine Grundproblematik der zellulären Automaten. Insbesondere für die Programmierung einer Einsatzsimulation ist sie von Bedeutung, da hier angenommen wird, dass eine Vielzahl von Abläufen gleichzeitig stattfinden. Feuer und Rauch breiten sich aus, soweit keine Löschmaßnahmen getroffen werden. Die Passagiere flüchten vor Feuer und Wärme und versuchen, das Flugzeug zu verlassen. Die Einsatzkräfte retten die Passagiere, nehmen eine Erstversorgung vor und löschen Brände, soweit es für die Rettungsmaßnahmen erforderlich ist. Es ist daher zu prüfen, inwieweit die lineare Abarbeitung der Rechenalgorithmen zu Verfälschungen führt und wie dieser Tatsache zu begegnen ist - oder ob die Ergebnisse letztlich nur unwesentlich beeinflusst werden.

5.4.1 Passagiere

Vor allem bei den Evakuierungsvorgängen ist zu prüfen, ob eine realitätsnahe Darstellung erreicht werden kann. Im Extremfall werden mehrere hundert Passagiere (über 500 bei einer Boeing 747 [Boeing o. J.] und fast bis zu 900 beim Airbus A380 [Airbus o. J.]) versuchen, über eine knapp bemessene Anzahl an Türen das Flugzeug zu verlassen. An dieser Stelle sei nochmals angemerkt, dass eine Forderung der ICAO besagt, dass ein vollbesetztes Flugzeug innerhalb von 90 Sekunden evakuiert sein muss. Dies gilt selbst dann, wenn nur die Hälfte aller Türen und Notausstiege zur Verfügung steht. Das Computerprogramm wird jedoch nicht das Verhalten mehrerer hundert Passagier gleichzeitig simulieren, sondern jeden einzelnen Passagier einzeln berechnen. Gerade diese hohe Anzahl an voneinander unabhängigen Akteuren in Verbindung mit der räumlichen Enge im Flugzeuginneren und der Durchflussbegrenzung durch die geringe Türanzahl erfordert jedoch eine Betrachtung der angenommenen Gleichzeitigkeit der Vorgänge bzw. des Einflusses der Reihenfolge.

Um das Problem zu veranschaulichen, stelle man sich eine Röhre vor (in Anlehnung an einen Flugzeugrumpf), in der sich vier Personen befinden (Abbildung 58). Jede Person kann nur dann einen Schritt vorwärts machen, wenn das Feld vor ihr frei ist. Die Personen sind von vorne nach hinten nummeriert. Person 1 setzt sich jeweils als erstes in Bewegung. In einer Variante erfolgt das Verlassen über den vorderen Ausgang, der sich bei Person 1 befindet. In der anderen Variante verlassen die Personen das System über einen hinten gelegenen Ausgang, der sich bei Person 4 befindet.

Es zeigt sich, dass die Systematik der Nummerierung einen großen Einfluss auf die benötigte Zeit hat. Bei der ersten Variante werden lediglich vier Zeitschritte benötigt, bis das Flugzeug vollständig evakuiert ist.

5. Simulation

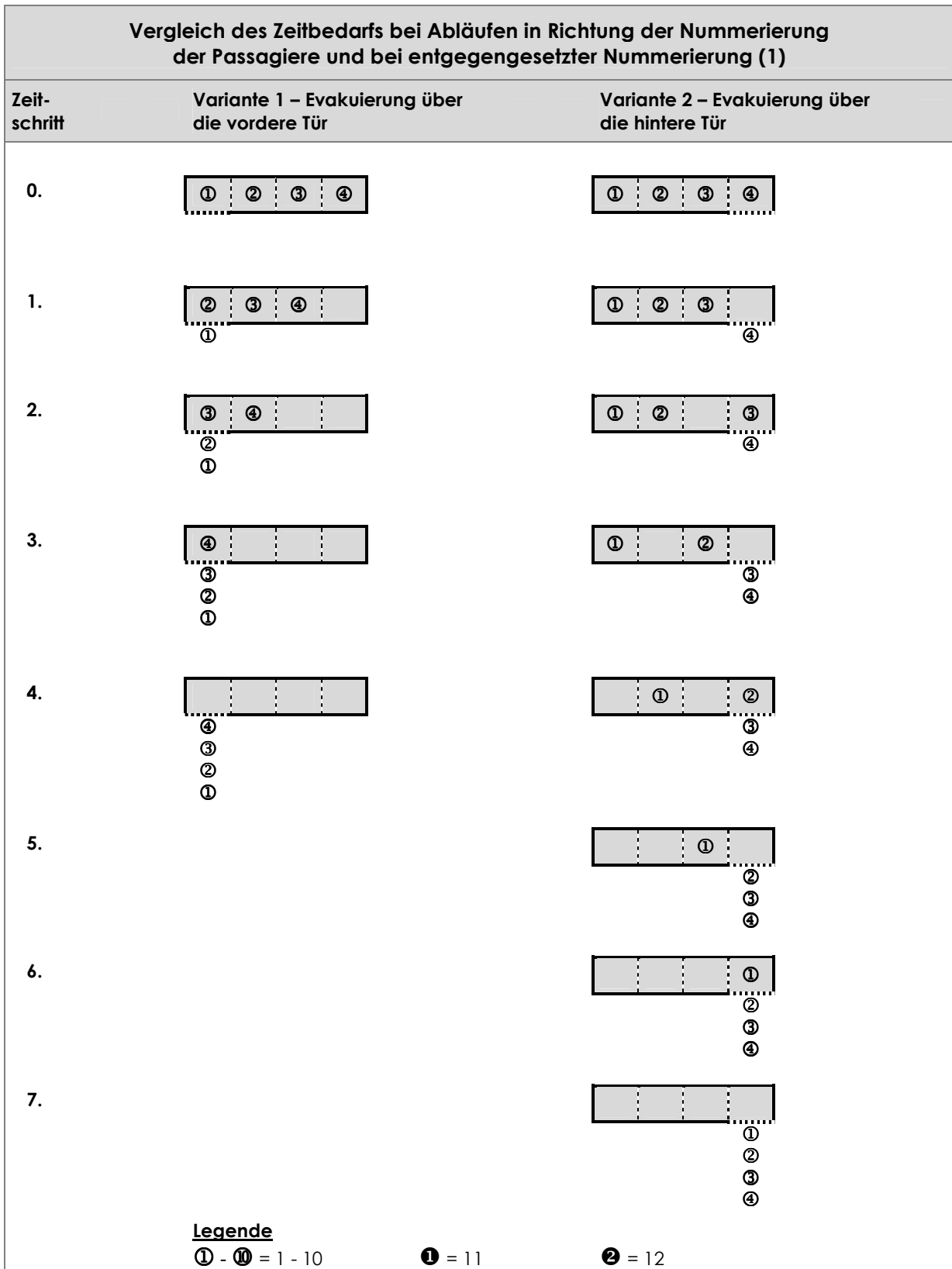


Abbildung 58: Vergleich des Zeitbedarfs bei Abläufen in Richtung der Nummerierung der Passagiere und bei entgegengesetzter Nummerierung (1)

5. Simulation

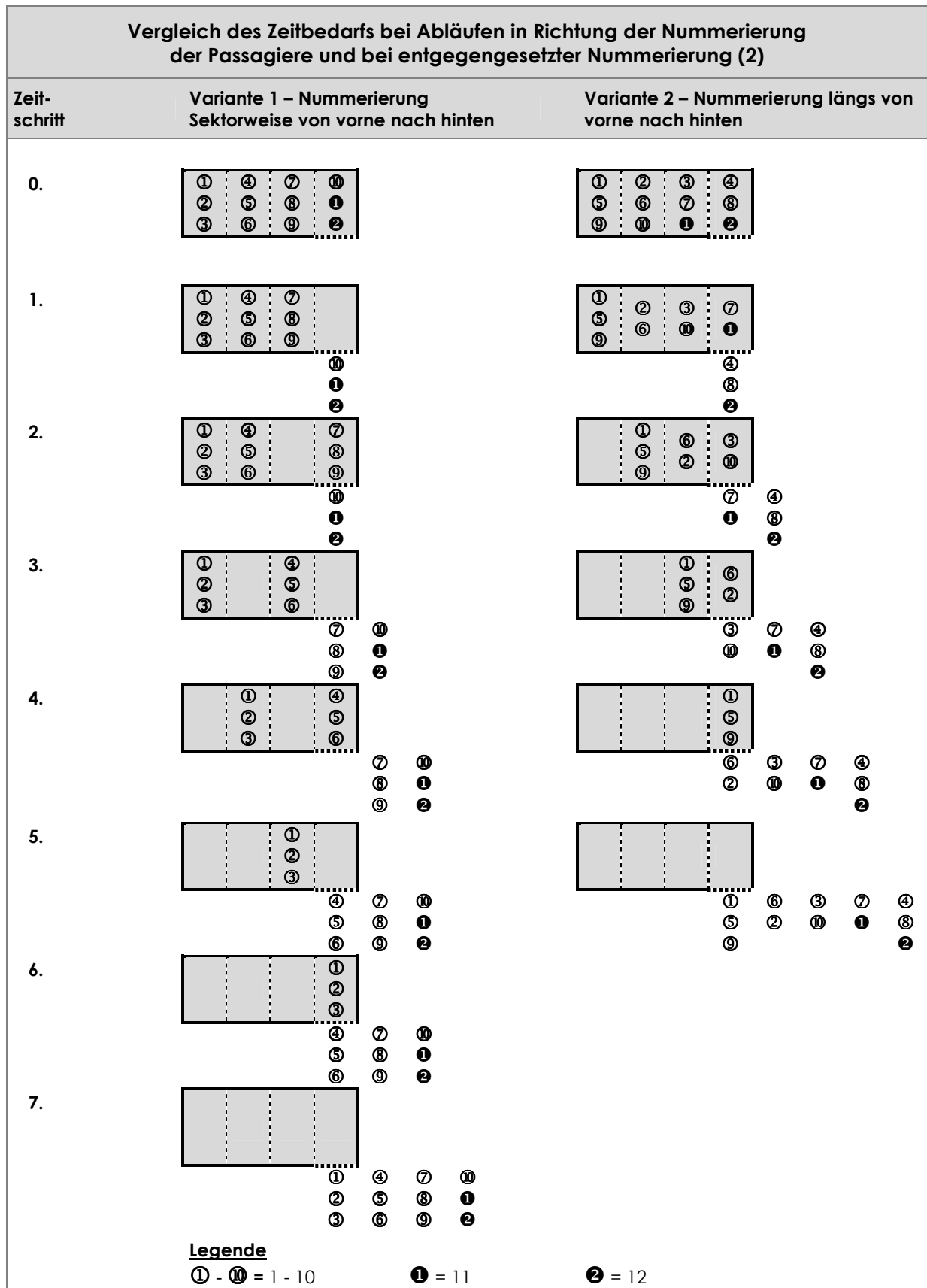


Abbildung 59: Vergleich des Zeitbedarfs bei Abläufen in Richtung der Nummerierung der Passagiere und bei entgegengesetzter Nummerierung (2)

5. Simulation

Dies ist möglich, weil jede Person mit ihrem Zug der räumlich und (in der Berechnungsreihenfolge) zeitlich nachfolgenden Person das für den nächsten Schritt benötigte Feld freimacht. Anders stellt sich die Situation bei der zweiten Variante dar. Alle Personen sind blockiert, bis die hintere Person in der Lage war, sich um ein Feld zu bewegen. Das Programm stellt im ersten Zeitschritt fest, dass sich Person 1 nicht bewegen kann, weil sich vor ihr kein freies Feld befindet. Gleiches gilt für die Personen 2 und 3. Erst Person 4 ist dazu in der Lage, sich zu bewegen und das Flugzeug zu verlassen. Der zweite Zeitschritt beginnt wieder mit der Prüfung, ob sich Person 1 bewegen kann usw. Diese kann sich im vierten Zeitschritt zum ersten Mal bewegen und erst im siebten das Flugzeug verlassen. Es muss also eine Möglichkeit gefunden werden, den Einfluss der Systematik der Nummerierung zu reduzieren, um sich der Gleichzeitigkeit der Abläufe in der Realität anzunähern.

Als Lösung für das oben beschriebene Problem wird eine andere Systematik bei der Nummerierung (und damit bei der Festlegung der Reihenfolge der Berechnung) gewählt. Statt die Passagiere fortlaufend in einem Sektor zu nummerieren und dann von Sektor zu Sektor zu springen, soll folgende Systematik zu Anwendung kommen:

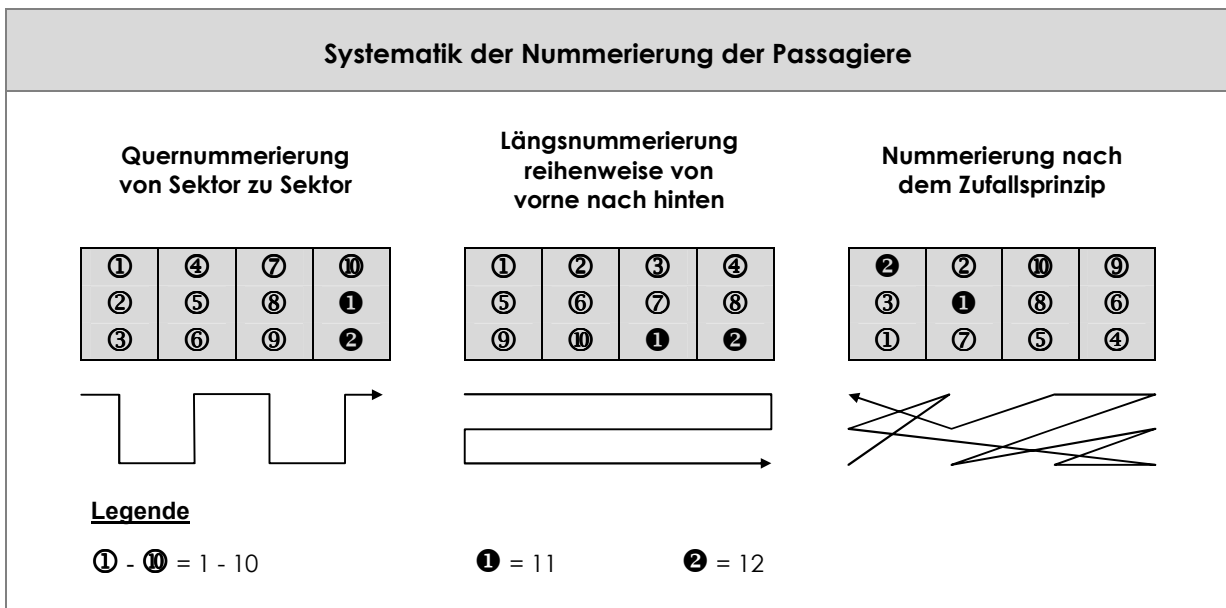


Abbildung 60: Systematik der Nummerierung der Passagiere

Die Passagiere werden längs anstatt quer von vorne nach hinten nummeriert (Abbildung 60). Die Folge ist, dass eine annähernd gleichwertige Bewegung von Passagieren in beide Richtungen möglich ist. Für Bewegungen nach hinten (also in Richtung der aufsteigenden Nummerierung) beträgt die Durchflusskapazität genauso viel wie nach vorne um eins verringert. Dies erklärt sich damit, dass die ersten Passagiere noch warten müssen, bis die erste Lücke entstanden ist. Danach wandert die Lücke quasi durch alle Felder und ermöglicht einen kontinuierlichen Abfluss von Passagieren. Es wird als hinreichende Genauigkeit für das Modell angesehen, dass sich die Durchflusskapazität bei dieser Art der Nummerierung lediglich um eins unterscheidet.

5. Simulation

Für Bewegungen der Passagiere außerhalb des Flugzeugs sind keine Überlegungen dieser Art notwendig, da es hier nicht zu Beeinträchtigungen aufgrund der Kombination aus räumlicher Enge und Reihenfolge der Passagierbewegungen kommt. Ebenfalls möglich wäre es, die Passagiere nach dem Zufallsprinzip zu verteilen. Da das zuvor beschriebene Verfahren der Längsnummerierung als hinreichend geeignet beurteilt wird, wird dieses Verfahren aufgrund seiner besseren Nachvollziehbarkeit und Kontrollmöglichkeiten der Zufallsnummerierung vorgezogen.

5.4.2 Einsatzkräfte

Die Einsatzkräfte teilen sich wie bereits ausgeführt in drei Kategorien auf. Führungskräfte, Fahrzeugbesatzung der Flughafenlöschfahrzeuge und Angriffstrupps. Diese drei Kategorien von Einsatzkräften müssen daher jeweils getrennt betrachtet werden.

a) Führungskräfte

Die Führungskräfte fallen aus dieser Betrachtung heraus, da sie nicht differenziert in Erscheinung treten. Ihr effektives Wirken wird für die geordnete Abarbeitung des gesamten Einsatzes angenommen, ohne dass sie im Rahmen der Simulation explizit oder räumlich in Erscheinung treten.

b) Fahrzeugbesatzung der Flughafenlöschfahrzeuge

Für den Einsatz der Flughafenlöschfahrzeuge muss eine Überlegung bezüglich der Abweichung von parallelem Einsatz und nacheinander erfolgender Berechnung angestellt werden. Im Rechenablauf wird die Löschwirkung der verschiedenen Flughafenlöschfahrzeuge hintereinander berechnet. Hierdurch wird unterstellt, dass es kein „doppeltes Löschen“ gibt (also zwei Fahrzeuge die gleiche Fläche mit Wasser beaufschlagen), sondern ein Fahrzeug dort weitermacht, wo das vorherige aufgehört hat. Da aber bereits mit einer verminderten Löschwirkung im Vergleich zur theoretisch möglichen gerechnet wird, erscheint der hier auftretende geringfügig positive Effekt (der entsteht, wenn kein Feld doppelt mit Wasser beaufschlagt wird) akzeptabel und erfordert keine weiteren Überlegungen oder Anpassungen.

c) Angriffstrupps

Für die Angriffstrupps muss die Betrachtung differenziert erfolgen. Es wird unterschieden zwischen Abläufen im Freien, der Nutzung der Rutschen, der Nutzung der Rettungstreppen und Fortbewegung bzw. Handlungen im Inneren des Flugzeugs.

- **Abläufe im Freien**

Für Abläufe im Freien wird grundsätzlich angenommen, dass es hier durch die chronologische Berechnungsabfolge nicht zu Abweichungen von der Realität kommt. Da es im Freien keine räumlichen Einschränkungen oder Zwangsstellen gibt, können sich unbegrenzt viele Trupps gleichzeitig an jedem beliebigen Ort aufhalten.

5. Simulation

Die gesamte Fläche des Schadensortes ist außen in Felder mit einer Größe von 12 x 9 Metern aufgeteilt. In solch einem Feld könnte sich eine größere Anzahl an Einsatzkräften versammeln, als bei realistischer Annahme insgesamt zur Verfügung stehen. Da die Einsatzkräfte aufgrund der verschiedenen Aufgaben (Führung, Flughafenlöschfahrzeuge, Rettung etc.) und der dynamischen Abläufe bei der Abarbeitung des Einsatzes zudem noch über die gesamte Fläche verteilt sind, ist eine Ansammlung von Einsatzkräften, die zu Behinderungen in den räumlichen Abläufen führen würde, auszuschließen.

▪ **Nutzung der Rutschen**

Für die Rutschen wurde per Definition festgelegt, dass immer nur ein Trupp eine Rutsche nutzen kann, unabhängig davon, ob der Trupp das Flugzeug verlassen oder betreten will. Es kann nun der Fall eintreten, dass sich ein Trupp (zur Vereinfachung soll er als Trupp 1 bezeichnet werden) auf der Rutsche befindet und ein anderer Trupp (Trupp 2) ebenfalls dieselbe Rutsche nutzen will. Kommt Trupp 1 in der Berechnung zuerst an die Reihe, verlässt er die Rutsche und Trupp 2 kann die Rutsche betreten, wenn für ihn die Berechnung durchgeführt wird. Kommt Trupp 2 jedoch in der rechnerischen Bearbeitung vor Trupp 1 an die Reihe, muss er eine Zeiteinheit aussetzen. Trupp 1 verlässt zwar in der gleichen Zeiteinheit die Rutsche, Trupp 2 kann aber erst in der nächsten Zeiteinheit den freien Platz auf der Rutsche einnehmen, da er seine Aktion in dieser Zeiteinheit bereits durchgeführt hat (nämlich warten oder einen anderen Weg suchen). Der Sachverhalt, dass ein Trupp ggf. 0:30 Minute (1 Zeiteinheit) warten muss, wenn eine Rutsche unmittelbar hintereinander von zwei Trupps genutzt werden soll, erscheint jedoch vertretbar. Hierfür sprechen gleich mehrere Aspekte: Die Konstellation tritt lediglich bei einer unrealistisch hohen Anzahl an Einsatzkräften häufiger und im Normalfall eher selten auf. Überdies kommt es überhaupt nur in der Hälfte der Begegnungen zweier Trupps zur beschriebenen Verzögerung, nämlich lediglich für den Fall, dass sich Trupp 2 zuerst auf der Rutsche befindet. Kommt es hingegen doch zum Wartefall, so führt die geringe Verzögerung durch die Wartezeit des Trupps 2 nicht zu einer signifikanten Beeinträchtigung der Gesamtabläufe.

▪ **Nutzung der Rettungstreppen**

Für die Rettungstreppe besteht aufgrund ihrer Bauweise kein Bedarf zu prüfen, ob es hier durch fehlende Gleichzeitigkeit zu Abweichungen kommt. Sie ist so breit und so (wenig) geneigt, dass mehrere Trupps sie problemlos gleichzeitig in beide Richtungen nutzen können.

▪ **Fortbewegung bzw. Handlungen im Inneren des Flugzeugs**

Es ist naheliegend, dass für Abläufe, die im Inneren des Flugzeuges stattfinden, Überlegungen angestellt werden müssen, ob es hier durch die Kombination aus räumlichen Zwängen und chronologischer Abfolge der Berechnungen zu Ungenauigkeiten oder Fehlern kommt.

5. Simulation

Auch für die Einsatzkräfte stellt sich das Problem der Enge im Flugzeuginneren, wie es bereits für die Passagiere beschrieben wurde. Hier wurde ein anderer Ansatz gewählt, da die Einsatzkräfte über eine wesentlich differenziertere Auswahl an Verhaltensmustern verfügen. Statt die Möglichkeit zum Handeln mit einer ja/nein-Option in Abhängigkeit vom verfügbaren Raum zu versehen, wurde eine Lösung über Wahrscheinlichkeiten gewählt. Generell gilt, dass jeder Trupp im Flugzeuginneren versucht, seine Aktion durchzuführen. Je größer die Anzahl der Trupps in einem Sektor ist, desto größer wird auch die Wahrscheinlichkeit für jeden einzelnen Trupp, dass er bei seiner Aktion behindert wird und sie nicht ausführen kann. Zunächst muss überlegt werden, zu welchem Zeitpunkt in der Simulation geprüft wird, ob es zu Behinderungen kommt. Zwei grundsätzliche Optionen stehen zur Auswahl:

I Zu Beginn der Zeiteinheit für alle Trupps

Die Überprüfung auf Beeinträchtigung infolge gleichzeitiger Anwesenheit mehrerer Trupps erfolgt zu Beginn einer Zeiteinheit für alle Einsatzkräfte auf einmal. Dann können Verzögerungen nur für Trupps eintreten, die sich zu Beginn der Zeiteinheit vor allen Aktionen gemeinsam in einem Sektor befinden. Hierbei werden dann alle Trupps unter den gleichen Ausgangsbedingungen betrachtet.

II Vor Beginn der Aktion jedes Trupps einzeln

Die Überprüfung findet immer statt, bevor ein Trupp in Aktion tritt. Hierbei können sich die Konstellationen der Trupps zueinander jedoch ständig ändern. Insbesondere für die Trupps, die in der Berechnungsfolge erst später an die Reihe kommen, wird sich die jeweils aktuelle räumliche Lage vor Beginn ihrer Aktion durch die Aktionen der vorherigen Trupps wesentlich verändert haben im Vergleich zur Ausgangssituation zu Beginn der Zeiteinheit.

Es stellt sich die Frage, ob sich die Ergebnisse bei diesen beiden Betrachtungsweisen von einander unterscheiden. Hierzu werden in den Abbildung 61 und Abbildung 62 sämtlicher Möglichkeiten des Aufeinandertreffens und Auseinandergehens zweier Trupps in einem Sektor aufgeführt und explizit unter dieser Fragestellung untersucht. In den Spalten rechts wird jeweils für Variante I und II vermerkt, ob sich ein Trupp zum Überprüfungszeitraum mit einem anderen Trupp zusammen (dann „1“) oder alleine (dann „-“) in einem Sektor aufhält.

Für die Variante I ist das Ergebnis wenig überraschend. Da hier zu Beginn einer neuen Zeiteinheit (also vor allen Aktionen) überprüft wird, ob sich beide Trupps im selben Sektor befinden, was dann ggf. Arbeitsbehinderungen zur Folge hat (Kapitel 5.2.2.3), tritt dieser Zustand immer für beide Trupps gleichzeitig auf. Insgesamt ist dies fünfmal der Fall.

Für die Variante II lässt sich folgendes Ergebnis feststellen. Der Trupp 1 startet fünfmal mit seiner Aktion, während er sich zusammen mit Trupp 2 in einem Sektor befindet (dies sind logischerweise die gleichen Situationen wie in der ersten Variante, da Trupp 1 gleich zu Beginn der Zeiteinheit in Aktion tritt).

5. Simulation

Vergleich der Truppenzahl je Sektor vor und nach einer Zeiteinheit (1)						
Position und Aktion der Trupps			Mit anderem Trupp (Tr) in einem Feld bei:			
Ausgangszustand	Trupp 1 handelt	Trupp 2 handelt	I - Beginn Zeiteinheit		II - vor der Aktion	
			Tr 1	Tr 2	Tr 1	Tr 2
			1	1	1	-
			1	1	1	-
			-	-	-	-
			-	-	-	1
			-	-	-	-
			-	-	-	1
Anzahl der Beeinträchtigungen bei Trupp 1			2		2	
Anzahl der Beeinträchtigungen bei Trupp 2				2		2
Legende						
○ Handlung (Aktion)			→ Trupp zieht in das nächste Feld			
● Passiver Zustand (vor oder nach einer Aktion)			↻ Trupp bleibt im Feld (z. B. zum Absuchen oder Aufnehmen von Verletzten)			

Abbildung 61: Vergleich der Truppenzahl je Sektor vor und nach einer Zeiteinheit (1)

5. Simulation

Vergleich der Truppenzahl je Sektor vor und nach einer Zeiteinheit (2)							
Position und Aktion der Trupps						Mit anderem Trupp (Tr) in einem Feld bei:	
Ausgangszustand	Trupp 1 handelt	Trupp 2 handelt	I - Beginn Zeiteinheit		II - vor der Aktion		
			Tr 1	Tr 2	Tr 1	Tr 2	
			1	1	1	1	
			-	-	-	-	
			-	-	-	-	
			1	1	1	1	
			1	1	1	-	
			-	-	-	1	
Anzahl der Beeinträchtigungen bei Trupp 1			3		3		
Anzahl der Beeinträchtigungen bei Trupp 2				3		3	
Legende							
○ Handlung (Aktion)		→ Trupp zieht in das nächste Feld					
● Passiver Zustand (vor oder nach einer Aktion)		↻ Trupp bleibt im Feld (z. B. zum Absuchen oder Aufnehmen von Verletzten)					

Abbildung 62: Vergleich der Truppenzahl je Sektor vor und nach einer Zeiteinheit (2)

5. Simulation

Für Trupp 2 ergibt sich, dass er ebenfalls in fünf Fällen mit seiner Aktion startet, während er sich mit Trupp 1 einen Sektor teilt, wenngleich es sich hierbei um teils unterschiedliche Situationen handelt. Dieses Ergebnis ist jedoch einleuchtend, wenn vorausgesetzt wird, dass jede Kombination an Aktionen von Trupp 1 und Trupp 2 mit der gleichen durchschnittlichen Häufigkeit durchgeführt wird. Denn mit der gleichen Häufigkeit, wie sich Trupp 1 mit seiner Aktion aus dem gemeinsamen Sektor entfernt, betritt er auch den Sektor, in dem sich bis zu diesem Zeitpunkt Trupp 2 alleine aufgehalten hat. Rein rechnerisch sind also beide Varianten – I „zu Beginn der Zeiteinheit für alle Trupps“ und II „vor Beginn der Aktion jedes Trupps einzeln“ – gleichwertig, da sie zur gleichen Anzahl an Situationen führen, in denen es zu einem gleichzeitigen Aufenthalt in einem Sektor und damit ggf. zu gegenseitigen Behinderungen bei ihren Aktionen kommen kann. Einsätze sind eine kontinuierliche Abfolge vieler einzelner Arbeitsschritte, die teils hintereinander und teils parallel zueinander erfolgen und keine starre Zeittaktung haben.

Aus diesem Grund erscheint Variante II, bei der eine Überprüfung für jeden einzelnen Trupp unmittelbar vor dessen Aktion und nicht zu einem festen Zeitpunkt vorgenommen wird, als das bessere Verfahren, entspricht dieses Lösung doch mehr einem dynamischen Einsatzverlauf. Die Ausführungen zeigen, dass somit für alle Einsatzkräfte unabhängig von ihrer Funktion (Führung, Flughafenlöschfahrzeuge, Retten und Löschen im Flugzeug) sichergestellt ist, dass die Berechnungsverfahren so gewählt wurden, dass es nicht aufgrund der Programmierung zu (zu großen) Realitätsverlusten kommt. Insbesondere sind Verfälschungen infolge der chronologischen Bearbeitung weitestgehend ausgeschlossen.

5.4.3 Brandausbreitung

Für die Brandausbreitung wird nach einem einfachen Modell vorgegangen. Brennt ein Feld, so entzündet es auch die angrenzenden. Diese Art der Brandausbreitung wird gleichermaßen bei eindimensionaler (Flugzeugrumpf) wie bei zweidimensionaler (Flächenbrand) Betrachtung verwendet. Es besteht hierbei jedoch rechnerisch das Problem einer „unkontrollierten Brandausbreitung nach hinten“ in einer Zeiteinheit, also einer schlagartigen Brandausbreitung über die gesamte Fläche hinweg.

Um das Problem zu verdeutlichen, wird ein lineares (eindimensionales) Feld betrachtet. Bei einem Brand im Feld n werden die Felder $n-1$ und $n+1$ entzündet. Werden nun alle Felder von vorne nach hinten betrachtet, ergibt sich folgende Lage. Da das Feld $n+1$ brennt (es wurde durch das Feld n entzündet), erfolgt eine Brandausbreitung auf das Feld n (dies brennt bereits, daher ändert sich hier nichts) und das Feld $n+2$.

5. Simulation

Durch die anschließende Überprüfung des Feldes $n+2$ kommt es auch zum Brand im Feld $n+3$ und so weiter. Sobald es an einem Punkt brennt, läuft das Feuer durch alle weiteren Felder durch. Ein solcher Fall ist in der Abbildung 63 dargestellt.

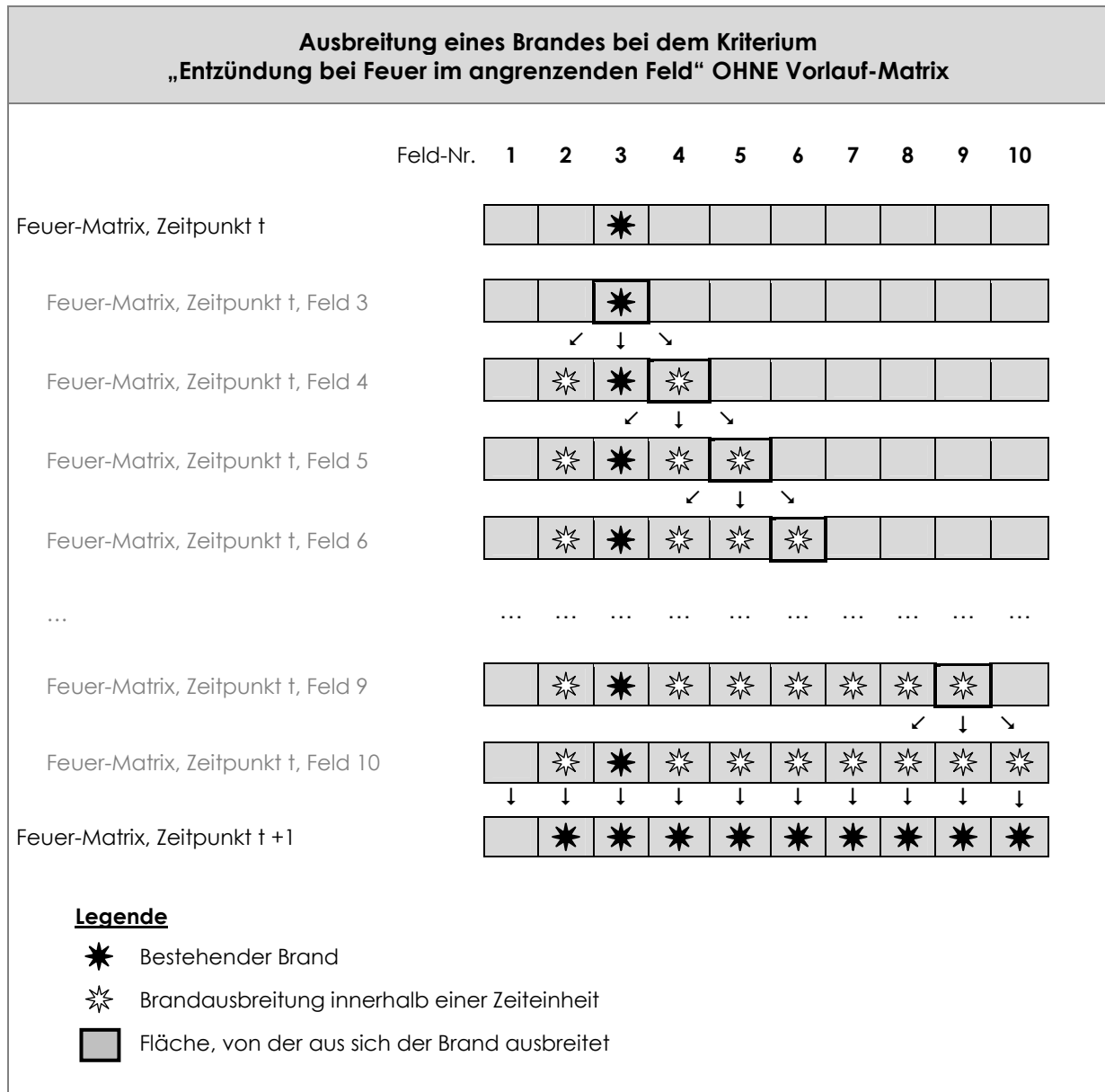


Abbildung 63: Ausbreitung eines Brandes bei dem Kriterium „Entzündung bei Feuer im angrenzenden Feld“ OHNE Vorlauf-Matrix

Um ein „Durchlaufen“ des Feuers in einer Zeiteinheit nach hinten zu vermeiden, wird eine Vorlauf-Matrix verwendet. Beim Durchlauf aller Felder in der Feuer-Matrix wird wie oben beschrieben geprüft, ob es zu einer Entzündung der benachbarten Felder kommt. Diese Ergebnisse werden jedoch nicht direkt in die Feuer-Matrix eingetragen, sondern in der Feuer-Vorlauf-Matrix zwischengespeichert.

5. Simulation

Erst wenn die Prüfung aller Felder abgeschlossen ist, wird das in der Feuer-Vorlauf-Matrix zwischen-gespeicherte Ergebnis in die Feuer-Matrix eingetragen (Abbildung 64). Dieses Verfahren kann in gleicher Weise bei eindimensionalen (Brandausbreitung im Flugzeugrumpf) oder mehrdimensionalen Systemen angewendet werden. Ein Beispiel für ein System der zweidimensionalen Brandausbreitung wäre ein Flächenbrand durch auslaufendes Kerosin. Dreidimensional wird das System, wenn ein Übergriff des Brandes auf das Flugzeug berücksichtigt bzw. geprüft wird.

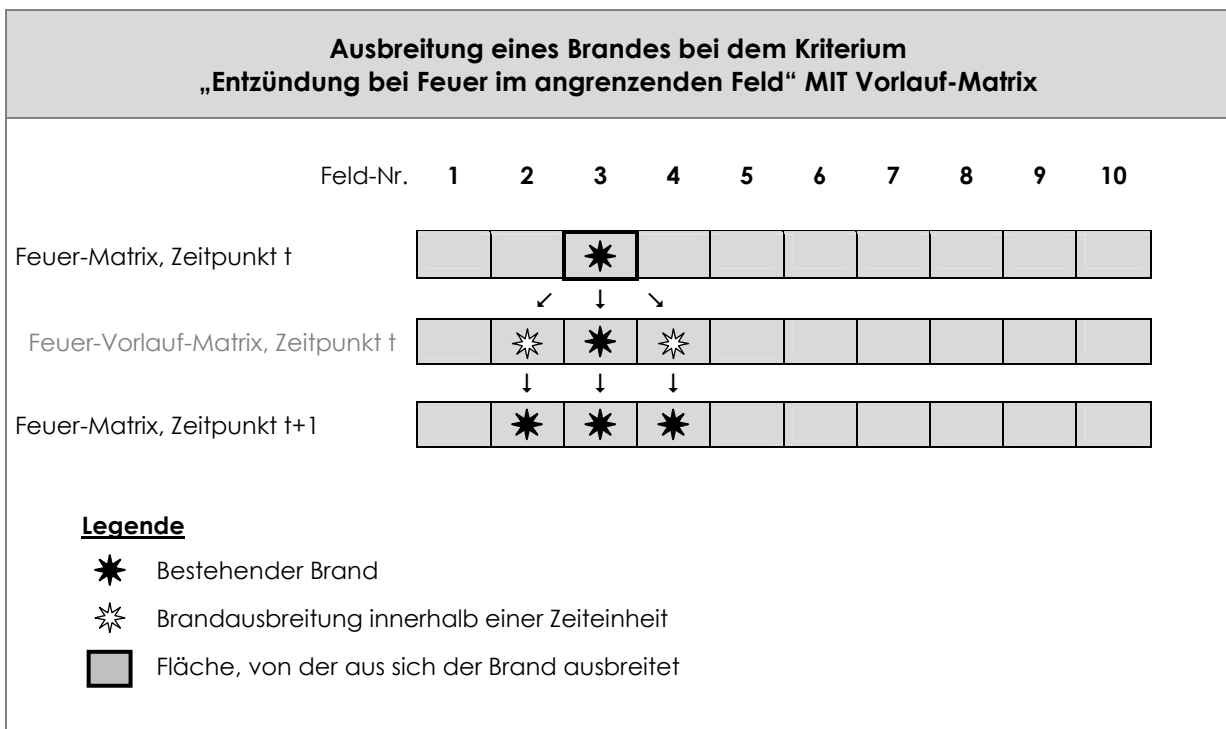


Abbildung 64: Ausbreitung eines Brandes bei dem Kriterium „Entzündung bei Feuer im angrenzenden Feld“ MIT Vorlauf-Matrix

6. Ergebnisse

Dieses Kapitel befasst sich mit den Ergebnissen, die sich auf Basis der beschriebenen kybernetischen Risikoanalyse in Form einer Computersimulation erzielen lassen. Zunächst werden die Ergebnisse dargestellt und in einem weiteren Unterkapitel auf ihre Plausibilität überprüft. Daran schließt sich eine Interpretation an, die Schlussfolgerungen über deren praktische Bedeutung liefert.

Die Durchführung der Simulation lässt sich verständlicherweise nur schlecht beschreiben, erfolgt diese doch unter Einsatz eines Computers, der das der Simulation zugrunde liegende Computerprogramm Zeile für Zeile bzw. Schleife für Schleife abarbeitet. Zur Umsetzung des im vorherigen Kapitel dargestellten Modells als Computerprogramm wurde das Programm „Matlab“ verwendet. Wie bereits erläutert erfolgt die Berechnung der Abläufe in Halbminutenschritten. Dieses Zeitraster vergibt sich fast zwangsläufig aus den sehr kurzen Zeitschritten, die vielen relevanten Vorgängen zugrunde liegen. Daraus resultiert zwar ein sehr hoher Rechenaufwand, da sich die Dauer von Einsätzen bei Großschadenslagen durchaus über mehrere Stunden erstrecken kann. Dies ist jedoch notwendig, um das Modell der Realität in angemessener Weise anzunähern. Nur mit dieser Genauigkeit erhalten die Ergebnisse der Computersimulation eine signifikante Aussagekraft. Das Halbminutenraster, die Komplexität der Modellierung (über 5.000 Programmzeilen) sowie die hohe Anzahl an Simulationsdurchläufen (10.000 je Einsatzkräfteanzahl) ergeben bei der Verwendung üblicher Computer (Stand 2010) Rechenzeiten bis zu mehreren Stunden.

6.1 Darstellung und Analyse der Ergebnisse

In Abbildung 65 ist der Einsatzerfolg in Abhängigkeit von der Anzahl der Einsatzkräfte aufgeführt, also die Antwort auf die zentrale Fragestellung dieser Arbeit. Zwei Varianten werden hier unterschieden:

- Eine Kurve beruht auf einer Berechnung mit 10.000 simulierten Flugzeugunfällen je Personalstärkezahl
- Der anderen Kurve liegen jeweils 100.000 Flugzeugunfälle zugrunde.

Untersucht wird hierbei, inwieweit die Anzahl der Simulationsdurchläufe Einfluss auf die Genauigkeit der Ergebnisse hat. Ziel dieser Gegenüberstellung ist letztlich eine Aussage darüber, ob auch mit vertretbarem Aufwand ein qualitativ zufriedenstellendes Ergebnis erzielt werden kann. Wie zu erwarten, ist die Kurve mit der um den Faktor 10 höheren Anzahl an Durchläufen glatter und weist weniger Streuung auf. Es zeigt sich aber auch, dass bereits 10.000 Durchläufe trotz gewisser Schwankungen zu einem sehr ähnlichen Ergebnis führen, insbesondere bei der Betrachtung des Gesamtverlaufs (im Gegensatz zur Betrachtung einzelner Werte).

Die Ergebnisse der Simulationen mit 10.000 und mit 100.000 Unfall-Berechnungen je Einsatzkräfteanzahl unterscheiden sich letztlich nur marginal voneinander. Eine Anzahl von 10.000 Durchläufen kann daher als ausreichend genau angesehen werden.

6. Ergebnisse

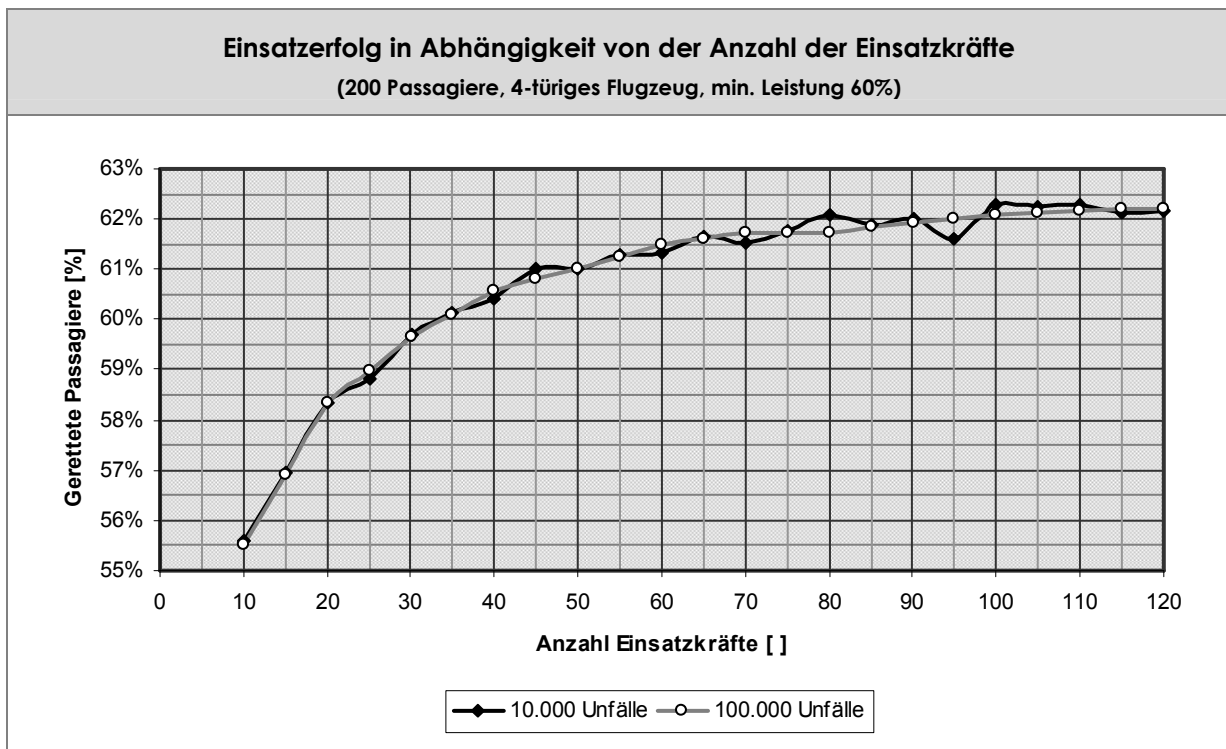


Abbildung 65: Einsatzenerfolg in Abhängigkeit von der Anzahl der Einsatzkräfte

An dieser ersten gewählten Darstellung lassen sich bereits zentrale Ergebnisse ablesen. Der Einsatzenerfolg liegt bei 10 Einsatzkräften etwas über 55% und steigt auf knapp 60% bei 30 Einsatzkräften. Danach flacht die Kurve ab und steigert sich bei einer Verdoppelung der Einsatzkräfte von 30 auf 60 lediglich um 1,5 Prozentpunkte von knapp 60% auf 61,5%. Jenseits des Wertes von 60 Einsatzkräften ist deren Steigerung kaum noch relevant. Es ist festzustellen, dass sich bis zu einer Anzahl von 40 Einsatzkräften jede zusätzliche Einsatzkraft durch einen erkennbaren Anstieg der Anzahl an geretteten Passagieren auszeichnet. Zwischen 40 und 60 Einsatzkräften reduziert sich dieser positive Effekt deutlich und ab einer Größe von 60 Einsatzkräften bleibt der Einsatzenerfolg nahezu unverändert.

Sehr gut erkennbar lässt sich dies veranschaulichen, wenn die erste Ableitung, also die Steigung, der Ergebniskurve (mit 100.000 Unfällen) dargestellt wird. Wenn auch die Kurve noch deutlich sichtbare Schwankungen aufweist und nicht stetig verläuft, so deutet sich doch ein asymptotischer Verlauf in Richtung der Nullachse an. Trotz steigendem Aufwand (hier: Anzahl der Einsatzkräfte) wird der Zuwachs an geretteten Passagieren (Abbildung 66) immer geringer. In den Wirtschaftswissenschaften wird exakt dieser Sachverhalt als abnehmender Grenznutzen bezeichnet, da der erzielbare Nutzen (hier: gerettete Passagiere) gegen einen Grenzwert strebt [Breyer 2004, S. 124ff.].

6. Ergebnisse

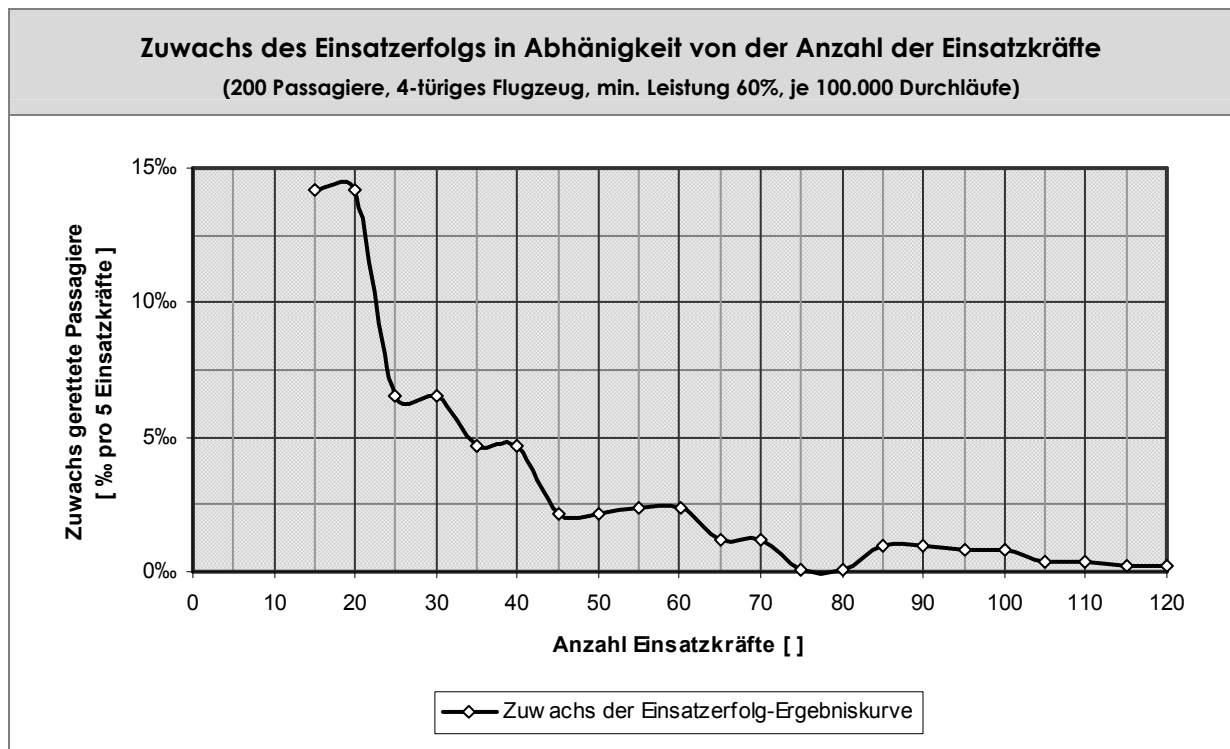


Abbildung 66: Zuwachs des Einsatz Erfolgs in Abhängigkeit von der Anzahl der Einsatzkräfte

Im Abbildung 67 sind die Ergebnisse einer Simulationsreihe (10.000 Durchläufe, 4-türiges Flugzeug, min. Leistung 60%) nun der Vollständigkeit halber nochmals bis zu einem Wert von 200 Einsatzkräften dargestellt. Die zentrale Schlussfolgerung ist hier, dass der Verlauf des Einsatz Erfolges bei Werten mit mehr als 100 Einsatzkräften nahezu konstant verläuft. Es ist daher ausreichend, die Berechnungen bei der gewählten Passagieranzahl von 200 nur bis zu 120 Einsatzkräften durchzuführen (wie bereits in Abbildung 65 erfolgt), um den Rechenaufwand nicht unnötig zu vergrößern.

Werden die Werte in einem Graphen mit einer zweiten Y-Achse dargestellt, deren Skalierung von null bis 100% reicht, ist der Anstieg des Einsatz Erfolges zwischen 10 und 30 Einsatzkräften nur noch schwach wahrnehmbar. Die Kurve weist nur noch eine geringe Steigung auf und verläuft oberhalb von 40 Einsatzkräften nahezu horizontal. Durch die Steigerung der Einsatzkräfte tritt lediglich ein kaum mehr wahrnehmbarer Effekt ein.

Noch deutlicher lässt sich der abnehmende Grenznutzen einer steigenden Anzahl an Einsatzkräften ablesen, wenn der zusätzliche Personalbedarf in Abhängigkeit von der Steigerung des Einsatz Erfolges dargestellt wird (Abbildung 68). Der Einsatz Erfolg bewegt sich zwischen 55% und 63%. Selbst eine Steigerung der anfänglichen Zahl von 10 Einsatzkräften um mehr als den Faktor 10 vermag den Einsatz Erfolg lediglich um gut 6 Prozentpunkte zu erhöhen.

6. Ergebnisse

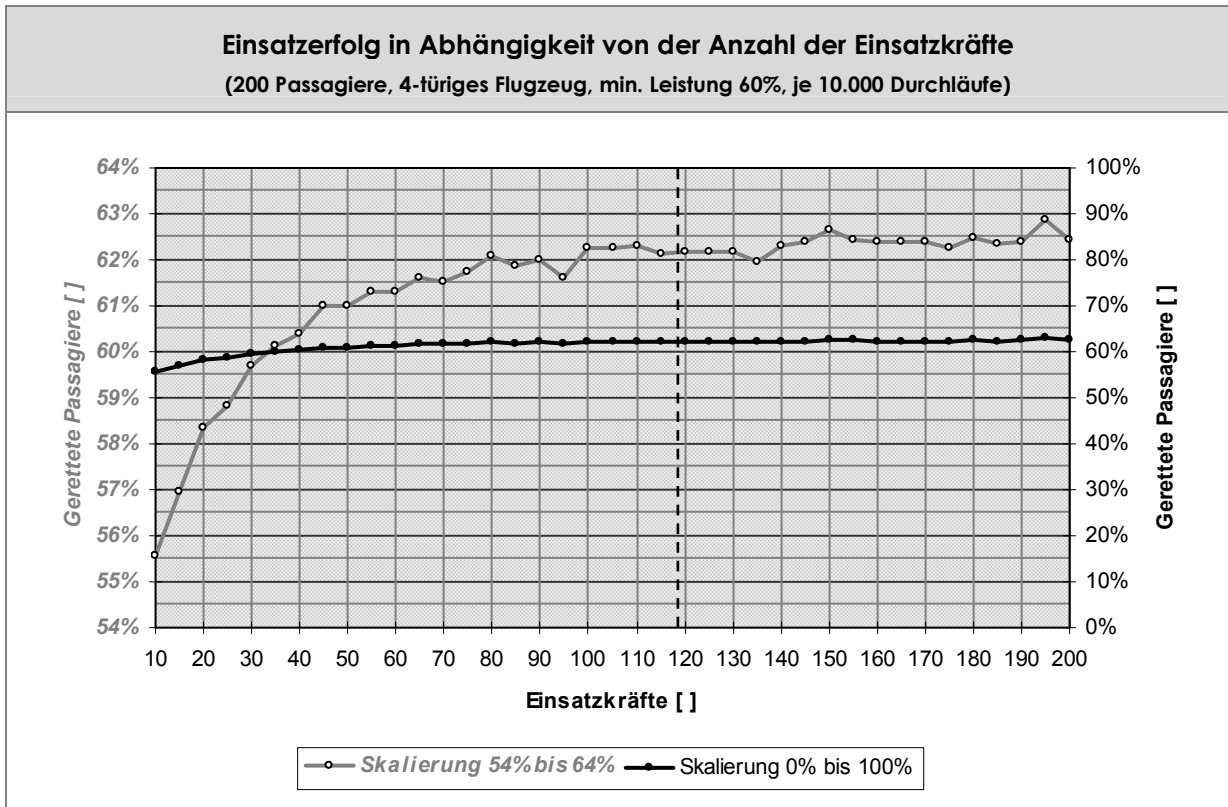


Abbildung 67: Einsatzenerfolg in Abhängigkeit von der Anzahl der Einsatzkräfte

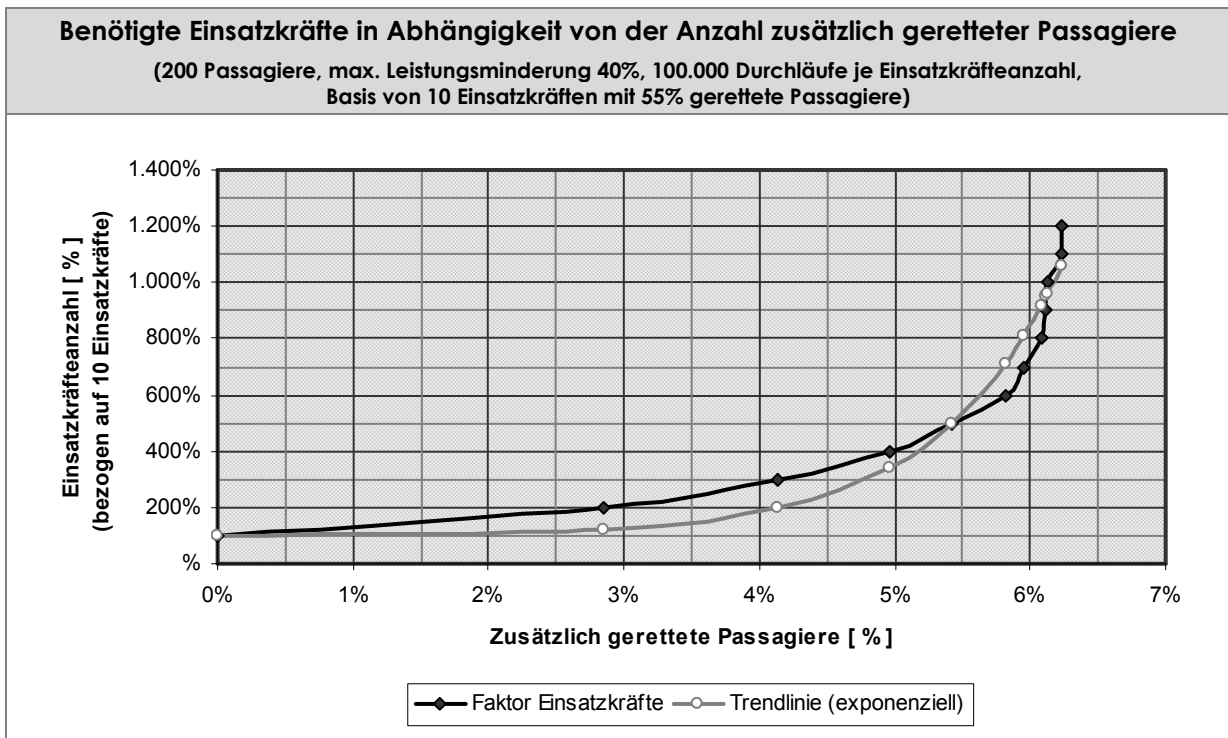


Abbildung 68: Benötigte Einsatzkräfte in Abhängigkeit von der Anzahl zusätzlich geretteter Passagiere

6. Ergebnisse

Nachdem nun eine Eingrenzung des Ergebnisraums erfolgt ist (max. 120 Einsatzkräfte, 10.000 Unfälle je Einsatzkräfteanzahl), geht es im nächsten Schritt darum, den Einsatzerfolg in Anhängigkeit von der Anzahl der Einsatzkräfte genauer zu analysieren und differenzierter darstellen. Zu diesem Zweck erfolgt die Ergebnisdarstellung mit Hilfe von Wahrscheinlichkeitsverläufen. Hier wird der Einsatzerfolg nicht wie in der obigen Abbildung als ein einziger Durchschnittswert zu der Variablen „Einsatzkräfteanzahl“ ermittelt, sondern alle Durchläufe zu einer Einsatzkräfteanzahl werden ausgezählt und in sechs Klassen eingeteilt, die als Wahrscheinlichkeitsverläufe dargestellt werden. Dieses Vorgehen ermöglicht eine detailliertere Betrachtung der Auswirkungen unterschiedlicher Einsatzkräfteanzahlen:

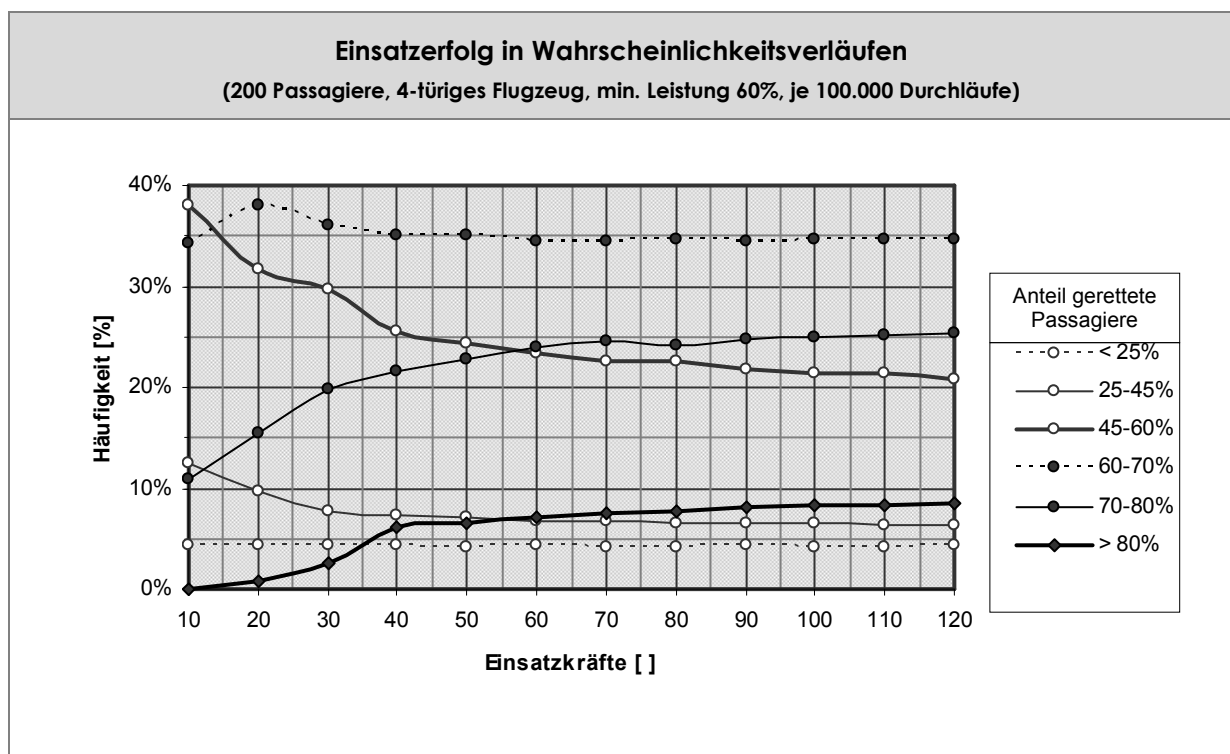


Abbildung 69: Einsatzerfolg in Wahrscheinlichkeitsverläufen

- Relativ konstant mit knapp 5% ereignen sich in den Modellrechnungen Flugzeugunfälle, bei denen die Zahl der geretteten Personen unter 25% liegt. Dies sind in der Regel Unfälle, bei denen durch Feuer im Flugzeuginneren und giftigen Brandrauch bereits große Teile der Flugzeuginsassen stark geschädigt wurden, oder solche, bei denen das Flugzeug massiv durch Feuer gefährdet ist und die Feuerwehr auf Grund ungünstiger Rahmenbedingungen (z. B. Wetter, Unfall außerhalb des Flughafens) erst sehr spät eintrifft. Extremereignisse wie die Kollision mit einem Gebäude oder einem anderen Flugzeug gehören ebenfalls dazu. In all diesen Fällen sind die Verluste bereits zu Beginn der Rettungsmaßnahmen so groß, dass auch eine hohe Anzahl an Einsatzkräften keine Wirkung mehr entfalten kann.
- Die Wahrscheinlichkeit für Flugzeugunfälle, bei denen zwischen 25% und 45% der Flugzeuginsassen gerettet werden können, fällt von 13% bei 10 Einsatzkräften zunächst relativ schnell auf 8% bei 30 Einsatzkräften und bewegt sich dann stabil zwischen 6% und 7%.

6. Ergebnisse

- Die Häufigkeit von Ereignissen mit 45% bis 60% geretteten Flugzeuginsassen vollzieht eine deutliche Veränderung. Liegt der Wert zu Beginn (also mit 10 Einsatzkräften) noch bei 38%, fällt er annähernd linear auf knapp 25% bei 45 Einsatzkräften. Danach fällt er noch geringfügig weiter ab, bis er bei 60 Einsatzkräften einen Wert von 23% erreicht. Im weiteren Verlauf bewegt er sich zwischen 21% und 23%.
- Die Kurve, die die Häufigkeit des Einsatzerfolges zwischen 60% und 70% abbildet, vollführt eine zunächst unerwartete Entwicklung. Sie beginnt bei 35% und erreicht zwischen 20 und 30 Einsatzkräften einen Anteil von 37,5%. Danach fällt sie wieder auf 35% ab und behält diesen Wert im weiteren Verlauf nahezu unverändert bei. Dies lässt sich damit erklären, dass sich hier zwei Effekte überlagern, die letztlich zu einer relativ konstanten Kurve führen. Erwartungsgemäß erhöht sich zunächst mit der Zunahme der Einsatzkräfte auch die Häufigkeit von Einsatzergebnissen in diesem Intervall des Einsatzerfolgs. Im weiteren Verlauf sinkt die Kurve jedoch wieder ab, da sich viele Unfallszenarien mit günstigen Rahmenbedingungen in eine Klasse mit höheren Überlebensraten (70% und mehr) verschieben.
- Die Häufigkeit von Flugzeugunfällen mit einer Überlebensrate zwischen 70% und 80% stellt sich als das Gegenstück zu der Kurve mit 45% bis 60% dar. Sie beginnt zunächst auf einem niedrigen Niveau bei 11% und steigt dann in dem Maße an, in dem die letztgenannte Kurve sinkt. Bei einer Anzahl von 50 Einsatzkräften haben sich beide Kurven fast angenähert und schneiden sich schließlich mit ca. 57 Einsatzkräften bei 23%. Bis zu einer Einsatzkräfteanzahl von 70 steigt die Kurve minimal an, danach verläuft sie relativ konstant bei 25%.
- Eine sehr interessante Entwicklung vollführt ebenso die Kurve, die den Anteil an Flugzeugunfällen mit mehr als 80% geretteten Passagieren abbildet. Hier sei zunächst noch einmal darauf hingewiesen, dass die zugrunde liegende Verletzungsverteilung gemäß Abbildung 37 durchschnittlich nur 75% der Flugzeuginsassen einen Unfall überleben. Folglich ist die Wahrscheinlichkeit für Unfälle mit 80% und mehr Geretteten zunächst erwartungsgemäß bei Null. Gemäß der Verteilung der Unfallschwere aus Tabelle 31 kommt es jedoch ebenso zu Unfällen mit leichterem Ausgang, d.h. es gibt mehr Überlebende. Im Bereich von 15 bis 40 Einsatzkräften steigt die Kurve relativ gleichmäßig bis zu einem Wert von 7% an. Danach strebt sie einen Grenzwert zwischen 8% und 9% an.

Werden die Ergebnisse nun nochmals in Säulendiagrammen aufgetragen, lässt sich die Entwicklung des Einsatzerfolges in Abhängigkeit von der Einsatzkräfteanzahl gut aufzeigen. Diese Form der Ansicht ist weniger komplex als die Darstellung mit den Wahrscheinlichkeitsverläufen (Abbildung 69). Die Ergebnisse sind somit leichter ersichtlich. Hierzu wird jeweils für 10, 20, 40, 60 und 100 Einsatzkräfte ein eigenes Säulendiagramm erstellt, in dem die jeweiligen Häufigkeiten für die verschiedenen Intervalle „Anteil geretteter Passagiere“ eingetragen werden.

6. Ergebnisse

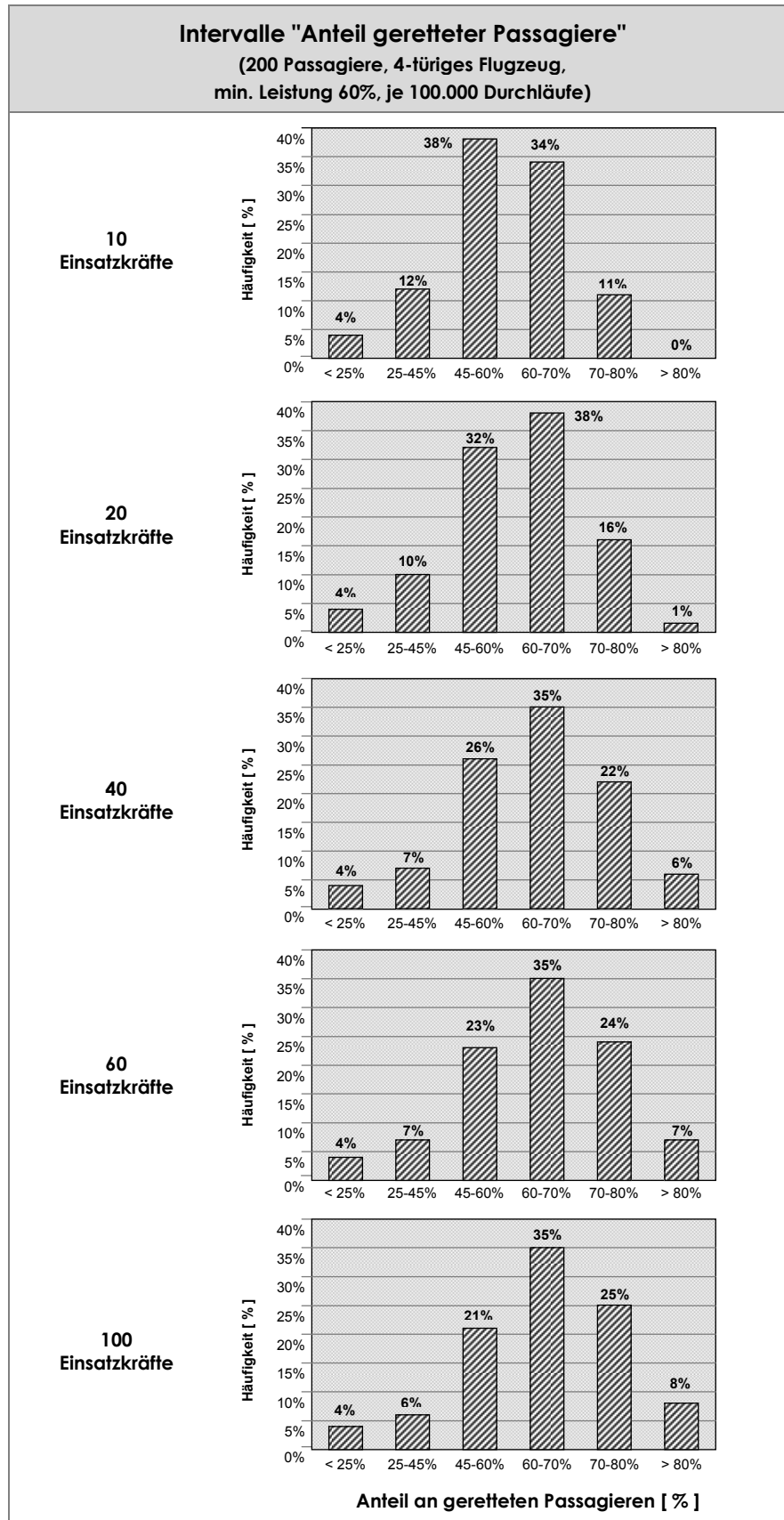


Abbildung 70: Intervalle "Anteil geretteter Passagiere"

6. Ergebnisse

Die Ergebnisse können wie folgt kurz beschrieben werden:

1. Das Intervall mit weniger als 25% Einsatzerfolg hat unverändert eine Häufigkeit von 4%.
2. Die Intervalle 25% bis 45% sowie 45% bis 60% nehmen annäherungsweise um die Hälfte ab (von 12% auf 6% bzw. von 38% auf 21%).
3. Das Intervall mit einem Einsatzerfolg zwischen 60% und 70% bleibt relativ konstant auf einem hohen Niveau zwischen 34% und 38%.
4. Das Intervall 70% bis 80% steigt im Gegenzug stetig von 11% auf 25% an.
5. Die markanteste Entwicklung vollführt das Intervall mit einem Einsatzerfolg größer als 80%. Beträgt dessen Häufigkeit bei 10 Einsatzkräften noch 0%, so erreicht es bei 100 Einsatzkräften einen Wert von 8% und bereits 7% bei 60 Einsatzkräften.
6. Auch hier wird deutlich, dass sich der Einsatzerfolg ab einer Größe von 40 Einsatzkräften nur noch sehr langsam verbessert und ab 60 Einsatzkräften nahezu unverändert bleibt.

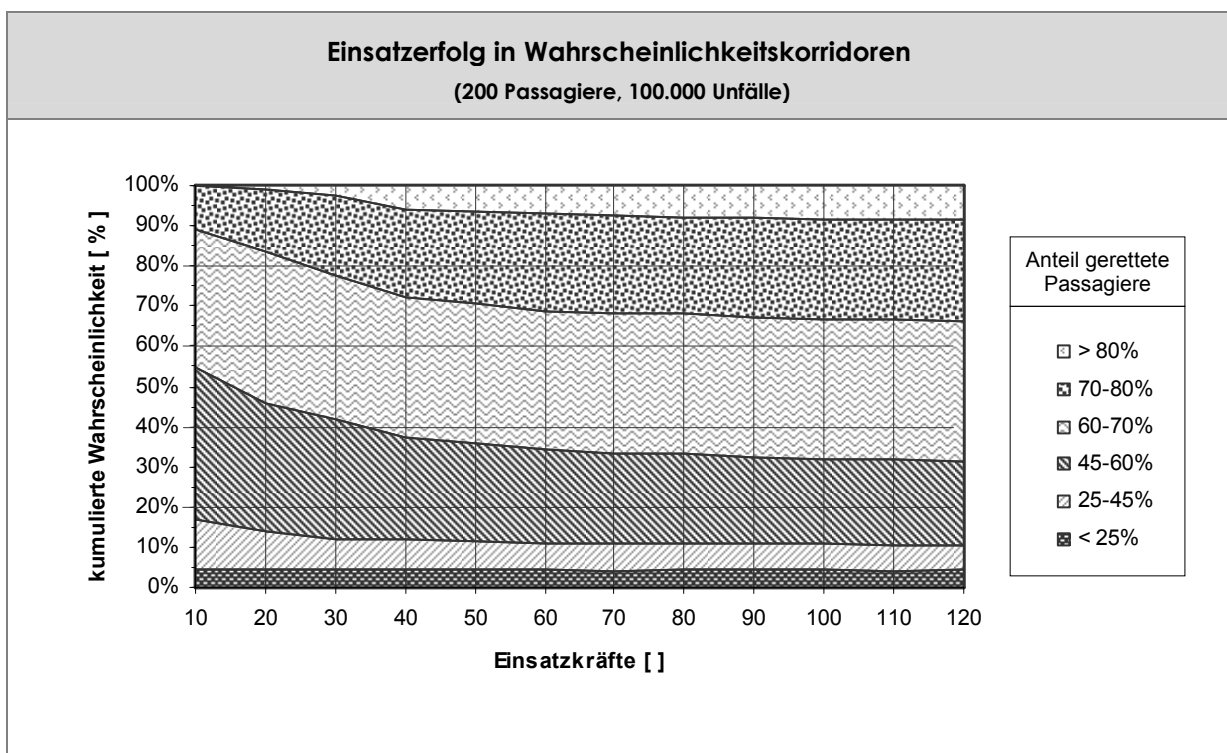


Abbildung 71: Einsatzerfolg in Wahrscheinlichkeitskorridoren

Die Ergebnisse dieser exemplarisch durchgeführten Berechnung zeigen eine recht schlüssige Tendenz auf. Es sei an dieser Stelle explizit darauf hingewiesen, dass die Ergebnisse keine allgemeingültige Aussagen beinhalten, sondern die Auswertung eines einzelnen konkreten Bemessungsfalles (hier: 4-türiges Flugzeug, 200 Passagiere) darstellen. Eine abschließende Bewertung der verwendeten Methodik findet in Kapitel 6.3 statt.

6. Ergebnisse

6.2 Verifizierung der Ergebnisse

Vor einer Interpretation der Daten erfolgt an dieser Stelle zunächst die Verifizierung der Ergebnisse. Sie besteht aus drei Teilen:

- Die Prüfung der Eingangsparameter sowie der Annahmen, die der Simulation zugrunde liegen, obliegt dem jeweiligen Leser. Erachtet dieser die in Kapitel 4 dargestellte Systematik und die in Kapitel 5 beschriebenen Modellannahmen als realistisch, so liegt die wesentliche Voraussetzung für die Akzeptanz der erzielten Ergebnisse vor.
- Die Prüfung der in Kapitel 6.1 dargestellten Ergebnisse erfolgt mit einer rechnerischen Abschätzung. Ziel ist es, festzustellen, ob die erlangten Werte in einer Größenordnung liegen, die plausibel ist.
- In der dritten Stufe der Prüfung werden Berechnungen mit verschiedenen Programmvarianten durchgeführt. Diese unterscheiden sich in den zugrunde liegenden Rechenmodellen. Hiermit wird überprüft, wie stark Variationen in den mathematischen Modellen Einfluss auf das Gesamtergebnis haben. Ziel ist es, eine überproportionale Gewichtung eines einzelnen Faktors zu vermeiden und Wechselwirkungen realitätsnah mathematisch zu beschreiben.

6.2.1 Verifizierung mittels rechnerischer Abschätzung

An dem Beispiel eines Flugzeugunfalls ohne „Feuer und Rauch“ auch sowie mit 200 Passagieren und einer durchschnittlichen Verletzungsverteilung lässt sich aufzeigen, warum sich die Zahlen für den Einsatzerfolg trotz massiver Veränderung der Einsatzkräfte nur gering verändern.

Passagiere, die das Flugzeug selbstständig verlassen können								
Verletzungsmuster	Passagiere (n = 200) []	Gehunfähige Passagiere			Tote		Gehfähige Passagiere	
		Quote *1 [%]	Anzahl []	Anteil *2 [%]	Anzahl []	Anteil *2 [%]	Anzahl []	Anteil *2 [%]
tot	50	100%	---	---	50,00	25,0%	---	---
akut vital verletzt	30	75%	22,50	11,3%	---	---	7,50	3,8%
schwer verletzt	45	30%	13,50	6,8%	---	---	31,50	15,8%
un-/leicht verletzt	75	5%	3,75	1,9%	---	---	71,25	35,6%
Summe	200	---	39,75	19,9%	50,00	25,0%	110,25	55,1%

Tabelle 34: Passagiere, die das Flugzeug selbstständig verlassen können

6. Ergebnisse

*1 Anteil der gehunfähigen Passagiere je Verletzungsmuster gemäß Tabelle 17

*2 Anteil an der Gesamtanzahl an Passagieren

Gemäß der Verletzungsverteilung nach Abbildung 37 überleben durchschnittlich 75% der Passagiere einen Flugzeugunfall. Der Anteil der Passagiere, die aufgrund von Verletzungen oder Zwangslagen das Flugzeug nicht selbstständig verlassen können, beträgt insgesamt 19,9%. Die Herleitung dieser Zahl ist der Tabelle 34 zu entnehmen. Der Anteil der Passagiere, die un-/leicht verletzt geblieben sind oder die trotz Verletzungen und Schmerzen aus eigener Kraft bis zum Sammelplatz kommen, beträgt in dieser Modellrechnung 55,1%.

Die leicht verletzten und unverletzten Passagiere, die sich in einer Zwangslage befinden („eingeklemmt“) sowie die weniger kritische Hälfte der schwer Verletzten, deren Gesundheitszustand in der ersten Stunde stabil bleibt, können in der Regel auch mit einer geringen Anzahl an Einsatzkräften gerettet werden. Ihr Anteil beträgt 5,3% ($= 1,9\% + \frac{1}{2} \cdot 6,8\%$). Zusammen mit den Personen, die das Flugzeug selbstständig verlassen können (55,1%), ergibt sich ein rechnerischer Wert von 60,4% der Passagiere, die einen Flugzeugunfall ohne Brandereignis mindestens überleben, auch für den Fall dass nicht sofort Hilfe zur Verfügung steht. Dieser Wert bildet die „natürliche“ untere Grenze des durchschnittlichen Einsatzerfolges.

Geht man davon aus, dass für die Hälfte der akut vital verletzten gehunfähigen Personen ($5,6\% = \frac{1}{2} \cdot 11,3\%$) jede Hilfe zu spät kommt, verbleibt noch ein Anteil von 9,0% ($= 5,6\% + \frac{1}{2} \cdot 6,8\%$) der Passagiere, die von den Folgen ihrer Verletzungen bedroht und gleichzeitig auf Rettung von außen angewiesen sind. Dies entspricht in etwa auch demjenigen Anteil, um den sich der Einsatzerfolg bei den unterschiedlichen Personalzahlen unterscheidet.

Diese Überschlagsrechnung erklärt recht anschaulich, warum der Einsatzerfolg bereits mit der niedrigsten Personalanzahl (10 Einsatzkräfte) bei etwa 55% liegt. Die ermittelte Zahl von 60,4% ist dennoch leicht überhöht. Hier ist nicht berücksichtigt, dass Passagiere auch durch Feuer und Rauch sowie bei Panik zu Schaden kommen können und dass die Überlebenschancen bis zum Einsetzen der medizinischen Versorgung kontinuierlich absinkt. Es sei an dieser Stelle noch einmal explizit darauf hingewiesen, dass es sich hierbei nur um eine Überschlagsrechnung auf Basis von Durchschnittswerten handelt, die dazu dienen, die Größenordnung der Ergebnisse zu verifizieren. Die große Stärke einer computergestützten Simulation, nämlich die Möglichkeit, eine Vielzahl sehr unterschiedlicher Szenarien berücksichtigen zu können, und deren Notwendigkeit für eine fundierte wissenschaftliche Aussage werden dadurch nicht in Frage gestellt.

6. Ergebnisse

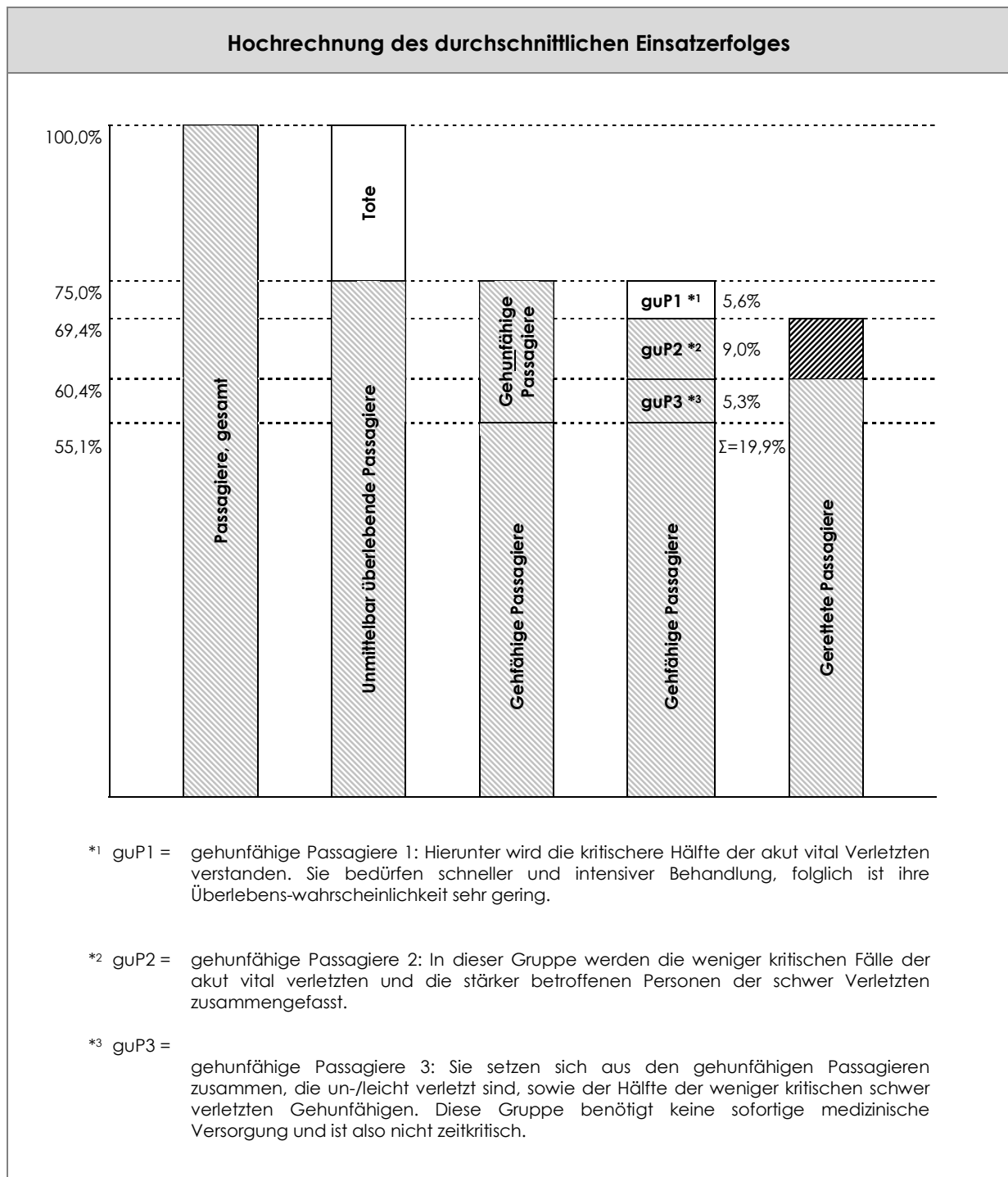


Abbildung 72: Hochrechnung des durchschnittlichen Einsatzerfolges

6. Ergebnisse

6.2.2 Verifizierung mittels Variation der Rechenmodelle

Die Variation der Rechenmodelle dient dazu, mathematische Zusammenhänge und die Gewichtung von Rechenparametern zu überprüfen, um Faktoren, die möglicherweise überproportionalen Einfluss auf das Gesamtergebnis haben, zu identifizieren und somit zu vermeiden, dass andere Zusammenhänge und Berechnungen überlagert werden. Dabei müssen vor allem Funktionen und Größen analysiert werden, die einen sehr direkten Einfluss auf die Ergebnisse haben und für die zugleich wenige Erfahrungswerte aus bisherigen Flugzeugunfällen vorliegen. Auf zwei Faktoren treffen diese Kriterien in besonderem Maße zu:

- **Leistungsminderung**

Eine entscheidende Plausibilitätsprüfung ist für die Leistungsminderung der Einsatzkräfte erforderlich. Ursachen für die Verringerung des Leistungsvermögens können Erschöpfung sowie wechselseitige Behinderung im Flugzeuginneren infolge der beengten Raumverhältnisse sein. Da eine Minderung des Leistungsvermögens der Einsatzkräfte direkt und in erheblichem Maße Einfluss auf den Einsatzerfolg hat, ist hier zu untersuchen, ob die zugrunde liegenden Werte realistisch angenommen wurden oder ob deren Einfluss auf die Ergebnisse überproportional stark ist.

- **Externe Einsatzkräfte**

Bei Flugzeugunfällen erfolgt i. d. R. eine Unterstützung durch externe Einsatzkräfte. Werden nach einem Flugzeugunfall die benachbarten Gefahrenabwehrorganisationen alarmiert, trifft nach einer Vorlaufzeit eine große Zahl an Einsatzkräften nahezu zeitgleich an der Einsatzstelle ein, die die Personalstärke der internen Einsatzkräfte leicht um ein Vielfaches übersteigt. Für die Simulation müssen zwei Aspekte überprüft werden. Erstens muss sichergestellt sein, dass die Anzahl der internen Einsatzkräfte, auf denen der Fokus dieser Arbeit liegt, im Rechenmodell nicht durch die externen Einsatzkräfte zu einem irrelevanten Parameter reduziert werden und die Untersuchung ihrer schrittweisen Erhöhung ohne Aussagekraft bleibt. Ist diese Forderung erfüllt, muss darüber hinaus zweitens überprüft werden, ob die Wahl der Anzahl der externen Einsatzkräfte zu stark unterschiedlichen Ergebnissen führt.

Zuerst wird die modellierte Leistungsminderung der Einsatzkräfte auf Plausibilität untersucht die. Dazu werden die vier folgenden Vergleichsrechnungen durchgeführt und in Abbildung 73 dargestellt:

1. Keine Berücksichtigung von Behinderung und Erschöpfung.
2. Berücksichtigung von Behinderung und Erschöpfung bei einer maximalen Leistungsminderung um 40% (daraus folgt ein unteres Leistungsvermögen von mindestens 60%).
3. Berücksichtigung von Behinderung und Erschöpfung bei einer maximalen Leistungsminderung um 95% (daraus folgt ein unteres Leistungsvermögen von mindestens 5%) ohne Begrenzung der Anzahl der Trupps im Innenangriff.

6. Ergebnisse

4. Berücksichtigung von Behinderung und Erschöpfung bei einer maximalen Leistungsminderung um 95% (daraus folgt ein unteres Leistungsvermögen von mindestens 5%), mit Begrenzung der Anzahl der Trupps im Innenangriff (nur drei Trupps je Flugzeugtür, die übrigen bilden eine Reserve und lösen wechselseitig die erschöpften Trupps ab).

Die vier beschriebenen Varianten führen zu folgenden Ergebnissen:

- Alle Kurven weisen einen ähnlichen Verlauf auf, wie er bereits auch bei den vorherigen Kurven zu beobachten war. Die Steigung verringert sich immer mehr („quasi stetig“), bis die Kurven schließlich näherungsweise parallel zur X-Achse verlaufen.
- Die Kurven liegen zunächst relativ dicht zusammen und fächern sich ab einer Einsatzkräfteanzahl von 70 bis 100 leicht auf. Danach verlaufen sie mit weitestgehend ähnlichen Abständen zueinander.
- Die obere Grenze wird erwartungsgemäß von derjenigen Kurve gebildet, die Erschöpfung und Behinderung nicht berücksichtigt (Kurve 1). Sie verläuft ab einer Einsatzkräfteanzahl von 100 im Mittel bei 62,5%.
- Die untere Grenze des Einsatzerfolges wird wechselseitig von den beiden Kurven mit einer Leistungsminderung um 95% (und der unteren Leistungsgrenze von 5%) gebildet (Kurven 3 und 4). Sie bewegen sich ab 80 Einsatzkräften im Mittel in einem Korridor zwischen 61,5% und 62%. Ein mögliches Absinken der Leistung auf 5% des normalen Leistungsvermögens bedeutet quasi einen vollständigen Ausfall einzelner Einsatzkräfte. Dies ist das ungünstigste Rechenmodell und dient dazu, die untere Grenze in Abhängigkeit vom Parameter „Leistungsvermögen“ zu ermitteln. Eine Betrachtung der Kurven 3 und 4 zeigt zudem, dass sich selbst bei einer unteren Leistungsgrenze von 5% oberhalb von 120 Einsatzkräften durch eine weitere Erhöhung der Einsatzkräfteanzahl keine Steigerung des Einsatzerfolges erzielen lässt. Dies gilt sowohl für die Berechnungsvariante mit begrenzter Anzahl an Angriffstrupps mit Reservenbildung (Kurve 4) wie auch für Variante mit steigender Anzahl an Angriffstrupps (Kurve 3).
- Kurve 2 mit der maximalen Leistungsminderung um 40% befindet sich dazwischen. Sie liegt im Mittel nur 0,5 Prozentpunkte unterhalb der Kurve ohne Leistungsminderung.
- Auffallend ist die insgesamt die geringe Differenz zwischen der oberen Grenze (Kurve 1) und der unteren (Kurven 3 und 4) von maximal 1,5 Prozentpunkten und durchschnittlich 0,8 Prozentpunkten.

6. Ergebnisse

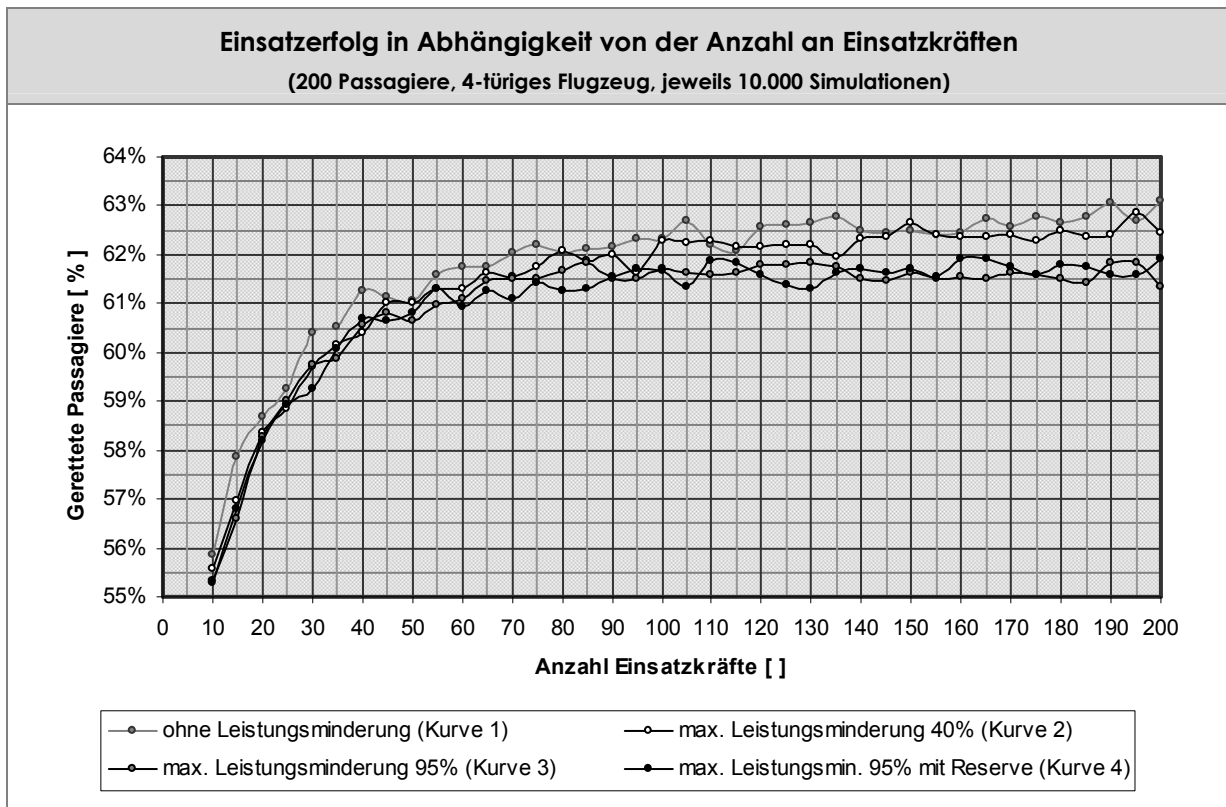


Abbildung 73: Einsatzenerfolg in Abhängigkeit von der Anzahl an Einsatzkräften

Als weiterer Schritt der Plausibilitätsprüfung wird eine Beispielrechnung für Kurve 4 durchgeführt. Hierbei liegen folgende Überlegungen zugrunde:

- Bei einem 4-türigen Flugzeug mit zwei Gängen (eine Wahrscheinlichkeit für das Öffnen einer Tür von 85% führt zu einem Erwartungswert von ca. 7 Türen) ergibt sich eine Anzahl von 42 Angriffstrupps, wenn drei Trupps je Tür und Gang eingesetzt werden. Bei zwei Mann pro Trupp werden für die Angriffstrupps also 84 (= 7 Türen x 2 Gänge x 3 Trupps x 2 MA) Einsatzkräfte benötigt.
- Bei einer Anzahl von fünf Flughafenlöschfahrzeugen mit einer Besatzung von jeweils zwei Mann sind nochmals 10 Einsatzkräfte eingesetzt, in der Summe mit den Angriffstrupps zusammen also 94 Einsatzkräfte.
- Wird ein rechnerischer Führungsfaktor von 3,5 berücksichtigt, wie er der durchgeführten Berechnung zugrunde liegt (Kapitel 5.2.2.2), ergibt sich durch Umformen der Gleichung (21) eine Anzahl von insgesamt 131 (= 94 : 0,7143 = 131,43) Einsatzkräften.
- Weitere zusätzliche Einsatzkräfte gehen nicht mehr direkt in den Innenangriff, sondern stehen als Reserve bereit, um erschöpfte Trupps abzulösen. Eine Steigerung des Einsatzenerfolges kann dann nur in dem Maße stattfinden, in dem sich die Leistungsfähigkeit der ablösenden und der abzulösenden Einsatzkräfte signifikant voneinander unterscheiden.

6. Ergebnisse

Folgende Schlüsse lassen sich nun ziehen:

- Die Faktoren Erschöpfung und Behinderung sind demnach nicht die entscheidenden Größen in der Berechnung des Einsatzerfolgs. Der Unterschied zwischen der Kurve 1 (keine Leistungsminderung) und den Kurven 3 und 4 (maximale Leistungsminderung 95%) fällt mit 1,5 Prozentpunkten relativ gering aus. Die Kurve 2 (maximale Leistungsminderung 40%) liegt, wie bereits erwähnt, dazwischen.
- Die Schlussfolgerung, eine untere Leistungsgrenze von 60%, die sich aus den Faktoren Erschöpfung, gegenseitige Behinderung im Flugzeug und Erschwernissen infolge der äußeren Rahmenbedingungen (z. B. Wetter) ergibt, als eine (ausreichend) gute Annäherung an die Realität zu erachten, ist demnach naheliegend. Dieser Wert kann folglich für künftige Anwendungen beibehalten werden. Er liegt auch den Ergebnissen aus Kapitel 6.1 zugrunde.
- Zwar nimmt die Häufigkeit von gegenseitigen Behinderungen mit steigender Personalzahl exponentiell zu (Abbildung 48), da mit mehr Einsatzkräften im Flugzeuginneren die Anzahl an Begegnungen zwischen den einzelnen Trupps überproportional steigt, trotzdem kommt es bei sehr hohen Personalzahlen (zwischen 100 und 200 Einsatzkräften) nicht zu einem Absinken des Einsatzerfolgs. Dies wäre als Folge gegenseitiger Selbstbehinderung der Einsatzkräfte im Flugzeuginneren (bis hin zur Selbstblockade) zu erwarten gewesen. Da der Zugang ins Flugzeug durch die Anzahl der Türen beschränkt ist (nur ein Trupp kann jeweils über eine Rutsche zu einer Tür und somit ins Flugzeuginnere gelangen), entzerrt sich der Einsatzabschnitt Flugzeugkabine. Eine Selbstblockade der Einsatzkräfte ist somit nahezu ausgeschlossen.
- Betrachtet man die Kurven 1 bis 4 vor dem Hintergrund oben genannter Überlegung, so stellt man fest, dass ab einer Personalstärke von ungefähr 120 Einsatzkräften (im vorliegenden Beispiel) keine Veränderung des Einsatzerfolgs mehr stattfindet. Dieser Wert entspricht fast der oben genannten Zahl von 131 Einsatzkräften, die mit dem Ansatz von 3 Trupps pro Tür und Gang ermittelt wurde.

Eine weitere Überlegung bezieht sich wie angekündigt auf die externen Einsatzkräfte. In der Computersimulation ist eine Option implementiert, die eine Verstärkung der internen Einsatzkräfte nach 25:00 Minuten nach Unfälleintritt durch externe Kräfte vorsieht. Hier ist zu prüfen, ob das Eintreffen einer großen Anzahl an zusätzlichen externen Einsatzkräften (die die Zahl an internen i. d. R. deutlich übersteigt) nicht die Ergebnisse überlagert und die Betrachtung mit einer stetig steigenden Einsatzkräfteanzahl (intern) ad absurdum führt. Des Weiteren ist zu klären, wie groß der Einfluss ist, der von der Wahl der externen Personalstärke ausgeht. Hierzu wird die Simulation mit drei Varianten durchgeführt:

1. Standardberechnung ohne externe Einsatzkräfte (wie zuvor beschrieben und ausgewertet)
2. 100 externe Einsatzkräfte treffen zusätzlich nach 25:00 Minuten ein
3. 240 externe Einsatzkräfte treffen zusätzlich nach 25:00 Minuten ein

6. Ergebnisse

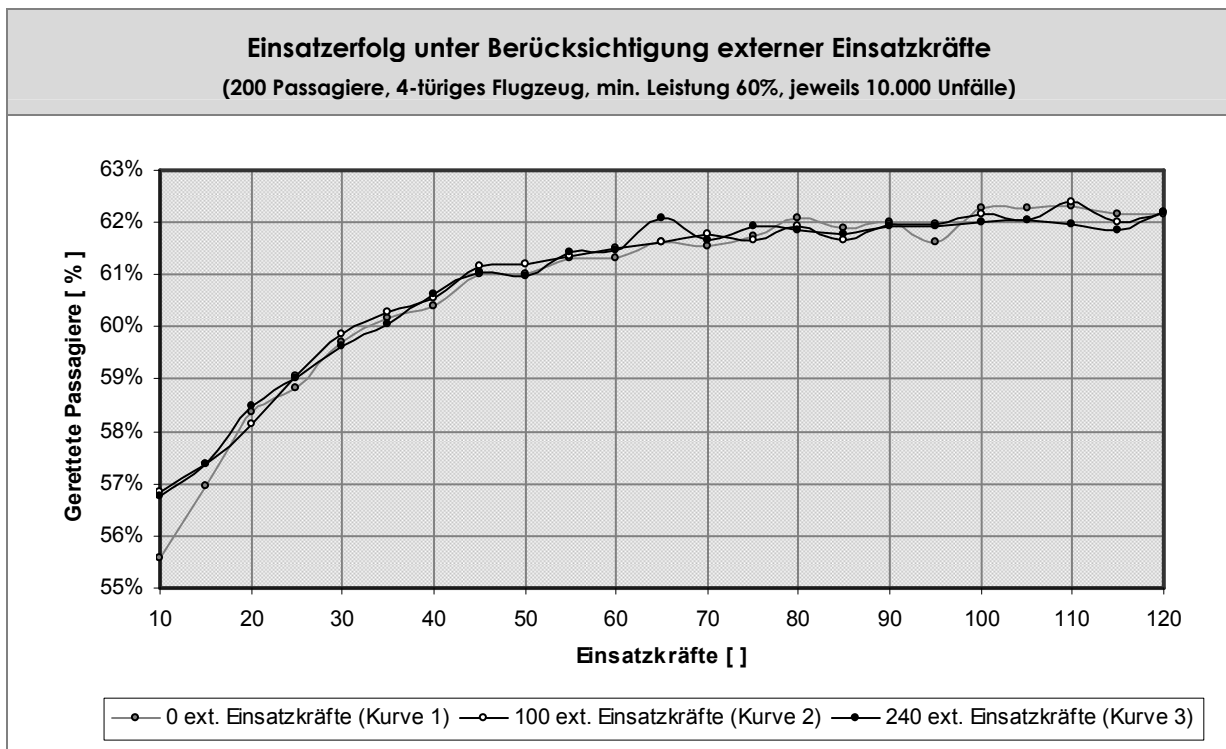


Abbildung 74: Einsatzenerfolg unter Berücksichtigung externer Einsatzkräfte

Die Ergebnisse der drei Varianten sind in Abbildung 74 dargestellt und lassen sich wie folgt beschreiben:

- Zwischen den Kurven 2 und 3 (mit 100 bzw. 240 externen Einsatzkräften) lässt sich kein signifikanter Unterschied feststellen. Die beiden Kurven verlaufen sehr dicht beieinander. Die ohnehin sehr geringen Abweichungen voneinander resultieren aus statistischen Schwankungen aufgrund der gewählten Anzahl an rechnerischen Durchläufen ($n = 10.000$).
- Lediglich bei sehr geringen Anzahlen an (internen) Einsatzkräften kommt es zu einer merklichen Verbesserung des Einsatzenerfolges. Bei 10 Einsatzkräften erhöht sich der Einsatzenerfolg um knapp 1,5 Prozentpunkte, bei 15 Einsatzkräften noch um ca. 0,5 Prozentpunkte. Darüber hinaus kann kein signifikanter Unterschied festgestellt werden.

Es ist zu überprüfen, ob dieses Ergebnis als glaubhaft angesehen werden kann, da man üblicherweise davon ausgeht, dass eine große Anzahl zusätzlicher Einsatzkräfte einen erkennbar positiven Einfluss auf den Einsatzenerfolg hat. Hierzu wird mit Hilfe einer Hochrechnung, die auf Durchschnittswerten basiert, eine Plausibilitätsprüfung durchgeführt:

Wie der Abbildung 72 zu entnehmen ist, sind 19,9% der Passagiere nach einem Unfall nicht mehr in der Lage, sich selbst fortzubewegen. Bei einer Gesamtanzahl von 200 Passagieren entspricht dies in etwa 40 Personen.

6. Ergebnisse

Aus der rechnerischen Gesamtzeit (Tabelle 35) zur Rettung aller gehunfähigen Passagiere dividiert durch die Anzahl der Passagiere ergibt sich eine durchschnittliche Rettungszeit von 21:48 Minuten (im Dezimalsystem: 21,8 Minuten) pro Passagier:

$$\text{mittlere Rettungszeit} = \frac{\text{kum. Rettungszeit}}{\text{Summe Passagiere, gehunfähig}} \quad (52)$$

ergibt:

$$\frac{865,88 \text{ Minuten}}{39,75 \text{ Passagiere, gehunfähig}} = 21,8 \text{ Minuten pro Passagiere (= 21:48 Minuten)}$$

Auch hier muss betont werden, dass es sich um einen Durchschnittswert handelt. Während die Rettung eines Leichtverletzten nur 9:30 Minuten (9,5 min) dauert, wird bei akut vital Verletzten mit 27:00 Minuten rein rechnerisch mehr als das Doppelte an Zeit benötigt (Tabelle 35), was unter anderem durch die erforderliche Sofortbehandlung und die medizinische Stabilisierung für den Transport begründet ist.

Gesamtzeitbedarf zur Rettung gehunfähiger Passagiere (200 Passagiere, 4-türiges Flugzeug)								
Verletzungsmuster	Passagiere (n = 200)	Gehunfähige Passagiere		durchschnittliche Rettungszeiten pro Passagiere				kumulierte Rettungszeit [min]
		Anteil *1 [%]	Absolut []	Zugang + Auffinden [min]	Befreiung + Versorgung *2 [min]	Transport [min]	gesamt [min]	
tot	50	---	---	---	---	---	---	---
akut vital verletzt	30	x 75% =	22,50	3,0 +	21,0 +	3,0 =	27,0	607,50
schwer verletzt	45	x 30% =	13,50	3,0 +	10,5 +	3,0 =	16,5	222,75
un-/leicht verletzt	75	x 5% =	3,75	3,0 +	3,5 +	3,0 =	9,5	35,63
Summe	200	---	39,75	---	---	---	---	865,88

Tabelle 35: Gesamtzeitbedarf zur Rettung gehunfähiger Passagiere

*1 Anteil der gehunfähigen Passagiere je Verletzungsmuster gemäß Tabelle 17

*2 Medizinische Erstversorgung im Flugzeug und ggf. Befreiung aus einer Zwangslage. Die verwendeten (Durchschnitts-) Werte basieren auf Abbildung 42.

6. Ergebnisse

Zwischen dem Betreten des Flugzeugs (Annahme: 2:30 Minuten nach der Alarmierung) und dem Eintreffen externer Einsatzkräfte nach 25:00 Minuten liegt eine Zeitspanne von 22:30 Minuten. Auf Basis dieses Wertes lässt sich eine Abschätzung vornehmen, wie viele zu rettende Passagiere sich noch im Flugzeug befinden, wenn die externen Einsatzkräfte eintreffen. Die akut vital Verletzten machen unter den Gehunfähigen gemäß Tabelle 34 einen Anteil von 56,6% (= 11,3% : 19,9%) aus. Da die Überlebenschance der akut vital verletzten Passagiere im Modell zum Zeitpunkt $t = 30:00$ Minuten gegen Null strebt, reduziert sich die Zahl der noch im Flugzeug befindlichen Personen, die einer Rettung bedürfen, bis zum Vordringen der externen Einsatzkräfte zu den Passagieren im Flugzeug (25:00 Minuten Anmarsch + einige Minuten Angriffszeit) nochmals um die bisher unversorgten akut vital Verletzten, die bis zu diesem Zeitpunkt i. d. R. fast vollständig verstorben sind.

Gehunfähige Passagiere im Flugzeug bei Eintreffen externer Einsatzkräfte *1				
Interne Einsatzkräfte	15	30	45	60
Trupps im Innenangriff (interne Einsatzkräfte)	3	8	13	19
Gehunfähige Passagiere im LFZ	39,8	39,8	39,8	39,8
Gerettete Passagiere 25:00 min nach dem Unfall	3,1	8,3	13,4	19,6
Noch im LFZ befindliche Passagiere	36,7	31,5	26,4	20,2
Akut vital Verletzte, die im LFZ versterben (56,6%)	20,8	17,9	14,9	11,4
Gehunfähige Passagiere im LFZ nach 25:00 Minuten	15,9	13,7	11,4	8,8

Tabelle 36: Gehunfähige Passagiere im Flugzeug bei Eintreffen externer

*1 Da es sich um eine Hochrechnung mit Durchschnittswerten handelt, können die Passagierzahlen hier als Dezimalwerte angegeben werden.

Betrachtet man die Lage bei Eintreffen einer größeren Anzahl (hier: 100 und 240) an externen Einsatzkräften 25:00 Minuten nach dem Unfallereignis, ergibt sich folgendes Bild:

- Bei 15 internen Einsatzkräften stehen nur 3 interne Trupps zur Verfügung und es befinden sich noch ca. 16 (15,9) Passagiere im Flugzeug. Diese Passagiere können nun mit Unterstützung der externen Einsatzkräfte möglichst schnell gerettet und einer medizinischen Versorgung zugeführt werden, bevor sich ihr gesundheitlicher Zustand weiter verschlechtert. Ohne die Anzahl der externen Einsatzkräfte genau zu beziffern werden diese den größten Teil der noch im Flugzeug befindlichen Passagiere retten, da die internen Einsatzkräfte weiterhin nur über 3 Trupps verfügen und folglich nicht mehr als 3 Passagier zeitgleich retten können.

6. Ergebnisse

- Bei 30 internen Einsatzkräften befinden sich noch ca. 14 (13,7) Passagiere im Flugzeug. Da die internen Einsatzkräfte über 8 Trupps verfügen, werden die noch verbliebenen Passagiere bereits zur größeren Hälfte von internen Einsatzkräften gerettet. Der Einfluss der externen Einsatzkräfte am gesamten Einsatzerfolg ist hier mit 6 geretteten Passagieren schon sehr begrenzt.
- Bei 45 internen Einsatzkräften können alle Passagiere durch diese gerettet werden, da nach 25:00 Minuten 13 Trupps zur Verfügung stehen, um die noch im Flugzeug verbliebenen lebenden Passagiere (11,4 Personen) zu retten. Die externen Einsatzkräfte sind hier für die reine Menschenrettung quasi nicht mehr erforderlich.
- Bei 60 internen Einsatzkräften stellt sich das Bild ähnlich dar wie bereits bei 45 internen Einsatzkräften. Die externen Einsatzkräfte können keinen entscheidenden Beitrag mehr zur Rettung der Passagiere leisten.

Eine Rettung von gehunfähigen Passagieren durch externe Einsatzkräfte bedeutet ausdrücklich nicht, dass die Passagiere ohne externe Kräfte nicht gerettet worden wären. Lediglich der Zeitpunkt, an dem sie einer medizinischen Versorgung zugeführt werden, tritt früher ein und die Überlebenschancen erhöhen sich dadurch. Für das Rechenbeispiel mit 30 Einsatzkräften bedeutet dies, dass der zusätzliche Einsatz externer Kräfte lediglich dazu führt, dass 6 Passagiere (von insgesamt 200) ca. 14 Minuten früher medizinisch versorgt werden. Daher ist der positive Einfluss externer Einsatzkräfte bei der Betrachtung des gesamten Einsatzerfolges nur bei geringen Personalstärken festzustellen und auch hier in einem wesentlich geringeren Maße als ursprünglich vermutet. Bei 10 und 15 Einsatzkräften lässt sich bezüglich des Einsatzerfolges ein Unterschied von etwa 1 Prozentpunkt erkennen (Abbildung 74). Ab ca. 20 internen Einsatzkräften verringert sich der Vorteil der externen Einsatzkräfte zunehmend. Durchaus anders könnte das Ergebnis ausfallen, wenn in speziellen Einsatzlagen große Teile der Passagiere gehunfähig sind. Dies wäre der Fall, wenn z. B. das Flugzeug auf dem Dach zum Liegen kommt („Turnover“) oder viele Passagiere infolge einer Brandrauchintoxikation das Bewusstsein verloren haben.

Diese Abschätzung erfolgt lediglich anhand von Durchschnittswerten. Viele Faktoren, die in der Simulation mathematisch modelliert sind (z. B. Brandrauch, räumliche Enge im Flugzeug, Erschöpfung der Einsatzkräfte), werden bei dieser Übersichtsrechnung der Einfachheit halber nicht berücksichtigt. Auch wenn die externen Einsatzkräfte - wie aufgezeigt - keinen direkten maßgeblichen Einfluss auf den Einsatzerfolg haben, so sind sie für die Bewältigung eines Einsatzes in seinem gesamten Ausmaß (modelliert und simuliert wurde nur die reine Rettung aus dem Flugzeug) unentbehrlich. Sie leisten Unterstützung beim Betrieb des Behandlungsplatzes und beim Verletzentransport. Daneben können sie Nachlöscharbeiten, Logistikaufgaben oder Dekontaminationsmaßnahmen durchführen. Sie sind vor allem erforderlich, um den allgemeinen Brandschutz und die technische Unfallhilfe im Zuständigkeitsbereich der Flughafenfeuerwehr ersatzweise sicherzustellen. Von großer Bedeutung ist vor allem die Erkenntnis, dass die Ergebnisse der Simulation nicht durch eine große Anzahl an externen Einsatzkräften überlagert werden, sondern deren rechnerische Modellierung realitätsnah erfolgte.

6. Ergebnisse

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die rechnerischen Annahmen glaubhaft sind und eine realistische Darstellung der Abläufe bei einem Flugzeugunfall wiedergeben. Folglich können die Ergebnisse aus der Simulation als Grundlage für Risikobetrachtungen und somit für Planungsvorgänge und Entscheidungen verwendet werden.

6.3 Schlussbetrachtung

Zur Bearbeitung der vorliegenden Fragestellung wurde eine spezielle Variante der Risikoanalyse entwickelt, die eine Aussage über den Einfluss der Einsatzkräfteanzahl auf die Sicherheit der Passagiere bei Flugzeugunfällen treffen kann. Für den konkreten Fall eines 4-türigen Flugzeugs mit 200 Passagieren wurden exemplarisch alle im Rahmen dieses Risikoanalysemodells anfallenden Berechnungen durchgeführt sowie die Ergebnisse diskutiert (Kapitel 6.1 und 6.2).

Die Ergebnisse des konkreten exemplarischen Rechenbeispiels unter den genannten Rahmenbedingungen erweisen sich als sehr eindeutig:

- Zunächst wird deutlich, dass der Einfluss der Einsatzkräfteanzahl auf den Einsatzerfolg ab einem gewissen (erstaunlich niedrigen) Schwellenwert relativ gering ist. Selbst eine Steigerung der Einsatzkräfte von 10 um 90 auf 100 (also auf 1.000% des Ausgangswertes!) hebt den Einsatzerfolg lediglich um 7 Prozentpunkte an (Abbildung 65). Im Umkehrschluss bedeutet dies, dass (bezogen auf die Basis von 10 Einsatzkräften) für jedes zusätzliche Prozent an Einsatzerfolg durchschnittlich eine Steigerung der Einsatzkräfte um mehr als 100% notwendig ist (Abbildung 68). Hier weist der Zusammenhang von Einsatzkräfteanzahl und Einsatzerfolg eine deutliche Analogie zu technischen Einrichtungen auf: Eine massive Erhöhung bzw. Vervielfachung der Personalmenge führt ebenso wie jedes zusätzliche redundante System lediglich zu einem minimalen Sicherheitszuwachs bei einer gleichzeitigen massiven Erhöhung der Kosten.
- Des Weiteren lässt sich festhalten, dass die zusätzlichen externen Einsatzkräfte ohne signifikante Wirkung bleiben, selbst wenn sie bereits 25:00 Minuten nach Unfalleintritt an der Einsatzstelle eintreffen. Für die Rettung der verunfallten Flugzeuginsassen aus dem Flugzeug sind sie nahezu bedeutungslos, da bis zu ihrem aktiven Eingreifen die Passagiere der Verletzungsklasse S1 (akut vital verletzt) bereits gerettet oder verstorben sind. Zur Rettung der verbleibenden Passagiere reicht die Leistungsfähigkeit der eigenen internen Einsatzkräfte weitestgehend aus. Diese Aussage kann konkret nur für das gewählte Unfallszenario (4-türige Maschine, 200 Passagiere) getroffen werden. Erhöht sich jedoch das Verhältnis von Passagieren zu internen Einsatzkräften merklich, dürften die externen Einsatzkräfte an Bedeutung gewinnen.
- In der Praxis sind die externen Kräfte ohnehin unverzichtbar, da sie u. a. die medizinische Versorgung unterstützen und die Aufrechterhaltung der sonstigen (nichtpolizeilichen) Gefahrenabwehr außerhalb der Einsatzstelle gewährleisten.

6. Ergebnisse

Bei aller Eindeutigkeit der vorliegenden Ergebnisse der exemplarischen Beispielrechnungen sind an dieser Stelle jedoch zwei Hinweise ausdrücklich von Bedeutung, die sich auf die Verallgemeinerung der Resultate aus der Computersimulation und deren Interpretation im Allgemeinen beziehen:

- Den errechneten Werten liegen definierte Rahmenbedingungen zugrunde. Im vorliegenden Fall sind dies (neben allen Modellen und rechnerischen Annahmen) die Passagieranzahl und das Flugzeugmuster. Werden diese beiden zentralen Eingangsgrößen geändert, können die Ergebnisse deutlich von den hier beschriebenen abweichen.
- Für kein Szenario wird als Ergebnis eine Zahl an geretteten Flugzeuginsassen angegeben, die tatsächlich genau so eintreten wird. Hierzu ist das Ereignis Flugzeugunfall viel zu komplex. Die Abhängigkeiten zwischen den einzelnen Parametern lassen sich nur näherungsweise durch mathematische Funktionen wiedergeben. Außerdem sind die Einflüsse der Parameter untereinander sehr vielschichtig. In dieser Hinsicht ähnelt die vorliegende Problematik sehr derjenigen von Wettervorhersagen. Auch dort lässt sich aufgrund der Komplexität des Phänomens Wetter keine absolut wahre Aussage treffen, wohl aber eine hinreichend genaue Abschätzung der (grob) zu erwartenden Wetterlage. Obwohl diese Vorhersage stets mit gewissen Ungenauigkeiten behaftet ist, stellt sie in der Summe dennoch eine anerkannte Grundlage für Entscheidungen dar. Für den vorliegenden Fall „Flugzeugunfall“ wird demnach analog zur Wettervorhersageproblematik eine deutliche und wahrscheinlich Tendenz des Zusammenhangs von Einsatzkräfteanzahl und Einsatzserfolg angegeben, keinesfalls aber eine genaue Vorwegnahme eines Einzelereignisses mit einer Eintrittswahrscheinlichkeit von 100%.

Abgesehen von der Plausibilität der Ergebnisse der obigen Rechenbeispiele liegt darüber hinaus die wesentlich bedeutsamere Erkenntnis dieser Arbeit in der Tatsache, dass ein neues methodisches Werkzeug seine Tauglichkeit unter Beweis gestellt hat. Die Verifizierung der Ergebnisse mit Hilfe von differenzierten Betrachtungen und Fallunterscheidungen (Kapitel 6.2) lassen den Schluss zu, dass die kybernetische Risikoanalyse eine zuverlässige Methode darstellt, mit deren Hilfe sich objektive, nachvollziehbare und damit letztlich praxistaugliche Werte ermitteln lassen. Zwar ist der exakte Verlauf eines (zukünftigen) Unfalls nicht vorhersagbar, die wesentlichen Einflussfaktoren lassen sich jedoch benennen, ihre Wahrscheinlichkeitsverteilungen abschätzen sowie Abläufe und Wechselwirkungen abbilden. Durch die Kombination dieser Erkenntnisse lässt sich der Zusammenhang zwischen Einsatzkräften und Einsatzserfolg sachlich-mathematisch und realitätsnah darstellen.

Die mit Vorliegen dieser Arbeit sichergestellte Verfügbarkeit dieses „sachlich-mathematisch“ tauglichen Werkzeuges zur Quantifizierung des Zusammenhangs zwischen der Anzahl der Einsatzkräfte und dem zu erwartenden Einsatzserfolg ist das eine – aber ist die Praxis „bereit“ für den Einsatz ebendieses Werkzeuges? Besteht doch das Dilemma im Sicherheitsbereich darin, dass Betrachtungen zur optimalen Ressourcenverteilung immer nur sehr punktuell je nach Thematik oder Organisation stattfinden.

6. Ergebnisse

Die Ursache hierfür mag darin liegen, dass eine Gesellschaft, die hochgradig arbeitsteilig organisiert und zugleich mehrstufig reglementiert ist, vernetztes Denken und Handel eher blockiert als begünstigt. Zwei Aspekte sollen dies verdeutlichen:

- Vergleicht man Zahlen aus dem Bereich „äußere Umstände von Mortalität“, wird die Problematik offensichtlich. Die Zahl der im Luftverkehr tödlich Verunglückten beträgt weltweit ca. 700 Personen pro Jahr [FSF o. J.a]. Im Vergleich dazu kommen allein in Deutschland jährlich ca. 400 Personen bei Bränden („Exposition gegenüber Rauch, Feuer und Flammen“: 376 Tote) ums Leben, über 600 durch Vergiftung, fast 10.000 durch Stürze (!) und mehr als 10.000 durch Suizid [Statistisches Bundesamt 2012, S. 2.3.1]. Es wäre daher naheliegend, die Verteilung der verfügbaren Ressourcen unter Berücksichtigung dieser ungleichen Verteilung vorzunehmen. Ein exemplarischer Blick auf den Brandschutz im Detail offenbart die Problematik. Für den allgemeinen Brandschutz sind die Kommunen verantwortlich, die trotz gleicher Zielsetzung (primär die Rettung von Menschenleben) wiederum durch 16 verschiedene Bundesländer beaufsichtigt und koordiniert werden. Der Flugzeugbrandschutz hingegen wird von den jeweiligen Flughafenbetreibern finanziert und erfolgt nach den internationalen Regelungen der ICAO. Zudem obliegt der Flugzeugbrandschutz als Bestandteil des Luftverkehrs teilweise den Verkehrsministerien der Länder und nicht den Innenministerien, die für den allgemeinen Brandschutz zuständig sind. Es ist daher unter den gegenwärtigen strukturellen Voraussetzungen nahezu unmöglich, die Sachlage übergreifend und ganzheitlich „aus der Vogelperspektive“ zu beurteilen und eine gesamtgesellschaftlich optimierte Lösung zu entwickeln und umzusetzen.
- Die Überlegung, ob es nicht sinnvoll wäre, besser dort in Sicherheit zu investieren, wo das Sicherheitsniveau niedrig ist, anstatt in anderen Bereichen ein bereits hohes Sicherheitsniveau (mit viel Aufwand) noch weiter zu erhöhen, erscheint berechtigt und naheliegend. Angesichts einer allgegenwärtig angespannten Finanzlage besteht dabei eine zwar unkonventionelle, aber doch utilitaristisch - also den Nutzen maximierende - Möglichkeit darin, an geeigneten Stellen bewusst das Sicherheitsniveau zu senken und die frei werdenden Mittel in Bereichen einzusetzen, an denen sie den absolut gesehen größten Zugewinn an Sicherheit bewirken könnten. Es bleibt aber zu erwarten, dass kaum ein Entscheidungsträger den Mut und die Standhaftigkeit dafür aufbringt, sich öffentlich für eine „bewusste“ punktuelle Reduzierung des Sicherheitsniveaus zugunsten eines anders Sicherheitsaspektes auszusprechen. Eine kluge Umverteilung vorhandener Ressourcen nach objektiven und den allgemeinen Nutzen maximierenden Kriterien ist folglich ebenso wenig zu erwarten wie ein allumfassender Blick auf alle sicherheitsrelevanten Bereiche.

6. Ergebnisse

Diese einigermaßen entmutigenden Einschätzungen stehen in engem Zusammenhang zur eigentlichen Aufgabenstellung und zum erzielten Ergebnis. So lassen sich mittels der hier vorgestellten Risikoanalyse zwar valide Aussagen über den Zusammenhang zwischen Einsatzkräfteanzahl und zu erwartendem Einsatzerfolg treffen – eine abschließende Empfehlung über die tatsächlich gewollte Anzahl an Einsatzkräften mit Blick auf das dabei in Kauf zu nehmende Risiko lässt sich jedoch nicht sachlich-mathematisch, sondern ausschließlich ethisch-moralisch treffen. Risikoanalysen beantworten niemals die kontrovers diskutierte Frage, welches Maß an Risiko eine Gesellschaft bereit ist zu tragen.

In dieser Arbeit steht die reine Ermittlung der Fakten im Mittelpunkt der Überlegungen – die Bewertung der Ergebnisse kann ausschließlich durch die Gesellschaft vorgenommen werden, im besten Falle mit Hilfe des gerade thematisierten Blickes „von oben aufs Ganze“. Dies bedeutet, dass sich nun für die Überführung der mittels der Risikoanalyse gewonnenen Erkenntnisse in die Praxis –wie in Kapitel 3.3 beschrieben – zunächst Risikobewertung und Risikomanagement anschließen müssen. Darauf hat eine (öffentliche) Diskussion über die gesellschaftliche Akzeptanz des angestrebten Sicherheitsniveaus und den damit verbundenen Konsequenzen bzw. Kosten zu folgen, die zu einer Bestätigung oder Ablehnung führt. Erst in Verbindung mit einer transparenten und willentlichen gesellschaftspolitischen Bewertung, einhergehend mit Bereitschaft und Mut zur Veränderung, kann eine Risikoanalyse eine solide Basis für das Herausarbeiten von Handlungsoptionen sowie für Entscheidungen und konkrete Maßnahmen bieten und somit ihre volle Wirkung entfalten.

6.4 Ausblick

Die erzielten Ergebnisse zeigen trotz ihres wissenschaftlichen Charakters bedeutsame Handlungsoptionen für die Praxis auf. Über seinen bisherigen Leistungsumfang hinaus bietet das hier vorgestellte Simulationsmodell dank seines flexiblen modularen Aufbaus die Möglichkeit, nicht nur innerhalb der bereits implementierten Module zu variieren. Dem bestehenden Modell können weitere Komponenten hinzugefügt werden. So sind über die im Rahmen dieser Arbeit für sinnvoll befundenen Funktionalitäten für die Zukunft etwa folgende Erweiterungen denkbar:

- Das vorhandene Rechenmodell könnte um den Sonderfall eines Flugzeugunfalls an bzw. auf Gewässern erweitert werden, da eine nicht unerhebliche Zahl von Flughäfen an Küsten, auf Inseln und bisweilen an großen Seen liegt.
- Ein Simulationsmodell auf Basis einer kybernetischen Risikoanalyse könnte analog auch für die Bemessung der medizinischen Versorgung im Kontext eines Flugzeugunglücks erarbeitet werden. Hiermit ließe sich nicht nur ein Ansatz zur Personalbemessung für der notfallmedizinischen Dienst gewinnen, sondern auch überprüfen, ob die verfügbaren Kräfte für Brandschutz und Menschenrettung einerseits und für die medizinische Versorgung andererseits in einem sinnvollen Verhältnis zueinander stehen.

6. Ergebnisse

Darüber wurde offensichtlich, dass die Festlegung der Bemessungsgrundlage einer grundsätzlichen Diskussion bedarf. Es sollte daher erörtert werden, inwieweit bei der Dimensionierung von Sicherheitsausstattungen und vor allem bei der Bemessung der Einsatzkräfte auf starre Vorgaben verzichtet und stattdessen eine risikobasierte Betrachtung durchgeführt werden kann. Dies könnte z. B. auf Basis der Häufigkeitsverteilung der Flugzeugmuster, der Sitzplatzauslastung und der Gesamtzahl der Flugbewegungen erfolgen. Eine Berücksichtigung dieser Luftverkehrsdaten würde zu einer Bemessung führen, die dem tatsächlichen Risiko angemessen wäre und nicht ein extremes Einzelereignis als Grundlage hätte. Ein solches Vorgehen dürfte ein sicherheitstechnisch wie auch wirtschaftlich angemessen Ergebnis hervorbringen (ohne jedoch das Problem fehlender Wirtschaftlichkeit bei kleinen Flughäfen lösen zu können). Insbesondere für zwei Anspruchsgruppen des Luftverkehrs wäre eine solche (individuelle) risikobasierte Betrachtung interessant:

- Aufsichtsbehörden bietet sich von nun an die Möglichkeit, ihre Auflage bezüglich der Anzahl der vorgeschriebenen Einsatzkräfte auf Basis eines objektiven und wissenschaftlichen Verfahrens festzulegen.
- Flughafenfeuerwehren bzw. Flughafenbetreibern wird ein Instrument an die Hand gegeben, mit dessen Hilfe sie ihr Sicherheitsniveau überprüfen können. Auf diese Weise lassen sich ggf. vorhandene Defizite oder auch Überkapazitäten identifizieren.

Das Simulationsmodell ist in diesem Zusammenhang aufgrund der zahlreichen systemimmanenten Variationsmöglichkeiten (so etwa bei der Festlegung des Bemessungsflugzeugs) nicht nur geeignet, den Ist-Zustand umfassender als bisher möglich zu bewerten, sondern auch aktuellen technischen Neuerungen Rechnung zu tragen. Damit kann Aufsichtsbehörden wie Flughafenfeuerwehren bzw. Flughafenbetreibern vor dem Hintergrund sich verändernder Rahmenbedingungen eine qualifizierte Entscheidungsgrundlage an die Hand gegeben werden. Ein Beispiel aus der jüngeren Vergangenheit stellt die Aufnahme des Linienbetriebs des Airbus A380 zum Winterflugplan 2007 durch die Singapur Airlines dar, steht dem Luftverkehr doch nun ein Flugzeug mit bisher unerreichter Kapazität zur Verfügung. Mit einer Größenordnung von bis zu 900 Passagieren können zukünftig mehr als doppelt so viele Passagiere befördert werden wie mit dem bisher größten Passagierflugzeug der Welt, der Boeing 747-400, die über ca. 500 Plätze verfügt. Welche personellen Vorhaltungen seitens der Flughäfen für einen Schadensfall eines Airbus A380 erforderlich sind, dürfte zum heutigen Zeitpunkt noch nicht abschließend bzw. nur theoretisch geklärt sein. Es ist anzunehmen, dass diese Frage beim ersten schweren Unfall eines Airbus A380 mit einer bisher nicht erreichten Anzahl an Verletzten und Toten neu gestellt wird. Hier bietet die entwickelte Systematik die Möglichkeit, eine objektive und fundierte Aussage zu treffen, wenn Modifikationen zur Simulation des Airbus A380 vorgenommen werden.

7. Zusammenfassung

Vier Faktoren bilden den Anlass zu dieser Arbeit:

- Weder seitens der ICAO oder einer nationalen Behörde bestehen allgemeingültige Vorgaben über die notwendige bzw. optimale Anzahl an Einsatzkräften zur Bewältigung von Flugzeugunfällen, noch existieren wissenschaftliche Untersuchungen, die Aussagen darüber treffen.
- Das Luftverkehrsaufkommen wächst seit Jahrzehnten relativ konstant. Gleichzeitig steigt auch das Sicherheitsniveau stetig an. Das Ergebnis dieser beiden gegenläufigen Entwicklungen ist, dass sowohl die Unfallrate als auch die absolute Zahl an (tödlichen) Luftverkehrsunfällen sinkt. Für beide Entwicklungen wurde wiederholt ein oberer bzw. unterer Grenzwert prognostiziert, so dass zurzeit nicht absehbar ist, welcher Trend sich auf Dauer durchsetzen wird. Sinkt aber die absolute Anzahl an Flugzeugunfällen oder bleibt sie auf einem sehr niedrigen Niveau konstant, stellt sich die Frage nach der erforderlichen Bemessung der operativen Schadensabwehr insbesondere unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten mit noch mehr Nachdruck.
- Weltweit konzentrieren sich Flugzeugunfälle zu fast zwei Drittel (64%) auf Flughäfen und das direkte Umfeld, da vor allem die Start- und Landevorgänge besonders kritische Flugphasen darstellen. Insofern macht es Sinn, die Annahmen, auf deren Basis die Vorhaltung von Einsatzkräften an Flughäfen bemessen wird, zu hinterfragen und zu erörtern.
- Bereits eine kleine Anzahl linearer Zusammenhänge und wenige nichtlineare Prozesse führen zu einem komplexen dynamischen System, über dessen Folgen keine Aussagen mehr auf Basis von bloßen Überlegungen getroffen werden können. Nur eine Simulation der Abläufe mit ihren Wechselwirkungen ermöglicht es, eine Abschätzung der Ergebnisse vorzunehmen.

Diese Kombination aus nicht vorhandenen Richtwerten für Personalstärken, ausgefeilten und kaum mehr steigerungsfähigen Sicherheitssystemen auf Flugsicherheits- und Flugzeugseite sowie einer Ballung der Flugzeugunfälle im Zugriffsgebiet / Zugriffsbereich der Flughafengebiet führt für Luftfahrtbehörden und Flughäfen fast zwangsläufig zu der Frage, inwieweit die Höhe der Personalmenge Einfluss auf den Rettungserfolg hat.

Zur Bearbeitung der Aufgabenstellung wurde folgender Lösungsansatz gewählt:

- Als Grundbausteine dienen die klassische Risikoanalyse in Form einer Ereignisablaufanalyse sowie die Methodik der zellulären Automaten. Das Ergebnis dieser Zusammenführung ist die kybernetische Risikoanalyse. Diese zeichnet sich dadurch aus, dass dynamische Prozesse verschiedener Elemente beschrieben und Wechselwirkungen zwischen ihnen dargestellt werden können, im vorliegenden konkreten Fall zum einen die Einsatzkräfte sowie die Passagiere und deren Gesundheitszustand, aber auch die Schadensentwicklung durch Feuer und Rauch sowie deren Bekämpfung. Somit lassen sich die Abläufe nach Flugzeugunfällen nahezu vollständig simulieren.

7. Zusammenfassung

- Des Weiteren werden die einsatzrelevanten Merkmale von Flugzeugunfällen (wie z. B. Wetter, Tageszeit, Unfallart) erfasst und mittels einer Zwicky-Box systematisiert. Für die entstandenen Faktoren wird die jeweilige Häufigkeitsverteilung und deren Einfluss auf die Rettungsarbeiten abgeschätzt. Dies erlaubt es, für jedes Unfallszenario die Eintrittswahrscheinlichkeit und die Auswirkungen für die Einsatzabläufe zu bestimmen.
- In einer beispielhaften praktischen Anwendung wird die Einsatzkräftezahl in 5er-Schritten durchlaufen. Dabei werden mit Hilfe der Monte-Carlo-Methode 10.000 Unfälle mit unterschiedlichen Schadenslagen ermittelt und simuliert. Die einzelnen Ergebnisse werden jeweils zu einem Wert zusammengefasst, der den durchschnittlich zu erwartenden Ausgang eines Flugzeugunfalls in Abhängigkeit von der Einsatzkräfteanzahl darstellt.
- Im letzten Schritt werden Ergebnisse aus Simulationen mit verschiedenen Variationen der Modellierung miteinander verglichen, um die rechnerischen Annahmen zu verifizieren.

Die Ergebnisse lassen sich in vier Aussagen zusammenfassen:

- Die kybernetische Risikoanalyse ist eine wissenschaftlich fundierte Methode zur Bewertung von Risiken. Insbesondere können komplexe dynamischer Systeme analysiert werden.
- Das Ziel, eine realitätsnahe mathematische Beschreibung von Abläufen und Wechselwirkungen bei Flugzeugunfällen zu entwickeln, wurde erreicht.
- Mit dem erstellten Simulationsmodell steht nun ein geeignetes Werkzeug zur Risikobetrachtung im Luftverkehr bezüglich Unfallbewältigung zur Verfügung.
- Insbesondere lassen sich realitätsnahe Anhaltspunkte für die Bemessung der Anzahl an Einsatzkräften, die auf Flughäfen vorgehalten werden sollten, erzielen.

Anhang

Im Folgenden ist der Quellcode der Simulation auszugsweise abgebildet, um die Struktur der Simulation und die Realisierungsansätze der Programmierung darzustellen.

Der Code wurde mit Matlab erstellt. Die Punkte vor den Einrückungen gehören nicht zur Matlab-Syntax. Sie wurden im Folgenden eingefügt, um die Schachtelung der Schleifen und Abfragen besser kenntlich zu machen.

```
% =====  
  
clc                                % Löscht den Kommando-Bildschirm  
clear all                          % Setzt alle Variablen zurück  
tic                                 % Startet die Stoppuhr  
  
% =====  
% BLOCK 0a - ALLGEMEINE SIMULATIONSPARAMETER  
% =====  
  
zeitschritt_anzahl    =    720;    % 720 - Anzahl an Simulationsschritten (nach 6 Stunden  
                                % "sind alle Verletzten weg")  
auto_end              =    0;      % Beendet die Simulation automatisch, wenn sie  
                                % durchgelaufen ist  
zwischenenergebnis  =    1;      % Zeigt Zwischenergebnisse an  
datei                 =    0;      % Schreibt die Ergebnisse in eine Textdatei, statt  
                                % sie auf dem Bildschirm auszugeben  
graphik              =    1;      % Graphische Wiedergabe der Simulations-  
                                % schritte bei 1  
automatisch          =    0;      % Simulation läuft selbstständig durch  
zeitschritt_dauer    =    1;      % Bildverweildauer eines Simulations-  
                                % schrittes in Sekunden  
p                    =    200;    % Anzahl Flugzeuginsassen (Pax incl. Crew)  
tuer_anzahl          =    4;      % Anzahl der Türen (zwischen 2 und 5 !)  
varianten            =    0;      % Berechnet alle Varianten automatisch  
erschoepfung         =    1;      % 1 = vorhanden / 2 = nicht vorhanden  
behinderung          =    1;      % 1 = vorhanden / 2 = nicht vorhanden  
feuer                =    2;      % 1 = nur Feuer / 2 = mit und ohne Feuer /  
                                % 3 = ohne Feuer  
fw_var_aktiv         =    1;      % Legt fest, ob die Feuerwehr-Schleife  
                                % durchlaufen wird (1=ja / 0=nein)  
fw_anzahl_min        =    12;     % 10 - Mindestanzahl an Feuerwehrmännern in der  
                                % Simulation (Phase 1+2)  
fw_anzahl_max        =    120;    % 120 - Maximalanzahl an Feuerwehrmännern in der  
                                % Simulation (Phase 1+2), Tipp: max. 1,5 x Pax  
fw_anzahl_takt       =    10;     % Anzahl, um die die Zahl der Feuerwehrmänner  
                                % jeweils erhöht wird (für grobe Abschätzung 5er  
                                % bzw. 10er-Schritte)  
fw_anzahl_02         =    0;      % Feuerwehrmänner in der Zeitstufe 2 (gibt den Wert  
                                % später an "fw_anzahl2" weiter, wenn die Feuerwehr  
                                % schleife NICHT aktiviert ist)
```

Anhang

```
fw3_var_aktiv      = 0;      % Legt fest, ob in Phase 3 externe Feuerwehrmänner
                    % zum Einsatzkommen (1 = externe / 0 = nur interne)
fw3_vektor =      [0 100 240]; % Anzahl der Feuerwehrmänner in Phase 3
                    % (Unterstützung durch öffentliche Feuerwehr)
fw_reserve        = 0;      % Nur 3 Trupps je Tür, Rest in Reserve, automatische
                    % Ablösung der Trupps, die m meisten erschöpft sind
verzoeigerung_max = 95;    % Wird in "%" angegeben, um gleiche Dimension
                    % zu haben
parameterschleife_aktiv = 0; % Legt fest, ob die Unfall-Parameter per Zufall
                    % ermittelt werden (1 = Zufall / 0 = manuell)
parameterschleifen_anzahl = 0; % 10.000 - Legt fest, wie oft die Parameterschleife
                    % durchlaufen wird
panik_ausschalter = 1;    % Die Funktion "Panik" wird deaktiviert, wenn "0"
                    % gewählt ist.
treppe_ausschalter = 1;   % Mit "0" werden Treppen deaktiviert, mit "1" sind
                    % sie aktiv.
phase2_verzoeigerung = 50; % Die Eintreffzeit der zweiten Fw-Einheiten wird um
                    % diese Anzahl an Runden zusätzlich verzögert
                    % 1 Runde = 0,5 Minuten).

% =====
% BLOCK 0b - ABFRAGE: GEWÜNSCHTE AUSGABE VON EINZELERGEBNISSEN UND MATRIZEN
% =====

if datei==1;
.  fid=fopen('output_lux.txt','a'); % Erzeugt Ausgabedatei
end

Gibt_Zeit_aus      = 0;
Gibt_Feuer_aus     = 0;
Gibt_Wasser_aus    = 0;
Gibt_Loeschen_aus  = 0;
Gibt_Hitze_aus     = 0;
Gibt_Innenfeuer_aus = 0;
DimensionsvektorInnenfeuer = [1]; % Legt fest, welche Dimensionen (=Ebenen)
                    % ausgegeben werden. Jede Ebene, die ausgegeben
                    % werden soll, in den Vektor schreiben

Gibt_Innenwasser_aus = 0;
DimensionsvektorInnenwasser = [4 5 6]; % Legt fest, welche Dimensionen (=Ebenen)
                    % ausgegeben werden. Jede Ebene, die ausgegeben
                    % werden soll, in den Vektor schreiben

Gibt_Triebwerkfeuer_aus = 0;
Gibt_TuerMatrix_aus     = 0;
Gibt_FrachttuerMatrix_aus = 0;

[...]
```

Anhang

```
% =====
% BLOCK 0e - FEUERWEHR-ANZAHL-SCHLEIFE
% =====

for fw_zaeher0=1:fw_var_anzahl;
. % Feuerweherschleife aktiv ? => Dann die verschiedenen
. % Fw-Anzahlen schrittweise in die ErfolgMatrix eintragen
. if fw_var_aktiv==1;
. . fw_anzahl_gesamt=fw_anzahl_min+(fw_zaeher0-1)*fw_anzahl_takt;
. else
. . fw_anzahl_gesamt=fw_anzahl_min+fw_anzahl_02;
. end
.
. % =====
. % BLOCK 0f - PARAMETER-SCHLEIFE
. % =====
.
. % Ist die Parameter-Schleife aktiviert ?
. % => Dann Schleifenanzahl für Parameterschleife übernehmen
. if parameterschleife_aktiv==1;
. . parameterschleifen_anzahl=parameterschleifen_anzahl;
. % Ist die Parameter-Schleife NICHT aktiviert ? => Dann definierte Lage berechnen
. else
. . parameterschleifen_anzahl=1;
. end
.
. % Parameterschleife (egal ob definierte Lage oder viele Parameter per Zufall
. % über Schleifen bestimmt wird)
. for parameterschleifen_zaeher=1:parameterschleifen_anzahl;
. .
. . %.....
. .
. . % Ist die Parameterschleife aktiv ? => Dann ermittel alle Zufallsvariablen
. . % für die Parameter per Zufallsgenerator
. . if parameterschleife_aktiv==1;
. . . % Zufallsvariable für alle Szenarien
. . . eingreifzeit_zufall=rand(1);
. . . sicht_zufall=rand(1);
. . . wetter_zufall=rand(1);
. . . lfz_zufall=rand(1);
. . . feuer_zufall=rand(1);
. . . wind_zufall=rand(1);
. . . verletzung_zufall=rand(1);
. . % Parameterschleife nicht aktiv ? => Dann selbst "per Hand" determinieren
. . else
. . . % Definition der Zufallsvariablen nach eigener Festlegung aus "Block 0a"
. . . % oder hier per Hand
. . end
. end
```

Anhang

```
. .
. . % Legt die obere Häufigkeitsgrenze (~Wahrscheinlichkeit)
. . % der Parametergruppen fest
. . % EingreifzeitParaVektor [NotL    OnA-kurz    OnA-normal    OnA-lang
. . % OnA-Gebäude    OnA-LFZ    Off-Wiese    Off-Wald    Off-Gebäude]
. . EingreifzeitParaVektor=[0.33    0.36    0.56    0.64
. .    0.66    0.67    0.89    0.99    1.0];
. . % SichtParaVektor[Tag+gut    Nacht/CAT_II    CAT_III]
. . SichtParaVektor=[0.79    0.99    1.0];
. . % WetterParaVektor[normal    Regen    Starkregen    Schnee    Eis]
. . WetterParaVektor=[0.85    0.95    0.98    0.99    1.0];
. . % LfzParaVektor[normal    schräg    platt    turnover    zerteilt    zertrümmer]
. . LfzParaVektor=[0.79    0.88    0.93    0.94    0.98    1.0];
. . % FeuerNichtParaVektor[kein Feuer oder Rauch]
. . FeuerNichtParaVektor=[0.4]*nicht_feuer_var;
. . % FeuerParaVektor[Rauch    Fracht    Fracht+Rauch    Kabine    Kabine+Rauch
. . % Triebwerk    Fahrwerk    Flügel    Fläche]
. . FeuerParaVektor=[0.50    0.55    0.60    0.65    0.7
. .    0.80    0.90    0.95    1.0]*feuer_var_fak-feuer_var_abs;
. . % WindParaVektor[neutral    nützlich    schädlich]
. . WindParaVektor=[0.7    0.9    1.0];
. . % VerletzungParaVektor[leichter    normal    schwerer]
. . VerletzungParaVektor=[0.25    0.75    1.0];
. . % Faktor zu Berücksichtigung von Unfällen mit zwei LFZ (muß hier stehen,
. . % da nachfolgend das Unfallszenario gewählt wird)
. . lfz2_faktor=1;
. .
. . [...]
. .
. . fprintf('Anzahl Pax:                %d\n',p)
. . fprintf('Anzahl Fw Phase 1:         %d\n',fw_anzahl_min)
. . fprintf('Anzahl Fw Phase 2:         %d\n',fw_anzahl_02)
. . fprintf('Externe Fw (Phase 3):      %d\n\n',fw3_anzahl)
. . disp(' ');
. .
. . % disp('--- PARAMETER ---');
. .
. . %.....
. . % (1) EINGREIFZEIT (Notlandung + On/Off Airport + Entfernung)
. . % On Airport / Notlandung angekündigt
. . if eingreifzeit_zufall<EingreifzeitParaVektor(1);
. . .   if parameterschleife_aktiv==0;
. . . .   disp('1. On Airport - Notlandung angekündigt');
. . . .   end;
. . . .   delta_eingreifzeit_zeit=2; % = 1,0 Min.
. . . .   delta_eingreifzeit_verletzung=-0.253;
. . . .   delta_eingreifzeit_rennen=0;
. . . .   delta_eingreifzeit_simba=0;
. . % On Airport / Unfall, kurz
. . elseif eingreifzeit_zufall<EingreifzeitParaVektor(2);
```

Anhang

```
. . . if parameterschleife_aktiv==0;
. . . . disp('1. On Airport - Unfall, kurz');
. . . end;
. . . delta_eingreifzeit_zeit=3; % = 1,5 Min.
. . . delta_eingreifzeit_verletzung=-0.15;
. . . delta_eingreifzeit_rennen=0;
. . . delta_eingreifzeit_simba=0;
. . % On Airport / Unfall, normal
. . elseif eingreifzeit_zufall<EingreifzeitParaVektor(3);
. . . if parameterschleife_aktiv==0;
. . . . disp('1. On Airport - Unfall, normal+lang');
. . . end;
. . . delta_eingreifzeit_zeit=4; % = 2,0 Min.
. . . delta_eingreifzeit_verletzung=-0.15;
. . . delta_eingreifzeit_rennen=0;
. . . delta_eingreifzeit_simba=0;
. . % On Airport / Unfall, lang
. . elseif eingreifzeit_zufall<EingreifzeitParaVektor(4);
. . . if parameterschleife_aktiv==0;
. . . . disp('1. On Airport - Unfall, sehr lang');
. . . end;
. . . delta_eingreifzeit_zeit=6; % = 3,0 Min.
. . . delta_eingreifzeit_verletzung=-0.15;
. . . delta_eingreifzeit_rennen=0;
. . . delta_eingreifzeit_simba=0;
. . % On Airport / Kollision Gebäude / Hindernis
. . elseif eingreifzeit_zufall<EingreifzeitParaVektor(5);
. . . if parameterschleife_aktiv==0;
. . . . disp('1. On Airport - Kollision Gebäude / Hindernis');
. . . end;
. . . delta_eingreifzeit_zeit=7; % = 3,5 Min.
. . . delta_eingreifzeit_verletzung=0.25;
. . . delta_eingreifzeit_rennen=10; % Wert wird mit Faktor "-100" also in "-%"
. . . % angegeben, damit er von der Dimension zu
. . . % "Verzögerungswahrscheinlichkeit" paßt
. . . delta_eingreifzeit_simba=-0.10;
. . % On Airport / Kollision LFZ
. . elseif eingreifzeit_zufall<EingreifzeitParaVektor(6);
. . . if parameterschleife_aktiv==0;
. . . . disp('1. On Airport - Kollision LFZ');
. . . end;
. . . delta_eingreifzeit_zeit=5; % = 2,5 Min.
. . . delta_eingreifzeit_verletzung=0.25;
. . . delta_eingreifzeit_rennen=10; % Wert wird mit Faktor "-100" also in "-%"
. . . % angegeben, damit er von der Dimension zu
. . . % "Verzögerungswahrscheinlichkeit" paßt
. . . delta_eingreifzeit_simba=-0.10;
. . . lfz2_faktor=0.5;
. . . % Parameter: Unfall mit zwei LFZ => Dann die Anzahl der Simbas halbieren
. . . simba_anzahl1_lfz2=ceil((simba_anzahl1+simba_anzahl2)*0.5);
```

Anhang

```
. . . simba_anzahl2_lfz2=round((simba_anzahl3)*0.5);
. . . simba_anzahl1=simba_anzahl1_lfz2;
. . . simba_anzahl2=simba_anzahl2_lfz2;
. . . % Off Airport / Wiesen+Beton
. . elseif eingreifzeit_zufall<EingreifzeitParaVektor(7);
. . . if parameterschleife_aktiv==0;
. . . . disp('1. Off Airport - Wiesen+Beton');
. . . . end;
. . . delta_eingreifzeit_zeit=11; % = 5,5 Min.
. . . delta_eingreifzeit_verletzung=0.25;
. . . delta_eingreifzeit_rennen=0;
. . . delta_eingreifzeit_simba=0;
. . . % Off Airport / Wald
. . elseif eingreifzeit_zufall<EingreifzeitParaVektor(8);
. . . if parameterschleife_aktiv==0;
. . . . disp('1. Off Airport - Wald');
. . . . end;
. . . delta_eingreifzeit_zeit=20; % = 10,0 Min.
. . . delta_eingreifzeit_verletzung=0.50;
. . . delta_eingreifzeit_rennen=25; % Wert wird mit Faktor "-100" also in "-%"
. . . . % angegeben, damit er von der Dimension zu
. . . . % "Verzögerungswahrscheinlichkeit" paßt
. . . . delta_eingreifzeit_simba=-0.50;
. . . % Off Airport / Gebäude
. . else
. . . . if parameterschleife_aktiv==0;
. . . . . disp('1. Off Airport - Gebäude');
. . . . . end;
. . . . delta_eingreifzeit_zeit=11; % = 5,5 Min
. . . . delta_eingreifzeit_verletzung=1.00;
. . . . delta_eingreifzeit_rennen=10; % Wert wird mit Faktor "-100" also in "-%"
. . . . . % angegeben, damit er von der Dimension zu
. . . . . % "Verzögerungswahrscheinlichkeit" paßt
. . . . delta_eingreifzeit_simba=-0.10;
. . . end
. . . %.....
. . . % (2) SICHT + TAGESZEIT
. . . % Tag und gute Sicht
. . . if sicht_zufall<SichtParaVektor(1);
. . . . if parameterschleife_aktiv==0;
. . . . . disp('2. Sicht - gut / Tag');
. . . . . end;
. . . . delta_sicht_zeit=0;
. . . . delta_sicht_rennen=0;
. . . . % Nacht oder CAT II
. . . elseif sicht_zufall<SichtParaVektor(2)
. . . . if parameterschleife_aktiv==0;
. . . . . disp('2. Sicht - Eingeschränkt / Nacht oder CAT II');
. . . . . end;
. . . . delta_sicht_zeit=1; % = 0,5 Min.
```

Anhang

```
. . . delta_sicht_rennen=5; % Wert wird mit Faktor "-100" also in "-%"
. . . % angegeben, damit er von der Dimension zu
. . . % "Verzögerungswahrscheinlichkeit" paßt
. . . % CAT III
. . . else
. . . . if parameterschleife_aktiv==0;
. . . . . disp('2. Sicht - Sehr schlecht / CAT III');
. . . . . end;
. . . . delta_sicht_zeit=3; % = 1,5 Min.
. . . . delta_sicht_rennen=10; % Wert wird mit Faktor "-100" also in "-%"
. . . . % angegeben, damit er von der Dimension zu
. . . . % "Verzögerungswahrscheinlichkeit" paßt
. . . end
. . . %.....
. . . % (3) WETTER
. . . [...]
. . . % (4) LFZ-ZUSTAND + EVAKUIERUNG
. . . [...]
. . . % (5) FEUER + RAUCH
. . . [...]
. . . % (6) WIND
. . . [...]
. . . %.....
. . . % (7) VERLETZUNG
. . . % Leichtere Verletzungsverteilung
. . . if verletzung_zufall<VerletzungParaVektor(1);
. . . . if parameterschleife_aktiv==0;
. . . . . disp('7. Verletzungsverteilung - Leichter');
. . . . . end;
. . . . delta_verletzung_verletzung=-0.50;
. . . . % Normale Verletzungsverteilung
. . . elseif verletzung_zufall<VerletzungParaVektor(2);
. . . . if parameterschleife_aktiv==0;
. . . . . disp('7. Verletzungsverteilung - Normal');
. . . . . end;
. . . . delta_verletzung_verletzung=0;
. . . . % Schwerere Verletzungsverteilung
. . . else
. . . . if parameterschleife_aktiv==0;
. . . . . disp('7. Verletzungsverteilung - Schwer');
. . . . . end;
. . . . delta_verletzung_verletzung=0.50;
. . . end
. . .
. . . [...]
. . .
. . . % =====
. . . % BLOCK 1 - EINGABE-ABFRAGE
. . . % =====
. . .
```

Anhang

```
. . tuer_wahr=0.85;           % Wahrscheinlichkeit, daß Tür von Paxen geöffnet wird
. . tuer_fw_wahr=0.5;       % Wahrscheinlichkeit, daß FwTrupp eine Tür von Innen
. .                         % öffnen kann (50% für: verklemmt, nicht erreichbar)
. .
. . treppen_anzahl=...
. . 2*treppe_ausschalter;   % Anzahl der verfügbaren Rettungstreppen
. . treppen_zeit=4;        % Rüstzeit der Treppe am Flugzeug
. . rutschen_zeit=2;       % Zeit, die ein Trupp die Rutsche hoch oder runter
. .                         % braucht(mit/ohne Pax)
. .
. . frachttuer_zeit=4;     % Zeit, um die Frachtraumtüren von außen zu öffnen
. . wassermenge=20;        % Wassermenge pro Simba [1xWassermenge=600 Liter]
. . loeschleistung1=2;     % Löschkapazität je Simba mit Besatzung=1 pro Runde
. . loeschleistung2=3;     % Löschkapazität je Simba mit Besatzung=2 pro Runde
. . panik=0;               % Wird zu Beginn immer auf Null gesetzt und wird dann
. .                         % in Abhängigkeit der Lage berechnet
. .
. . % =====
. . % BLOCK 2 - Definition der fixen/programminternen PARAMETER
. . % =====
. .
. . afx=7;                  % Grundfläche, X-Achsenabschnitte
. . afy=7;                  % Grundfläche, Y-Achsenabschnitte
. . Feuer=zeros(afy+2,afx+3)+Feuer_Anfang(:, :, flaechenfeuer_anfang);
. . Feuervorlauf=zeros(afy+2,afx+3);
. . Feuerausbreitung=zeros(afy+2,afx+3);
. . Wasser=zeros(afy+2,afx+3);
. . Loeschen=ones(afy+2,afx+3);
. . pa_wechsel_zeit=8;     % Zeitbedarf zum Wechseln eines PA mit kurzer
. .                         % "Verschnaufpause" (8 = 4 Minuten)
. . pa_trag_zeit=36;       % Zeit, die ein PA getragen werden kann.
. .                         % (36=18min.) Überziehung möglich, PA muß dann beim
. .                         % nächsten Halt (an der Verletztenablage) abgelegt
. .                         % gewechselt werden.
. . erschoepfung_pro_pax=10; % Um diesen Prozentsatz sinkt die Leistungs-
. .                         % fähigkeit eines Fw-Trupps kumulativ pro Pax
. . phasel_zeit=delta_eingreifzeit_zeit+delta_sicht_zeit+delta_wetter_zeit;
. .                         % Erste Phase, in der der Feuerwehreinsatz
. .                         % beginnt [vorherige Zeile]
. . phase2_zeit=phasel_zeit+4+phase2_verzoegerung;
. . phase3_zeit=50;        % 25 Minuten nach dem LFZ-Unfall, stehen
. .                         % externe Kräfte zur Verfügung
. .
. . feuerwehranfang=phasel_zeit;
. . qmaschinist=1/8;
. . sektorpax_max=tuer_anzahl*15;
. . tuerdurchfluss_normal=24; % Anzahl der Pax, die im Normalfall pro Runde
. .                         % durch eine Tür kommen
. . tuerdurchfluss_panik=18; % Anzahl der Pax, die bei Panik pro Runde durch
. .                         % eine Tür kommen
. .
. . panik_innenfeuer=0;    % Variable zur Berechnung
. . panik_aussenfeuer=0;  % Variable zur Berechnung
. . panik_rauch=0;        % Variable zur Berechnung
```


Anhang

```
. . panik_normal=0.01;          % Variable zur Berechnung
. . panikwert_innenfeuer=0.05;  % Eintrittswahrscheinlichkeit
. . panikwert_aussenfeuer=0.025; % Eintrittswahrscheinlichkeit
. . panik_aussenfeuer_flaeche=tuer_anzahl+1;
. .                               % Brennt eine Fläche größer diesem Wert,
. .                               % verdoppelt sich die Panikwahrscheinlichkeit
. . panikwert_rauch=0.05;       % Eintrittswahrscheinlichkeit
. . paniktot_wahr=0.002;        % Wahrscheinlichkeit für tödliche
. .                               % Verletzungen bei Panik
. . CO_grenze_tot=600;          % Angabe in milli% => Die Letalitätsgrenze von
. .                               % CO liegt bei 0,6%
. . CO_grenze_ungeh=300;        % Angabe in milli% => Die Erträglichkeitsgrenze von
. .                               % CO liegt bei 0,3%
. . CO_grenze_wirr=150;         % Angabe in milli% => Die Orientierungs-
. .                               % sinngrenze von CO liegt bei 0,15%
. . wirr_wahr=0.5;              % Wahrscheinlichkeit dass verwirrte Pax stehen
. .                               % bleiben (Ermittlung für jeden Pax einzeln)
. . pax_belastung_spielraum=10; % Angabe, um wie viele Runden die möglich
. .                               % Belastbarkeit der Pax variieren kann
. . rutschverletzung_wahr=0.1;  % Wahrscheinlichkeit, dass sich Pax beim
. .                               % Rutschen ohne Feuerwehr "um 1% mehr verletzen"
. .
. . % =====
. . % BLOCK 3 - Definition der AUSGANGSSITUATION
. . % =====
. .
. . % Weist den Anteil der verschiedenen Verletzungsgrade
. . % in Abhängigkeit der Unfallschwere zu
. . unfallschwere=delta_eingreifzeit_verletzung+delta_lfz_verletzung...
. . +delta_wetter_verletzung+delta_verletzung_verletzung;
. . % Begrenzt Verletztenquote nach oben und unten
. . if unfallschwere>1;
. . . unfallschwere=1;
. . elseif unfallschwere<-1
. . unfallschwere=-1;
. . end
. . % Normalverteilung für Verletztenverteilung
. . qql=0.375; % Quote leicht/unverletzte Pax (ohne Unfallschwere)
. . qqm=0.225; % Quote mittelschwerer verletzte Pax (ohne Unfallschwere)
. . qqs=0.15; % Quote schwerer verletzte Pax (ohne Unfallschwere)
. . qqt=0.25; % Quote tote Pax (ohne Unfallschwere)
. . % Berechnet die Verletztenverteilung für die aktuelle Unfall-Lage
. . if unfallschwere>0
. . . ql=qql*(1-unfallschwere);
. . . qm=qqm*(1-unfallschwere)+qql*unfallschwere;
. . . qs=qqs*(1-unfallschwere)+qqm*unfallschwere;
. . . qt=qqt+qqs*unfallschwere;
. . elseif unfallschwere<0
. . . ql=qql-qqm*unfallschwere;
. . . qm=qqm*(1+unfallschwere)-qqs*unfallschwere;
```

Anhang

```
. . . qs=qq*(1+unfallschwere)-qqt*unfallschwere;
. . . qt=qqt*(1+unfallschwere);
. . else
. . . ql=qql;
. . . qm=qqm;
. . . qs=qq;
. . . qt=qqt;
. . end
. .
. . % Ermittelt die Quoten für gehunfähige Passagiere
. . bs=0.75^delta_lfz_ungeh; % Gehunfähige, Anteil der
. . % schwer Verletzten (0.75=Real)
. . bm=0.30^delta_lfz_ungeh; % Gehunfähige, Anteil der
. . % mittelschwer Verletzten (0.30=Real)
. . bl=0.05^delta_lfz_ungeh; % Gehunfähige, Anteil der
. . % leicht Verletzten(0.05=Real)
. . fix=delta_lfz_fix; % Anteil der Einklemmten (von den Verletzten)
. .
. . [...]
. .
. . % .....
. . % Parameter zur Ermittlung des Anteils der Führungskräfte
. . fue_faktor=0.7143;
. . fue_abs=0.2857;
. .
. . % Ermittelt Trupp-Anzahl der Phase 1
. . if fw_anzahl1>0;
. . . feuerwehrmaenner1=fue_faktor*fw_anzahl1+fue_abs;
. . . simbafahrer_anzahl1=simba_anzahl1*besatzung_anzahl;
. . . trupp_anzahl1=round((feuerwehrmaenner1-simbafahrer_anzahl1)/2);
. . . fuehrer_anzahl1=fw_anzahl1-2*trupp_anzahl1-simbafahrer_anzahl1;
. . else
. . . fuehrer_anzahl1=0;
. . . trupp_anzahl1=0;
. . % Nächste Zeile ist unnötig (nur zum Verständnis aufgeführt), da fw_anzahl1
. . % gemeint ist und dies das Kriterium für die if-Schleife darstellt.
. . % fw_anzahl=0;
. . end
. . % Ermittelt Trupp-Anzahl der Phase 2
. .
. . [...]
. .
. . % Definiert Feuerwehrleute
. . for fw_zaeher1=1:trupp_anzahl;
. . . % Nummeriert Feuerwehrleute
. . . FwMatrix(fw_zaeher1,1)=fw_zaeher1;
. . . FwMatrix(fw_zaeher1,3)=1;
. . . % Verteilt Angriffstrupps im Bereitstellungsraum
. . . FwMatrix(fw_zaeher1,2)=1+3*floor(feuerwehrverteiler_zaeher1);
. . . feuerwehrverteiler_zaeher1=feuerwehrverteiler_zaeher1+1;
```

Anhang

```
. . . % Verteilt den Parameter für die Türwahl
. . . if feuerwehrverteiler_zaeherl1>tuer_anzahl+0.5;
. . . . feuerwehrverteiler_zaeherl1=1;
. . . end
. . . % Reserve-Modus aktiviert ? => Dann Truppenzahl auf mögl. Reserven prüfen
. . . if fw_reserve==1;
. . . . % Zu viele Trupps vorhanden ?
. . . . % => Dann die Feuerwehrtrupps der Pausen-Matrix kennzeichnen
. . . . if fw_zaeherl1>trupp_anzahl_max
. . . . . FwMatrix(fw_zaeherl1,18)=1;
. . . . . end
. . . . end
. . . % Schreibt Phasen auf
. . . if fw_zaeherl1<trupp_anzahl1+1
. . . . FwMatrix(fw_zaeherl1,5)=phase1_zeit;
. . . elseif fw_zaeherl1<trupp_anzahl1+trupp_anzahl2+1
. . . . FwMatrix(fw_zaeherl1,5)=phase2_zeit;
. . . else
. . . . FwMatrix(fw_zaeherl1,5)=phase3_zeit;
. . . . end
. . . end
. .
. . % Berechnet Feuerwehr-Verzögerung
. . delta_rennen=...
. . delta_eingreifzeit_rennen+delta_sicht_rennen+delta_wetter_rennen;
. . FwMatrix(:,10)=delta_rennen; % Schreibt die aus der Lage resultierende
. . % Feuerwehr-Verzögerung in die FwMatrix
. .
. . % .....
. . % Treppen
. .
. . [...]
. .
. . % .....
. . % Einklemmte (fixierte) Pax
. .
. . % Zählt wieviele Gehunfähige es gibt
. . ungeh_anzahl=sum(PaxMatrix(:,9));
. .
. . % Verteilung der Einklemmten
. . fix_zaeherl=0;
. . fixzufall_vektor=randperm(ungeh_anzahl);
. . fix_anteil=round(ungeh_anzahl*fix);
. . for iff=1:pax
. . . if PaxMatrix(iff,9)==1;
. . . . fix_zaeherl=fix_zaeherl+1;
. . . . if fix_anteil>=fixzufall_vektor(fix_zaeherl);
. . . . . fixgauss=rand(1);
. . . . . if fixgauss<0.05;
. . . . . . fixzeit=1;
. . . . . end
. . . . end
. . . end
. . end
```

Anhang

```
. . . . . elseif fixgauss<0.2;
. . . . . . fixzeit=2;
. . . . . elseif fixgauss<0.5;
. . . . . . fixzeit=3;
. . . . . elseif fixgauss<0.8;
. . . . . . fixzeit=4;
. . . . . elseif fixgauss<0.95;
. . . . . . fixzeit=5;
. . . . . else
. . . . . . fixzeit=6;
. . . . . end
. . . . . % Zeit, die die Feuerwehr zum Aufnehmen (bzw. Befreien) eines
. . . . . % eingeklemmten/fixierten Pax benötigt (Multiplikator "2" wg. Umrechnung
. . . . . % von Minuten auf Sim-Zeiteinheiten)
. . . . . PaxMatrix(iff,10)=2*fixzeit*(8-PaxMatrix(iff,6));
. . . . . end
. . . end
. . end
. .
. . % .....
. . % Evakuierung
. .
. . % Zufallsvariablen, um zu prüfen, ob die Crew selbstständig eine Evakuierung
. . % (ohne Feuerwehr) einleiten
. . evakuierung_zufall_feuer=rand(1);
. . evakuierung_zufall_lfz=rand(1);
. . % Evakuierung durch Crew bei Feuer ? => Auto-Evakuierung "ANschalten"
. . if evakuierung_zufall_feuer<delta_feuer_evakuierung;
. . . evakuierung_auto=1;
. . % Evakuierung durch Crew durch Zustand LFZ ? => Auto-Evakuierung "ANschalten"
. . elseif evakuierung_zufall_lfz<delta_lfz_evakuierung;
. . . evakuierung_auto=1;
. . % Keine Evakuierung ? => Auto-Evakuierung "AUSschalten"
. . else
. . . evakuierung_auto=0;
. . end
. .
. . % =====
. . % BLOCK 4a - DYNAMISCHER ABLAUF - Zählerschleife
. . % =====
. . sim_zaeher=sim_zaeher+1;
. . for zeitzaeher=0:zeitschritt_anzahl; % das "end" steht erst ganz am Ende,
. . . % direkt vor "Auswertung"
. . .
. . . % =====
. . . % BLOCK 4b - DYNAMISCHER ABLAUF - Brennen und Löschen
. . . % =====
. . .
. . . % Löschmaßnahmen der letzten Runde werden zurückgestellt (Pax-Kabine)
. . . Innenwasser(1,:)=0; % Kabine
```

Anhang

```
. . . Innenwasser(4,:)=0; % Fracht
. . . Wasser(:,:)=0;
. . .
. . . % Triebwerk brennt weiter
. . . if sum(TriebwerkMatrix(:,2))>0
. . . . for triebwerk_zaeher2=1:5
. . . . . % Triebwerk wurde lange genug gelöscht ? => Feuer aus
. . . . . if TriebwerkMatrix(triebwerk_zaeher2,9)>=...
. . . . . . TriebwerkMatrix(triebwerk_zaeher2,10)
. . . . . . TriebwerkMatrix(triebwerk_zaeher2,2)=0;
. . . . . . end
. . . . . % Triebwerkbrand hat Durchbrandzeit erreicht ? => Durchbrand
. . . . . if TriebwerkMatrix(triebwerk_zaeher2,3)==...
. . . . . . TriebwerkMatrix(triebwerk_zaeher2,11)+1
. . . . . . Innenfeuer(2,TriebwerkMatrix(triebwerk_zaeher2,12))=...
. . . . . . TriebwerkMatrix(triebwerk_zaeher2,13);
. . . . . . Feuervorlauf(TriebwerkMatrix(triebwerk_zaeher2,15),...
. . . . . . TriebwerkMatrix(triebwerk_zaeher2,14))=...
. . . . . . TriebwerkMatrix(triebwerk_zaeher2,16);
. . . . . . end
. . . . . . % Triebwerk brennt ? => Erhöhe bisherige Brenndauer um +1
. . . . . . if TriebwerkMatrix(triebwerk_zaeher2,2)==1
. . . . . . . TriebwerkMatrix(triebwerk_zaeher2,3)=...
. . . . . . . TriebwerkMatrix(triebwerk_zaeher2,3)+1;
. . . . . . . end
. . . . . . end
. . . . . end
. . . . . end
. . . . .
. . . . % Feuer außen weitet sich aus
. . . . if sum(sum(Feuer))>0; % Wenn größer als Null: Feuer vorhanden
. . . . . for ify=y_feuer_start:y_feuer_ende
. . . . . . for ifx=3:x_feuer_ende
. . . . . . . feuersumme=Feuer(ify, ifx)+Feuer(ify, ifx+1)...
. . . . . . . +Feuer(ify, ifx-1)+Feuer(ify-1, ifx)+Feuer(ify+1, ifx);
. . . . . . . % Feuer in angrenzenden Feldern vorhanden ?
. . . . . . . % => Zufallsvariable für Ausbreitungsprüfung erstellen
. . . . . . . if feuersumme>0
. . . . . . . . feuer_ausbreitung_zufall=rand(1);
. . . . . . . . % Feuerzufallsvariable reicht für Ausbreitung ? => Für das
. . . . . . . . % Feld "Feuer" in der Feuervorlaufmatrix eintragen
. . . . . . . . if feuer_ausbreitung_zufall<feuer_ausbreitung_wahr;
. . . . . . . . . Feuervorlauf(ify,ifx)=1;
. . . . . . . . . end
. . . . . . . . end
. . . . . . . . end
. . . . . . . . end
. . . . . . . end
. . . . . . else
. . . . . . Feuervorlauf=Feuer;
. . . . . . end
. . . . .
```

Anhang

```
. . . % Feuer unter der Kabine (= Zeile 5) ? => Prüfe Durchbrand in den Frachtraum
. . . if Feuer_mitte>0
. . . . for x_aussenfeuer_zaeherl=4:tuer_anzahl+3
. . . . . % Frachtfeuer im Sektor ? => Branddauer um +1 erhöhen
. . . . . if Feuer(5, x_aussenfeuer_zaeherl)==1
. . . . . . Innenfeuer(6, (x_aussenfeuer_zaeherl-3)*3+2)=...
. . . . . . Innenfeuer(6, (x_aussenfeuer_zaeherl-3)*3+2)+1;
. . . . . end
. . . . . % Branddauer für Durchbrand in den Frachtraum erreicht ?
. . . . . % => Durchbrand in den Frachtraum
. . . . . if Innenfeuer(6, (x_aussenfeuer_zaeherl-3)*3+2)>...
. . . . . . durchbrandzeit_aussen_fracht;
. . . . . . Innenfeuer(5, (x_aussenfeuer_zaeherl-3)*3+2)=1;
. . . . . . durchbrand_aussen_fracht=1;
. . . . . . % Branddauer für Durchbrand von Außen in die Pax-Kabine
. . . . . . % überschritten ? => Durchbrand in die Pax-Kabine
. . . . . . if Innenfeuer(6, (x_aussenfeuer_zaeherl-3)*3+2)>...
. . . . . . . durchbrandzeit_aussen_fracht+durchbrandzeit_aussen_innen_zuschlag...
. . . . . . & sum(Innenfeuer(1,:))=0;
. . . . . . . Innenfeuer(2, (x_aussenfeuer_zaeherl-3)*3+2)=1;
. . . . . . . durchbrand_aussen_innen=1;
. . . . . . end
. . . . . . % frachtfeuer_ausbreitung_zaeherl=frachtfeuer_ausbreitung_mittel;
. . . . . . SumInnenfeuer1=sum(Innenfeuer(1,:));
. . . . . . end
. . . . . end
. . . . . SumInnenfeuer4=sum(Innenfeuer(4,:));
. . . . end
. . . .
. . . . % Simbas löschen
. . . . for simba_zaeherl1=1:simba_anzahl
. . . . . if zeitzaeherl>SimbaMatrix(simba_zaeherl1,3)
. . . . . . loeschleistung_simba=loeschleistung;
. . . . . . % Zählt die möglichen Reihen zum Löschen durch
. . . . . . for ily1=5:11
. . . . . . . % Zählt von vorne bis in die max. Tiefe des Feuers
. . . . . . . for ilx1=3:x_feuer_ende
. . . . . . . . % Brennt das aktuelle Feld ?
. . . . . . . . % => Dann versucht der Simba, das Feld zu löschen
. . . . . . . . . if Feuervorlauf(SimbaMatrix(simba_zaeherl1,ily1),ilx1)==1
. . . . . . . . . . Feuervorlauf(SimbaMatrix(simba_zaeherl1,ily1),ilx1)=0;
. . . . . . . . . . Loeschen(SimbaMatrix(simba_zaeherl1,ily1),ilx1)=0;
. . . . . . . . . . Wasser(SimbaMatrix(simba_zaeherl1,ily1),ilx1)=1;
. . . . . . . . . % Simba hat in jedem Fall Wasser verbraucht
. . . . . . . . . SimbaMatrix(simba_zaeherl1,4)=SimbaMatrix(simba_zaeherl1,4)-1;
. . . . . . . . . loeschleistung_simba=loeschleistung_simba-1;
. . . . . . . . end
. . . . . . . . if loeschleistung_simba == 0,break,end
. . . . . . . . if SimbaMatrix(simba_zaeherl1,4) == 0,break,end
. . . . . . . end
. . . . . . end
. . . . . end
```

Anhang

```
. . . . . if loeschleistung_simba == 0,break,end
. . . . . end
. . . . . end
. . . . . end
. . . .
. . . . % Auswirkung des Löschens auf das Feuer
. . . . if zeitzaeher>1
. . . . . Feuer=Feuervorlauf.*Loeschen; % Der Punkt (".") bedeutet: Keine
. . . . . % Matrizenmultiplikation sondern jeweils
. . . . . % Multiplikation der einzelnen Elemente
. . . . . end
. . . . SumAllWasser=sum(sum(Wasser));
. . . . SumAllFeuer=sum(sum(Feuer));
. . . . % Außenfeuer gerade gelöscht (Feuer ist Null, Wasser noch da)?
. . . . % => Türen können (nochmal) von Innen geöffnet werden
. . . . if SumAllWasser>0 & SumAllFeuer==0;
. . . . . tuer_versuch=1;
. . . . . end
. . . .
. . . . [...]
. . . .
. . . . % =====
. . . . % BLOCK 4c - DYNAMISCHER ABLAUF - Türen
. . . . % =====
. . . .
. . . . % Tür-Öffnen wurde schon 1x versucht ? => Dann können es die Paxe nicht mehr
. . . . if tuer_versuch==1;
. . . . . % Feuerwehr anwesend oder Autoevakuierung ?
. . . . . % => Dann mit der Evakuierung beginnen
. . . . . if zeitzaeher>phasel_zeit | evakuierung_auto==1;
. . . . . . % zählt die Türen alle 3 Sektoren ab
. . . . . . for tuer_zaeher2=4:3:letzter_sektor;
. . . . . . . % wechselt zwischen links und rechts
. . . . . . . for tuer_zaeher3=2:3;
. . . . . . . . % Definiert (nach Zufallszahl) die offenen Türen
. . . . . . . . tuer_zufall=rand(1);
. . . . . . . . if tuer_wahr>tuer_zufall
. . . . . . . . . % Kein Feuer in der Mitte? => Dann Seiten auf Feuer prüfen
. . . . . . . . . if Feuer_mitte==0
. . . . . . . . . . % Feuer auf der aktuellen Türseite aus/nicht vorhanden ?
. . . . . . . . . . % => Rutschen raus
. . . . . . . . . . if (tuer_zaeher3==2 & Feuer_links==0) | ...
. . . . . . . . . . (tuer_zaeher3==3 & Feuer_rechts==0)
. . . . . . . . . . . TuerMatrix(tuer_zaeher2,tuer_zaeher3)=1;
. . . . . . . . . . . end
. . . . . . . . . . . end
. . . . . . . . . . . end
. . . . . . . . . . . end
. . . . . . . . . . . % Tür ist noch verschlossen ? => Dann kann Feuerwehr versuchen,
. . . . . . . . . . . % Tür von Innen zu öffnen
. . . . . . . . . . . if TuerMatrix(tuer_zaeher2,tuer_zaeher3)==1;
```

Anhang

```
. . . . . TuerMatrix(tuer_zaeher2,tuer_zaeher3+13)=0;
. . . . . end
. . . . . end
. . . . . end
. . . . . % Setzt den Tür-Versuchszähler auf "0", damit nur einmal Türöffnung
. . . . . % durch Pax versucht wird
. . . . . tuer_versuch=0;
. . . . . end
. . . end
. . .
. . . [...]
. . .
. . . % =====
. . . % BLOCK 4d - DYNAMISCHER ABLAUF - Pax
. . . % =====
. . .
. . . if zeitzaeher>0;           % Setzt Aktionen für die Runde 0 aus
. . . . . TuerMatrix(:,13:14)=0; % Setzt die Zahl der Paxe, die durch eine Tür
. . . . .                               % gegangen sind, wieder auf Null
. . . . . SektorMatrix(:,8)=0;    % Setzt die Sektoren mit Panik wieder auf null
. . . . . % Keine Panik ? => Ermittelt, ob eine Panik eintritt
. . . . . if panik==0;
. . . . . . . panik_zufall=rand(1);
. . . . . . . % Brennt es (seltenes) ? => Dann überprüfe Panik aufgrund von Feuer
. . . . . . . if SumInnenfeuer1+Feuer_links+Feuer_mitte+Feuer_rechts>0;
. . . . . . . . . % Innenfeuer
. . . . . . . . . if SumInnenfeuer1>1;
. . . . . . . . . . . panik_innenfeuer=panikwert_innenfeuer*2;
. . . . . . . . . . . elseif SumInnenfeuer1>0
. . . . . . . . . . . . . panik_innenfeuer=panikwert_innenfeuer;
. . . . . . . . . . . end
. . . . . . . . . % Außenfeuer
. . . . . . . . . if SumFeuer>panik_aussenfeuer_flaeche;
. . . . . . . . . . . panik_aussenfeuer=panikwert_aussenfeuer*2;
. . . . . . . . . . . elseif SumFeuer>0
. . . . . . . . . . . . . panik_innenfeuer=panikwert_aussenfeuer;
. . . . . . . . . . . end
. . . . . . . end
. . . . . . end
. . . . . .
. . . . . . % Addiert die Einzelwahrscheinlichkeiten für Panik
. . . . . . paniksumme=panik_innenfeuer+panik_aussenfeuer+panik_rauch+panik_normal;
. . . . . . if panik_zufall<paniksumme;
. . . . . . . . . panik=1*panik_ausschalter;
. . . . . . . end
. . . . . . end
. . . . .
. . . . . % Paßt den Türdurchfluß (an Pax'en) der Lage (Panik oder nicht) an
. . . . . if panik==0;
. . . . . . . tuerdurchfluss_max=tuerdurchfluss_normal;
. . . . . else
```


Anhang

```
. . . . . tuerdurchfluss_max=tuerdurchfluss_panic;
. . . . . end
. . . . .
. . . . . % Schleife für alle Paxe
. . . . . for ip=1:pax
. . . . . . % Nicht tot(7), gehunfähig(9) oder eingeklemmt(10) ? => Paxe handeln
. . . . . . if PaxMatrix(ip,7)==0 & PaxMatrix(ip,9)==0 & PaxMatrix(ip,10)==0;
. . . . . . . % Pax sind aus dem Flugzeug draussen ? => Pax laufen zur Sammelfläche
. . . . . . . if PaxMatrix(ip,3)==3 | PaxMatrix(ip,3)==5;
. . . . . . . . PaxMatrix(ip,3)=1;
. . . . . . . end
. . . . . . . % Prüft Verwirrung in Folge des Brandrauches
. . . . . . . if PaxMatrix(ip,14)==1;
. . . . . . . . wirr_zufall=rand(1);
. . . . . . . else
. . . . . . . . wirr_zufall=1;
. . . . . . . end
. . . . . . . % Pax sind noch im Flugzeug und nicht (vollständig) verwirrt ?
. . . . . . . % => Dann flüchten und LFZ verlassen
. . . . . . . if PaxMatrix(ip,3)==4 & wirr_zufall>wirr_wahr % Im Flugzeug ?
. . . . . . . . % Zwei Türen offen ? => Pax nimmt jeweils die richtige
. . . . . . . . if TuerMatrix(PaxMatrix(ip,2),18)==2;
. . . . . . . . . % Türverteiler ist 1 (= links) => Pax versucht linke Tür
. . . . . . . . . if PaxMatrix(ip,4)==1;
. . . . . . . . . . % Maximaler Türdurchfluß links noch nicht erreicht ?
. . . . . . . . . . % => Dann links raus
. . . . . . . . . . if tuerdurchfluss_max>TuerMatrix(PaxMatrix(ip,2),13);
. . . . . . . . . . . PaxMatrix(ip,3)=3;
. . . . . . . . . . . TuerMatrix(PaxMatrix(ip,2),13)=...
. . . . . . . . . . . TuerMatrix(PaxMatrix(ip,2),13)+1;
. . . . . . . . . . . SektorMatrix(PaxMatrix(ip,2),7)=...
. . . . . . . . . . . SektorMatrix(PaxMatrix(ip,2),7)-1;
. . . . . . . . . . . % Maximaler Türdurchfluß rechts noch nicht erreicht ?
. . . . . . . . . . . % => Dann rechts raus
. . . . . . . . . . . elseif tuerdurchfluss_max>TuerMatrix(PaxMatrix(ip,2),14);
. . . . . . . . . . . . PaxMatrix(ip,3)=5;
. . . . . . . . . . . . TuerMatrix(PaxMatrix(ip,2),14)=...
. . . . . . . . . . . . TuerMatrix(PaxMatrix(ip,2),14)+1;
. . . . . . . . . . . . SektorMatrix(PaxMatrix(ip,2),7)=...
. . . . . . . . . . . . SektorMatrix(PaxMatrix(ip,2),7)-1;
. . . . . . . . . . . . % Türdurchfluß zu groß => Pax bleibt wo er ist
. . . . . . . . . . . . else
. . . . . . . . . . . . . SektorMatrix(PaxMatrix(ip,2),8)=1;
. . . . . . . . . . . . . end
. . . . . . . . . . . . % Türverteiler ist 0 (= rechts)
. . . . . . . . . . . . % => Pax versucht es bei rechter Tür
. . . . . . . . . . . . else
. . . . . . . . . . . . . . [...]
. . . . . . . . . . . . . end
. . . . . . . . . . . . end
. . . . . . . . . . . . end
```

Anhang

```
[...]
% Kein Feuerwehrmann an der Rutsche vorhanden ?
% => Verletzungsrisiko steigt
if FwOrtMatrix(PaxMatrix(ip,3),PaxMatrix(ip,2),1)==0;
    % Erzeugt ZufallsVar, um zu prüfen, ob Verletzung stattfindet
    rutschverletzung_zufall=rand(1);
    if rutschverletzung_zufall < rutschverletzung_wahr
        PaxMatrix(ip,5)=PaxMatrix(ip,5)-1;
    end
end
end
[...]
% Nicht an einer Tür => Pax läuft zur Tür
else
    % Innenfeuer vorhanden ? => Dann vorm Feuer weglaufen
    if SumInnenfeuer1>0;
        % Abstand zum Feuer (bzw. Außenhitze) ist hinten größer und
        % Pax ist nicht ganz hinten? => Pax läuft nach hinten
        if Innenfeuer(9,PaxMatrix(ip,2))>Innenfeuer...
            (8,PaxMatrix(ip,2)) & PaxMatrix(ip,2)<letzter_sektor;
            % Ist im Zielsektor noch genug Platz für neue Pax ?
            % => Dann in den Sektor rein
            if sektorpax_max>SektorMatrix(PaxMatrix(ip,2)+1,7);
                SektorMatrix(PaxMatrix(ip,2),7)=...
                SektorMatrix(PaxMatrix(ip,2),7)-1;
                PaxMatrix(ip,2)=PaxMatrix(ip,2)+1;
                SektorMatrix(PaxMatrix(ip,2),7)=...
                SektorMatrix(PaxMatrix(ip,2),7)+1;
            % Kein Platz mehr für Pax ?
            % => Dann Sektor für Prüfung auf Paniktote vormerken
        else
            SektorMatrix(PaxMatrix(ip,2)+1,8)=1;
        end
    % Kein Feuer oder Abstand zum Feuer (bzw. Außenhitze) ist
    % vorne größer/gleich ? => Pax läuft nach vorne
elseif PaxMatrix(ip,2)>4;
    if sektorpax_max>SektorMatrix(PaxMatrix(ip,2)-1,7);
        SektorMatrix(PaxMatrix(ip,2),7)...
        =SektorMatrix(PaxMatrix(ip,2),7)-1;
        PaxMatrix(ip,2)=PaxMatrix(ip,2)-1;
        SektorMatrix(PaxMatrix(ip,2),7)...
        =SektorMatrix(PaxMatrix(ip,2),7)+1;
    % Kein Platz mehr für Pax ?
    % => Dann Sektor für Prüfung auf Paniktote vormerken
    else
        SektorMatrix(PaxMatrix(ip,2)-1,8)=1;
    end
end
end
```


Anhang

```
. . . . .
. . . . end % Ende der Pax-Schleife
. . . end % Ende der "ohne Runde Null"-Abfrage
. . .
. . . % =====
. . . % BLOCK 4e - DYNAMISCHER ABLAUF - Rettungstreppe
. . . % =====
. . .
. . . % Zählt alle Rettungstreppen durch
. . . for treppen_zaeherl1=1:treppen_anzahl
. . . . % Sind Treppen schon vor Ort ? => Aktion !
. . . . if zeitzaehler>TreppenMatrix(treppen_zaeherl1,4)
. . . . . % Ist die Treppe noch frei ? => Dann Feste Position suchen
. . . . . if TreppenMatrix(treppen_zaeherl1,6)==0;
. . . . . . % Außenfeuer am LFZ ist aus ? => Dann fahren Treppen rann
. . . . . . if Feuer_mitte==0;
. . . . . . . % Position frei (keine Rutsche vorhanden) oder bereits alle
. . . . . . . % Rutschen draußen? => Treppe hier hinstellen
. . . . . . .
. . . . . . . [...]
. . . . . . .
. . . . . . . % Position frei (keine Rutsche vorhanden) oder bereits alle
. . . . . . . % Rutschen draußen? => Treppe hier hinstellen
. . . . . . . if TuerMatrix(treppen_zaeherl3,treppen_zaeherl2)==0 |...
. . . . . . . tuer_ohne_fluegel_anzahl==tuer_ohne_fluegel_max;
. . . . . . . . % Trägt in der TuerMatrix ein, welche Treppe (Nr.)
. . . . . . . . % hier positioniert wird
. . . . . . . . TuerMatrix(treppen_zaeherl3,treppen_zaeherl2+4)...
. . . . . . . . =treppen_zaeherl1;
. . . . . . . . % Löscht die ggf. vorhandene Rutsche aus der TuerMatrix
. . . . . . . . TuerMatrix(treppen_zaeherl3,treppen_zaeherl2)=0;
. . . . . . . . % Trägt alle Werte (x,y,Rüstzeit-Beginn) in die
. . . . . . . . % TreppenMatrix ein
. . . . . . . . TreppenMatrix(treppen_zaeherl1,2)=treppen_zaeherl3;
. . . . . . . . TreppenMatrix(treppen_zaeherl1,3)=5-(3-treppen_zaeherl2)*2;
. . . . . . . . TreppenMatrix(treppen_zaeherl1,6)=1;
. . . . . . . end
. . . . . end
. . . . end
. . . . end
. . . end

. . . . . % Treppe hat Position gefunden ? => Rüstzeit runterzählen
. . . . . elseif TreppenMatrix(treppen_zaeherl1,6)==1;
. . . . . . % Rüstzeit noch nicht vorbei ? => Rüstzeit runterzählen
. . . . . . if TreppenMatrix(treppen_zaeherl1,5)>1
. . . . . . . TreppenMatrix(treppen_zaeherl1,5)=...
. . . . . . . TreppenMatrix(treppen_zaeherl1,5)-1;
. . . . . . else
. . . . . . . TreppenMatrix(treppen_zaeherl1,5)=0;
```

Anhang

```
. . . . . TreppenMatrix(treppen_zaeher1,6)=2;
. . . . . end
. . . . . % Treppe steht ? => Treppe ist einsatzbereit
. . . . . % (und wird dafür in der TuerMatrix umgeschrieben)
. . . . . elseif TreppenMatrix(treppen_zaeher1,6)==2;
. . . . . . TuerMatrix(TreppenMatrix(treppen_zaeher1,2),11...
. . . . . . +(TreppenMatrix(treppen_zaeher1,3)-3)*0.5)=treppen_zaeher1;
. . . . . . end
. . . . . end
. . . . . end

. . . . . % =====
. . . . . % BLOCK 4f - DYNAMISCHER ABLAUF - Angriffstrupp
. . . . . % =====

. . . . . % Löscht alte Werte der vorherigen Runde
. . . . . FwOrtMatrix(:, :, 2)=0; % 2. Ebene, Trupps mit Ungpax
. . . . . FwOrtMatrix(:, :, 3)=0; % 3. Ebene, Trupps mit Verzögerung ohne Ungpax
. . . . . FwOrtMatrix(:, :, 5)=0; % 5. Ebene, Ung-Pax auf Rutsche
. . . . . FwOrtMatrix(:, :, 7)=0; % 7. Ebene, Trupps beim Löschen
. . . . . FwOrtMatrix(:, :, 9)=0; % 9. Ebene, Trupps mit Verzögerung mit Ungpax
. . . . . FwMatrix(:, 9)=0; % Löscht die alten Verzögerungen
. . . . . aktiv_zaeher=0; % Löscht die Anzahl der aktiven Trupps der Vorrunde

. . . . . % Begrenzt die Türöffnungszeit auf eine pro Runde
. . . . . FrachttuerMatrix(:, 3)=1;

. . . . . % Ermittelt aktuelle Anzahl an Feuerwehr-Trupps
. . . . . if zeitzaeher>phase3_zeit;
. . . . . . aktuelle_trupp_anzahl=trupp_anzahl1+trupp_anzahl2+trupp_anzahl3;
. . . . . elseif zeitzaeher>phase2_zeit;
. . . . . . aktuelle_trupp_anzahl=trupp_anzahl1+trupp_anzahl2;
. . . . . elseif zeitzaeher>phase1_zeit;
. . . . . . aktuelle_trupp_anzahl=trupp_anzahl1;
. . . . . else
. . . . . . aktuelle_trupp_anzahl=0; %trupp_anzahl1;
. . . . . end

. . . . . % Schleife für alle (Angriff-) Trupps (Fw-Zähler-Schleife)
. . . . . for fw_zaeher=1:trupp_anzahl;
. . . . . . % Feuerwehrmänner kommen gerade an ? => Am Fahrzeug antreten
. . . . . . if zeitzaeher==FwMatrix(fw_zaeher,5);
. . . . . . . FwOrtMatrix(FwMatrix(fw_zaeher,3),FwMatrix(fw_zaeher,2),1)...
. . . . . . . =FwOrtMatrix(FwMatrix(fw_zaeher,3),FwMatrix(fw_zaeher,2),1)+1;
. . . . . . % Anzahl Trupps ist größer als notwendig UND Reserve-Modus aktiv ?
. . . . . . % => Dann Reserve für Pause bilden
. . . . . . elseif zeitzaeher==FwMatrix(fw_zaeher,5)+1 & FwMatrix(fw_zaeher,18)...
. . . . . . =1 & fw_reserve==1;
. . . . . . . FwOrtVektor(FwMatrix(fw_zaeher,2))...
. . . . . . . =FwOrtVektor(FwMatrix(fw_zaeher,2))+1;
```

Anhang

```
. . . . . FwOrtMatrix(FwMatrix(fw_zaeher,3),FwMatrix(fw_zaeher,2),1)...
. . . . . =FwOrtMatrix(FwMatrix(fw_zaeher,3),FwMatrix(fw_zaeher,2),1)-1;
. . . . . % Sind Feuerwehrmänner schon in der aktuellen Phase ? => Aktion
. . . . . elseif zeitzaehler>FwMatrix(fw_zaeher,5)
. . . . . . % Sind Feuerwehrmänner noch einsatzbereit (= nicht erschöpft)
. . . . . . % und NICHT in der Wechsellpause ?
. . . . . . if FwMatrix(fw_zaeher,18)~=1;
. . . . . . . FwMatrix(fw_zaeher,12)=FwMatrix(fw_zaeher,12)+1;
. . . . . . . % Wird PA gewechselt ? => Dann Warten bis PA-Wechsel fertig ist
. . . . . . . if FwMatrix(fw_zaeher,12)<1;
. . . . . . . . % Keine Handlung, da der PA gewechselt wird (Zeit dafür wird
. . . . . . . . % direkt vor dieser Abfrage berücksichtigt)
. . . . . . . . % PA wird nicht gewechselt ?
. . . . . . . . % => Trupp ist einsatzbereit und PA-Zeit läuft ab
. . . . . . . else
. . . . . . . . % Verzögerung durch "zuviel" Feuerwehrmänner im Flugzeug und
. . . . . . . . % Erschöpfung ? => Dann Verzögerung überprüfen
. . . . . . . . fw_zufall=round(rand(1)*100);
. . . . . . . . % Ist Verzögerungszahl größer Zufallszahl ?
. . . . . . . . % => Schreibt Verzögerungsmerker in die FwMatrix
. . . . . . . . if FwMatrix(fw_zaeher,10)>fw_zufall;
. . . . . . . . . FwMatrix(fw_zaeher,9)=1;
. . . . . . . . end
. . . . . . . . % Verzögerung durch zuviele Trupps oder Erschöpfung ?
. . . . . . . . % => Dann eine Runde aussetzen und Pause in der FwOrtMatrix
. . . . . . . . if FwMatrix(fw_zaeher,9)==1;
. . . . . . . . . [...]
. . . . . . . . . % Verzögerung ohne Ungpax ?
. . . . . . . . . if FwMatrix(fw_zaeher,7)==0;
. . . . . . . . . . % Auf einer Rutsche, behindert, ohne Ungpax ?
. . . . . . . . . . % => Dann Eintrag in FwOrtMatrix, Ebene 4 mit "3"
. . . . . . . . . . if FwMatrix(fw_zaeher,6)==1;
. . . . . . . . . . . FwOrtMatrix(FwMatrix(fw_zaeher,3)...
. . . . . . . . . . . ,FwMatrix(fw_zaeher,2),4)=3;
. . . . . . . . . . . FwOrtMatrix(FwMatrix(fw_zaeher,3)...
. . . . . . . . . . . % Nicht auf einer Rutsche, behindert, ohne Ungpax
. . . . . . . . . . . else
. . . . . . . . . . . . FwOrtMatrix(FwMatrix(fw_zaeher,3),FwMatrix(...
. . . . . . . . . . . . fw_zaeher,2),3)=FwOrtMatrix(FwMatrix(fw_zaeher,3),...
. . . . . . . . . . . . FwMatrix(fw_zaeher,2),3)+1;
. . . . . . . . . . . . end
. . . . . . . . . . . % Verzögerung mit Ungpax (nicht auf der Rutsche) ?
. . . . . . . . . . . else
. . . . . . . . . . . . % Auf einer Rutsche, behindert, mit Ungpax ?
. . . . . . . . . . . . % => Dann Eintrag in FwOrtMatrix, Ebene 4 mit "4"
. . . . . . . . . . . . if FwMatrix(fw_zaeher,6)==1;
. . . . . . . . . . . . . FwOrtMatrix(FwMatrix(fw_zaeher,3)...
. . . . . . . . . . . . . . ,FwMatrix(fw_zaeher,2),4)=4;
. . . . . . . . . . . . . . ,FwMatrix(fw_zaeher,2),5)=1;
. . . . . . . . . . . . . % Nicht auf einer Rutsche, behindert, mit Ungpax ?
```


Anhang

```
. . . [...]
. . .
. . . % =====
. . . % BLOCK 5 - GRAPHISCHE AUSGABE
. . . % =====
. . . if graphik==1 %& zeitzaeher>10; % Abfrage ob Graphik erwünscht ist
. . . % =====
. . .
. . . [...]
. . .
. . . [Anmerkung: Der Block 5 dient nur der Visualisierung mit dem Ziel, die
. . . . einzelnen Simulationsschritte besser überblicken und
. . . . nachvollziehen zu können. Die rechnerischen Ergebnisse bleiben
. . . . davon unberührt. Daher wird der Code für diesen Block nicht näher
. . . . dargestellt.]
. . . .
. . . . % =====
. . . . end % Ende der Abfrage "graphische Darstellung gewünscht?"
. . . . % =====
. . . . % 6 - ERGEBNIS-AUSGABE
. . . . % =====
. . . .
. . . . SumSektorMatrix_Tot=sum(SektorMatrix(:,4));
. . . . end_summe=pax-SumSammelplatz-SumSektorMatrix_Tot;
. . . .
. . . . [...]
. . . .
. . . . % Ist die Simulation abgeschlossen oder sind Zwischenergebnisse
. . . . % gewünscht ? => Pax-Verlust berechnen
. . . . if zeitzaeher==zeitschritt_anzahl | zwischenergebnis==1 | ...
. . . . end_summe==0;
. . . . % .....
. . . . % Berechnet die Überlebenswahrscheinlichkeit der einzelnen Paxe
. . . . . for pax_zaeher3=1:pax
. . . . . . % Pax ist NICHT tot ?
. . . . . . % => Weiter in der Berechnung der Überlebenswahrscheinlichkeit
. . . . . . if PaxMatrix(pax_zaeher3,7)==0
. . . . . . . % Pax ist leicht verletzt oder Verletzungszeit hat noch nicht
. . . . . . . % begonnen ? => Pax überlebt mit Anfangsüberlebenswahrscheinlichkeit
. . . . . . . . if PaxMatrix(pax_zaeher3,6)==7 | PaxMatrix(pax_zaeher3,8)...
. . . . . . . . /2<UeberlebensMatrix(1,PaxMatrix(pax_zaeher3,6));
. . . . . . . . . PaxVektor(pax_zaeher3,2)=...
. . . . . . . . . uberlebenanfang(PaxMatrix(pax_zaeher3,6));
. . . . . . . . % Verletzungszeit ist abgelaufen ? => Pax ist (doch) tot
. . . . . . . . elseif PaxMatrix(pax_zaeher3,8)/2>...
. . . . . . . . UeberlebensMatrix(1,PaxMatrix(pax_zaeher3,6))+...
. . . . . . . . UeberlebensMatrix(2,PaxMatrix(pax_zaeher3,6));
. . . . . . . . . PaxVektor(pax_zaeher3,2)=0;
. . . . . . . . . PaxMatrix(pax_zaeher3,7)=1; % 1 = "tot"
. . . . . . . . . PaxMatrix(pax_zaeher3,15)=5; % "5" für Tod durch
```

Anhang

```
. . . . . % Verletzung (= med)
. . . . . % Pax ist als gehunfähig markiert ? => Setzt Gehunfähigkeit
. . . . . % auf Null, damit Sektormatrix richtig rechnet
. . . . . if PaxMatrix(pax_zaeher3,9)==1;
. . . . . . PaxMatrix(pax_zaeher3,9)=0;
. . . . . end
. . . . . % Verletzungszeit läuft ?
. . . . . % => Überlebenschance gemäß Hochrechnung
. . . . . else
. . . . . . PaxVektor(pax_zaeher3,2)=...
. . . . . . (100*0.5*(1+cos((1/UeberlebensMatrix...
. . . . . . (2,PaxMatrix(pax_zaeher3,6)))*(PaxMatrix(pax_zaeher3,8)*0.5...
. . . . . . -UeberlebensMatrix(1,PaxMatrix(pax_zaeher3,6))*pi));
. . . . . end
. . . . . end
. . . . . end
. . . . . % Überträgt Werte für Gesundheitszustand in die PaxMatrix
. . . . . PaxMatrix(:,5)=round(PaxVektor(:,2));
. . . . .
. . . . . % Berechnet Einsatzerfolg
. . . . . SumPaxVektor=sum(PaxVektor(:,2));
. . . . . SumPaxMatrix(5)=round(SumPaxVektor);
. . . . . einsatzerfolg=(round(SumPaxVektor/pax*10))/10;
. . . . . anfangsverlust=(round(sum_anfangsverlust/pax*1000))/10;
. . . . . einsatzverlust=100-einsatzerfolg-anfangsverlust;
. . . . . UE_Rate=(round(SumPaxVektor/pax*100))/100;
. . . . . [...]
. . . . end
. . . . % =====
. . . . % 6b - Ausgabe der gewünschten Werte
. . . . % =====
. . . .
. . . . % Gibt die Zeit aus
. . . . if Gibt_Zeit_aus==1;
. . . . . fprintf('Zeitpunkt: %d\n\n',zeitzaehler)
. . . . end
. . . .
. . . . % .....
. . . . % Gibt Feuer aus
. . . . if Gibt_Feuer_aus==1
. . . . . disp('__Feuer__')
. . . . . disp(Feuer)
. . . . . disp(' ')
. . . . end
. . . .
. . . . [...]
. . . .
. . . . % =====
. . . . % BLOCK 7 - ENDE DER SIMULATIONSSCHLEIFE (für die Abläufe nach dem Unfall)
. . . . % =====
```

Anhang

```
. . .
. . . [...]
. . .
. . . % Vorzeitiger Abbruch der Sim gewünscht (wenn auto_end=1) ?
. . . % => Abfrage für vorzeitigen Abbruch durchführen
. . . if auto_end==1;
. . . . if end_summe==0,break,end
. . . . end
. . . end % Ende der Hauptzählerschleife (Zeit-Schleife)
. .
. . % =====
. . % BLOCK 8 - AUSWERTUNG DER PARAMETERSCHLEIFE
. . % =====
. .
. . % Addiert den bisherigen Einsatzerfolg um Wert des aktuellen Durchlaufs
. . ErfolgMatrix-fw_zaeher0,2,varianten_zaeher-fw3_zaeher)=...
. . ErfolgMatrix-fw_zaeher0,2,varianten_zaeher-fw3_zaeher)...
. . +round(UE_Rate*100);
. . [...]
. .
. . % =====
. . % BLOCK 8b - ENDE DER PARAMETERSCHLEIFE
. . % =====
. . end % Ende der Parameter-Schleife
. . % =====
. .
. . % Berechnet den Mittelwert für jede Feuerwehrmann-Anzahl-Variante
. . % Einsatzerfolg
. . ErfolgMatrix-fw_zaeher0,2,varianten_zaeher-fw3_zaeher)=...
. . ErfolgMatrix-fw_zaeher0,2,varianten_zaeher-fw3_zaeher)/...
. . parameterschleifen_anzahl;
. .
. . [...]
. .
. . % =====
. . % BLOCK 8c - ENDE
. . % =====
end % Ende der Feuerwehr-Anzahl-Schleife
% =====

[...]
```

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1	- Präventive und operative Schadensbegrenzung.....	5
Abbildung 2	- Unfallrate in der zivilen Luftfahrt 1955 bis 2011	6
Abbildung 3	- Unfallrate in der zivilen Luftfahrt 1986 bis 2011	7
Abbildung 4	- Ursachen von Flugzeugunfällen mit tödlich Verunglückten	8
Abbildung 5	- Zeitliche Verteilung von Flugzeugunfällen.....	9
Abbildung 6	- Klassifizierung von Flugplätzen in Deutschland.....	21
Abbildung 7	- Risiko von „Tod durch Stromunfälle“	26
Abbildung 8	- Mathematische Ansätze zur Risikoermittlung.....	27
Abbildung 9	- Vergleich der Größenordnung eines Flugzeugunfalls	28
Abbildung 10	- Einflussgrößen des Einsatzerfolges.....	29
Abbildung 11	- Einsatzoptionen und -abläufe.....	30
Abbildung 12	- Aufstellung der Flughafenlöschfahrzeuge bei einem Fahrzeug	32
Abbildung 13	- Aufstellung der Flughafenlöschfahrzeuge bei zwei Fahrzeugen.....	33
Abbildung 14	- Aufstellung der Flughafenlöschfahrzeuge bei drei Fahrzeugen	33
Abbildung 15	- Aufstellung der Flughafenlöschfahrzeuge bei Fahrwerk- und Triebwerksbrand	34
Abbildung 16	- Zustände und Vorgänge am Beispiel „Reifenwechsel“	38
Abbildung 17	- Detaillierte Darstellung des Vorgangs „Reifenwechsel“	39
Abbildung 18	- Fehlerbaumanalyse	41
Abbildung 19	- Ereignisablaufanalyse	42
Abbildung 20	- Zusammenhang Fehlerbaum- und Ereignisablaufanalyse.....	43
Abbildung 21	- Schematische Darstellung eines Reaktors.....	45
Abbildung 22	- Morphologischer Kasten / Zwicky-Box.....	48
Abbildung 23	- Darstellung nicht-orthogonaler Strukturen in einem Rastersystem.....	51
Abbildung 24	- Zellulärer Automat „Wator“	53
Abbildung 25	- Elemente der kybernetischen Risikoanalyse.....	62
Abbildung 26	- Wechselwirkung zwischen den dynamischen Elementen	63
Abbildung 27	- Wirkung der statischen Elemente	64
Abbildung 28	- Systematik der Computersimulation.....	69
Abbildung 29	- Übergang von verschiedenen Betriebszuständen.....	72
Abbildung 30	- Exemplarische Darstellung der Abläufe nach Eintritt eines Flugzeugunfalls.....	79
Abbildung 31	- Aufteilung der Außenfläche.....	83
Abbildung 32	- Grundelement des Flugzeugaufbaus in der Simulation.....	84
Abbildung 33	- Systematik des Flugzeugaufbaus in der Simulation.....	85

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 34	- Aufteilung eines 3-türigen Flugzeugs in Abschnitte und Sektoren	86
Abbildung 35	- Aufteilung eines 5-türigen Flugzeugs in Abschnitte und Sektoren	87
Abbildung 36	- Verteilung der Verletzungsmuster nach NFPA.....	101
Abbildung 37	- Verteilung der Verletzungsmuster in der Simulation.....	105
Abbildung 38	- Überlebenschance und Verteilung der Überlebenszeit bei lebensbedrohlichen Verletzungen bis zum Eintritt der medizinischen Versorgung.....	107
Abbildung 39	- Basiskurve „Überleben“.....	108
Abbildung 40	- Überlebenswahrscheinlichkeit in Abhängigkeit von Zeit und Verletzungsgrad	110
Abbildung 41	- Verteilung gehunfähiger Personen in Abhängigkeit von dem Verletzungsgrad.....	112
Abbildung 42	- Verteilung des Befreiungszeitfaktors bei der Rettung gehunfähiger Personen	114
Abbildung 43	- Passagiervektor	115
Abbildung 44	- Struktur des Einsatzablaufs	117
Abbildung 45	- Einsatzkräfte – organisatorische Herkunft und Einsatzfunktionen.....	123
Abbildung 46	- Organigramm bei vorbildlicher Anwendung der „2-bis-5er-Regel“	124
Abbildung 47	- Organigramme mit unterschiedlicher Führungsspanne.....	125
Abbildung 48	- Wahrscheinlichkeit und Erwartungswert für eine Unterbrechung der Tätigkeit infolge mehrerer Trupps in einem Sektor.....	131
Abbildung 49	- Einsatzkraftvektor.....	138
Abbildung 50	- Modell der Brandausbreitung bei einem Flächenbrand	147
Abbildung 51	- Feuerwiderstandswerte des Flugzeugs	148
Abbildung 52	- Brandausbreitung bei einem Kabinenbrand	153
Abbildung 53	- Verbrauch an Jet A1 (Kerosin) und AvGas (Flugbenzin) am Flughafen Frankfurt/Main	172
Abbildung 54	- Verteilung der Unfälle im Start- und Landebahnsystem.....	187
Abbildung 55	- Anteil der Flugbewegungen im Tagesverlauf (beispielhafte Verteilung).....	190
Abbildung 56	- Modelle zur Veränderung der Verletzungsverteilung.....	196
Abbildung 57	- Veränderung der Verletzungsverteilung mit dem Modell „Verschiebung durch alle Klassen“	198
Abbildung 58	- Vergleich des Zeitbedarfs bei Abläufen in Richtung der Nummerierung der Passagiere und bei entgegengesetzter Nummerierung (1)	200
Abbildung 59	- Vergleich des Zeitbedarfs bei Abläufen in Richtung der Nummerierung der Passagiere und bei entgegengesetzter Nummerierung (2)	201
Abbildung 60	- Systematik der Nummerierung der Passagiere	202
Abbildung 61	- Vergleich der Truppanzahl je Sektor vor und nach einer Zeiteinheit (1).....	206

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 62	- Vergleich der Truppanzahl je Sektor vor und nach einer Zeiteinheit (2)	207
Abbildung 63	- Ausbreitung eines Brandes bei dem Kriterium „Entzündung bei Feuer im angrenzenden Feld“ OHNE Vorlauf-Matrix.....	209
Abbildung 64	- Ausbreitung eines Brandes bei dem Kriterium „Entzündung bei Feuer im angrenzenden Feld“ MIT Vorlauf-Matrix	210
Abbildung 65	- Einsatzerfolg in Abhängigkeit von der Anzahl der Einsatzkräfte	212
Abbildung 66	- Zuwachs des Einsatzerfolgs in Abhängigkeit von der Anzahl der Einsatzkräfte.....	213
Abbildung 67	- Einsatzerfolg in Abhängigkeit von der Anzahl der Einsatzkräfte	214
Abbildung 68	- Benötigte Einsatzkräfte in Abhängigkeit von der Anzahl zusätzlich geretteter Passagiere	214
Abbildung 69	- Einsatzerfolg in Wahrscheinlichkeitsverläufen.....	215
Abbildung 70	- Intervalle "Anteil geretteter Passagiere"	217
Abbildung 71	- Einsatzerfolg in Wahrscheinlichkeitskorridoren.....	218
Abbildung 72	- Hochrechnung des durchschnittlichen Einsatzerfolges	221
Abbildung 73	- Einsatzerfolg in Abhängigkeit von der Anzahl an Einsatzkräften.....	224
Abbildung 74	- Einsatzerfolg unter Berücksichtigung externer Einsatzkräfte	226

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1	- Mindestanforderung an Löschmittel und -technik nach ICAO.....	12
Tabelle 2	- Flughafen-Kategorien nach ICAO.....	13
Tabelle 3	- Gewinnerwartung beim Roulettespiel.....	25
Tabelle 4	- Aufstellung der Flughafenlöschfahrzeuge.....	32
Tabelle 5	- Bauteile und Fehlerfolgen des Beispiel-Reaktors.....	46
Tabelle 6	- Faktoren der Risikopotenzialzahl bei der Ausfalleffektanalyse / FMEA.....	47
Tabelle 7	- Relevanz von Einsatzlagen in Abhängigkeit von Ereignis und Standort.....	74
Tabelle 8	- Klassifizierung von Flugzeugen für die Simulation.....	82
Tabelle 9	- Entfluchtungskapazität von Flugzeugtüren.....	89
Tabelle 10	- Maximale Passagieranzahl in einem Sektor.....	92
Tabelle 11	- Wahrscheinlichkeiten für die Einleitung einer Evakuierung.....	94
Tabelle 12	- Triage-Kategorien.....	100
Tabelle 13	- Tote bei Flugzeugunfällen, Anzahl und Anteil.....	102
Tabelle 14	- Herleitung der Verletzungsverteilung.....	104
Tabelle 15	- Verteilung der Verletzungsgrade in der Simulation bei Differenzierung der Kategorien S1 und S2.....	106
Tabelle 16	- Entwicklung der Überlebenswahrscheinlichkeit.....	109
Tabelle 17	- Gehunfähige Passagiere.....	113
Tabelle 18	- Löschkapazität der FLF in Abhängigkeit von der Flugzeugklasse.....	121
Tabelle 19	- Verhältnis von Einsatz- und Führungskräfte.....	127
Tabelle 20	- Flugzeugbrände - Brandarten, Entstehungsorte und Häufigkeiten.....	140
Tabelle 21	- Auswirkungen von CO-Exposition (1).....	157
Tabelle 22	- Auswirkungen von CO-Exposition (2).....	158
Tabelle 23	- Rauchentwicklung bei exemplarischen Flugzeugunfällen.....	159
Tabelle 24	- Modell der CO-Entwicklung bei Bränden im Flugzeug.....	161
Tabelle 25	- Entrauchende Wirkung von geöffneten Flugzeugtüren.....	161
Tabelle 26	- Parameter und ihre möglichen Ausprägungen bei Flugzeugunfällen.....	166
Tabelle 27	- Kombinationen in Abhängigkeit von der Anzahl an Parametern und deren Ausprägungen.....	177
Tabelle 28	- Eintrittswahrscheinlichkeit und Vertrauensintervall von Parameterausprägungen in Abhängigkeit von der Anzahl an Durchläufen.....	180
Tabelle 29	- Eintrittswahrscheinlichkeit von Parameterausprägungen im Vertrauensintervall bei 10.000 Durchläufen.....	180

Tabellenverzeichnis

Tabelle 30	- Wahrscheinlichkeit für ungünstige Ausprägungen bei mindestens zwei Parametern bei 10.000 Durchläufen.....	181
Tabelle 31	- Unfallparameter und ihre Eintrittswahrscheinlichkeiten und Auswirkungen	185
Tabelle 32	- Veränderung der Verletzungsverteilung bei angekündigter Notlandung.....	188
Tabelle 33	- Veränderung der Verletzungsverteilung bei „normalem“ Zustand des Flugzeugs	192
Tabelle 34	- Passagiere, die das Flugzeug selbstständig verlassen können	219
Tabelle 35	- Gesamtzeitbedarf zur Rettung von gehunfähigen Passagieren.....	227
Tabelle 36	- Gehunfähige Passagiere im Flugzeug bei Eintreffen externer Einsatzkräfte	228

Begriffs- und Abkürzungsverzeichnis

ADV	Arbeitsgemeinschaft Deutscher Verkehrsflughäfen
AFFF	Aqueous Film Forming Foam (dt. wasserfilmbildendes Schaummittel)
APU	Auxiliary Power Unit (dt. Hilfstriebwerk), dient der Stromerzeugung bei abgeschalteten Triebwerken am Boden
AvGas	Aviation Gasoline
CAT	Category (Kategorie zur Einteilung der Sichtverhältnisse im Flugbetrieb)
CFD	Computational Fluid Dynamics, siehe hierzu auch Kapitel 3.4.6
CFTT	Controlled Flight into Terrain
DFS	Deutsche Flugsicherung
DFVLR	Deutsche Forschungs- und Versuchsanstalt für Luft- und Raumfahrt, heute: „Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt“ (DLR)
EASA	European Aviation Safety Agency
EK	Einsatzkraft bzw. Einsatzkräfte
FDS	Fire Dynamics Simulator (Computerprogramm zur Brandsimulation)
FLF	Flughafenlöschfahrzeug (teilweise wird im Feuerwehrewesen auch die Bezeichnung „GFLF“ für „Großflughafenlöschfahrzeug“ verwendet, wenn es sich um die „großen“ Ausführungen dieses Fahrzeugtyps handelt)
FMEA	Failure Mode and Effect Analysis, siehe hierzu auch Kapitel 3.3.3
FüSp	Führungsspanne
FwDV	Feuerwehr-Dienstvorschrift
GFK	Glasfaserkohlestoff
HAZOP	Hazard and Operability Study, siehe hierzu auch Kapitel 3.3.3
ICAO	International Civil Aviation Organization, siehe hierzu auch Kapitel 3.1.1
Kfz	Kraftfahrzeug
LFZ	Luftfahrzeug
LuftVG	Luftverkehrsgesetz
MANV	Massenanfall von Verletzten
MEM	Minimale Endogene Mortalität
MoGas	Motor Gasoline
MTOM	Maximum Take-Off Mass, höchstzulässige Startmasse (früher auch als MTOW bezeichnet, mit „W“ für „Weight“. „Masse“ ist im Gegensatz zu „Gewicht“ die physikalisch korrekte Bezeichnung.)
NfL	Nachrichten für Luftfahrer (der DFS)

Begriffs- und Abkürzungsverzeichnis

NFPA	National Fire Protecting Association (in den USA)
NIST	National Institute for Standards and Technology (in den USA)
PA	Pressluftatmer (Gerät zur Herstellung von umluftunabhängigem Atemschutz)
PAAG	Prognose eines möglichen Ereignisses, Auffinden der Ursachen, Abschätzen der Auswirkungen, Gegenmaßnahmen (dt. Bezeichnung für „FMEA“)
Pax	Passagier
SMV	Smokeviewer (Computerprogramm zur Simulation von Rauchausbreitung im Brandfall als Zusatzmodul von FDS)

Literaturverzeichnis

Airbus (o. J.): Specifications. URL: www.airbus.com/aircraftfamilies/passengeraircraft/a380family/a380-800/specifications/ (Abruf: 16.1.2007).

AFKzV – Ausschuss Feuerwehrangelegenheiten, Katastrophenschutz und zivile Verteidigung (2005): Feuerwehr-Dienstvorschrift FwDV 7 „Atemschutz“. o. O. 2005.

AFKzV – Ausschuss Feuerwehrangelegenheiten, Katastrophenschutz und zivile Verteidigung (2008): Feuerwehr-Dienstvorschrift FwDV 3 „Einheiten im Lösch- und Hilfeleistungseinsatz“. o. O. 2008.

Bald, J. Stefan (1991): Grundlagen für die Anwendung von Risikoanalysen im Straßenwesen. Darmstadt 1991.

BAST - Bundesanstalt für Straßenwesen (2012): Verkehrs- und Unfalldaten. Bergisch Gladbach 2012.

BF FFM - Berufsfeuerwehr Frankfurt am Main (2001): „Rundschreiben“ Atemschutzunfall Bad Soden. Frankfurt am Main 2001.

BGHW – Berufsgenossenschaft Handel und Warendistribution (2010): Erste Hilfe – Ein Leitfaden für Unternehmer, betriebliche Vorgesetzte und Betriebsärzte. o. O. 2010.

biomess Ingenieurbüro (o. J.): CO-Konzentration und Auswirkungen. URL: www.biomess.de/co-konzentrationen_und_auswirk.html (Abruf: 20.3.2005).

BMFT - Bundesminister für Forschung und Technologie (Hrsg.) (1979): Deutsche Risikostudie Kernkraftwerke. Eine Untersuchung zu den durch Störfälle in Kernkraftwerken verursachten Risiken. Bonn 1979.

BMI – Schutzkommission beim Bundesminister des Inneren (2003): Katastrophenmedizin – Leitfaden für die ärztliche Versorgung im Katastrophenfall. Berlin 2003.

BMJ – Bundesminister für Justiz (2007): Luftverkehrsgesetz (LuftVG). Berlin 2007.

BMV - Bundesminister für Verkehr (1981): Feuerschutz und Rettungswesen der Verkehrsflughäfen. Rundschreiben vom 23.7.1981. Bonn 1981.

Boeing (2008): 747-8 Airplane Characteristics for Airport Planning. Seattle, Washington, USA 2008.

Boeing (2012): Statistical Summary of Commercial Jet Airplane Accidents - Worldwide Operations 1959-2011. Seattle, Washington, USA 2012.

Boeing (o. J.): Technical Characteristics – Boeing 747-400. URL: www.boeing.com/boeing/commercial/747family/pf/pf_400_prod.page? (Abruf: 16.1.2007).

Breyer, Friedrich (2004): Mikroökonomik – Eine Einführung. Berlin 2004.

Bronner, Rolf (1999): Planung und Entscheidung: Grundlagen – Methoden – Fallstudien. München 1999.

Brühwiler, Bruno (2003): Risikomanagement als Führungsaufgabe. Zürich, Schweiz 2003

Butzlaff, Volker (2006): Monte Carlo Simulation und System Trading. Norderstett 2006.

CAAS – Civil Aviation Authority of Singapore (o. J.): Singapore Airport Emergency Service – A Division of CAAS. Singapur o. J.

Literaturverzeichnis

David, Gero (1996): Luftfahrtkatastrophen - Unfälle mit Passagierflugzeugen seit 1950. Stuttgart 1996.

DFS – Deutsche Flugsicherung (2000): Nachrichtliche Bekanntmachung der Gemeinsamen Empfehlung des Bundes und der Länder für das Feuerlösch- und technische Rettungswesen auf Regionalen Verkehrsflughäfen und Verkehrslandeplätzen mit Linien- und/oder Pauschalflugverkehr. In: Nachrichten für Luftfahrer. Ausgabe NfL I 302/00. Offenbach 2000. S. 413-421.

EASA – European Aviation Safety Agency (2007): Flight Safety Review 2006. Köln 2007.

EASA – European Aviation Safety Agency (2010): Flight Safety Review 2009. Köln 2010.

EASA – European Aviation Safety Agency (2012): Flight Safety Review 2011. Köln 2012.

EASA – European Aviation Safety Agency (2013): Flight Safety Review 2012. Köln 2013.

Etzold, Sabine (2001): Die Angst des Rauchers ... vor dem Schlangenbiss - oder: Warum wir Risiken wie Anthrax oder BSE fürchten und andere unterschätzen. In: Die Zeit 44/2001 vom 25.10.2001. S. 40.

EU - European Commission, Mobilität und Verkehr (2013): Fatalities at 30 days in EU countries: 2011. o. O. 2013.

Festinger, Leon (1957): A Theory of Cognitive Dissonance. Stanford, USA 1957.

Fischer, Ulrich / Gomeringer, Roland / Heinzler, Max / Kilgus, Roland / Näher, Friedrich / Oesterle, Stefan / Paetzold, Heinz / Stephan, Andreas (2008): Taschenbuch Metall. Haan-Gruiten 2008.

Flughafenfeuerwehr Stuttgart (2002a): Einsatzbericht ICAO-Löschübung 2002. Stuttgart 2002.

Flughafenfeuerwehr Stuttgart (2002b): Video zur ICAO-Löschübung 2002. Stuttgart 2002.

FSF – Flight Safety Foundation (o. J.a): Number of accidents and fatalities per year. URL: www.aviation-safety.net/statistics/period/stats.php?cat=A1 (Abruf: 2.6.2013).

FSF – Flight Safety Foundation (o. J.b): Accident description. URL: www.aviation-safety.net/database/record.php?id=yyyymmdd-x (Abruf: 18.07.2013).

FTC – Feuerwehr Training Center der Fraport AG (o. J.): Flugzeugbrandbekämpfung. Frankfurt/Main o. J.

Gerhardt, Martin / Schuster, Heike (1995): Das digitale Universum. Braunschweig/Wiesbaden 1995.

Gethmann, Carl Friedrich (1994): Handeln unter Risiko – Ethische Probleme der technischen Kultur. Mannheim 1994.

Hahn, Karl-Christian (2001): Feuerwehr-Einsatzrahmenplan für Flugunfälle innerhalb des Flughafens, mit externer Unterstützung (BA-Not A9). Frankfurt/Main 2001.

Hahn, Karl-Christian (2005): Flugunfall der AF 358, 02.08.2005, Toronto. Frankfurt/Main 2005.

Hengi, B.I. (1993): Crash - Flugzeugunfälle 1945 - heute. Allershausen 1993.

HKFSD - Hong Kong Fire Services Department (o. J.): Fire Services International Airport Hongkong. Hongkong o. J.

Literaturverzeichnis

Hosemann, Gerhard (1989): Gefahrenabwehr und Risikominderung als Aufgaben der Technik. In: Hosemann, Gerhard (Hrsg.): Risiko in der Industriegesellschaft. Analysen, Vorsorge und Akzeptanz. Erlangen-Nürnberg 1989. S. 94-115.

Huff, Martin W. (1996): Kriterien der Risikoverteilung. In: Bayer-Stiftung für deutsches und internationales Arbeits- und Wirtschaftsrecht (Hrsg.): Produktverantwortung und Risikoakzeptanz. Kriterien der Risikoverteilung. München 1998. S. 21-24.

Hüls, Ewald / Oestern, Hans-Jörg (1999): Die ICE-Katastrophe von Eschede. Berlin 1999.

ICAO - International Civil Aviation Organization (1990): Airport Service Manual, Part 1 - Rescue and Fire Fighting. Montréal, Québec, Kanada 1990.

ICAO - International Civil Aviation Organization (2006): Convention on International Civil Aviation. Montréal, Québec, Kanada 2006.

ICAO - International Civil Aviation Organization (2009): Annex 14. Volume I - Aerodrome Design and Operations. Montréal, Québec, Kanada 2009.

ICAO - International Civil Aviation Organization (2010): Annex 13. Aircraft Accident and Incident Investigation. Montréal, Québec, Kanada 2010.

IdF NRW – Institut der Feuerwehr Nordrhein-Westfalen (1999): Atmung und Atemgifte. Münster 1999.

IdF NRW – Institut der Feuerwehr Nordrhein-Westfalen (2000): Einsatzbezogene Führungslehre. Münster 2000.

IdF NRW – Institut der Feuerwehr Nordrhein-Westfalen (2002): Gefahren der Einsatzstelle. Münster 2002.

IdF ST – Institut der Feuerwehr Sachsen-Anhalt (2007): ICE-Unglück Eschede. URL: www.bestpractice-feuerwehr.de/ereignisse/technische-hilfeleistungen/ereignisbericht.2007-01-25.5647058062 (Abruf: 6.6.2007).

ISO/IEC – International Organization for Standardization / International Electrotechnical Commission (1999): Leitfaden für die Aufnahme von Sicherheitsaspekten in Normen. Genf, Schweiz 1999.

Johnson, Niall P. A. S. / Mueller, Juergen (2002): Updating the Accounts: Global Mortality of the 1918–1920 “Spanish” Influenza Pandemic. In: Bulletin of the History of Medicine. Ausgabe 76/2002. S. 105-115.

Krebs, Heinrich / Trung, Bao Le / El Kursi, El Miloudi / Firpo, Pierluigi (2000): Minimale Endogene Mortalität – ein universelles Sicherheitskriterium. In: ETR – Eisenbahntechnische Rundschau. Ausgabe 49/2000. S. 816-821.

Kepplinger (2009): „Alle starren auf den Tod“. URL: www.spiegel.de/kultur/gesellschaft/ krisenforscher-kepplinger-alle-starren-auf-den-tod-a-622856.html (Abruf: 11.03.2012).

Kollert, Roland (1993): Systematische Unterbewertung von Katastrophenrisiken – zur Anwendung des Risikobegriffs in nuklearen Risikoanalysen. In: Bechmann, Gotthard (Hrsg.): Risiko und Gesellschaft – Grundlagen und Ergebnisse interdisziplinärer Risikoforschung. Opladen 1993. S. 25-58.

Literaturverzeichnis

Lübbe, Herrmann (1989): Risiko und Lebensbewältigung. In: Hosemann, Gerhard (Hrsg.): Risiko in der Industriegesellschaft. Analysen, Vorsorge und Akzeptanz. Erlangen-Nürnberg 1989. S. 15-42.

Ludwig, Carsten (2009): Glasfaserverstärkte Kunststoffe unter hoher thermischer und mechanischer Belastung. Stuttgart 2009.

Luftfahrt.net (o. J.): Flugzeuge. URL: www.luftfahrt.net/flugzeuge (Abruf: 26.10.2008).

Lufthansa – Lufthansa German Airlines Flight Operations Airport Base Frankfurt (2002): NOTOF – Notification to Firebrigade, Quick Reference Manual. Frankfurt 2002.

Marnet, Otto (1999): Brandbekämpfung und Hilfeleistung an Luftfahrzeugen. Stuttgart 1999.

Meyer, Fritz (2000): Sicherheitsanforderungen an Rettungsgeräten im Spannungsfeld der europäischen Maschinenindustrie und der europäischen Richtlinie für persönliche Schutzausrüstungen. Vortrag in Grenoble, Frankreich 2000.

Mock, Ralf (2002): Risikoanalyse – ein Werkzeug für neue Herausforderungen? Zürich, Schweiz 2002.

Münch, Marc (2005): Fahrzeuge der Flughafenfeuerwehr FRA – Typenblatt, GFLF (Simba 8x8). Frankfurt/Main 2005.

Münch, Marc (2007): Taktikstandard Kühlen von Fahrwerken. Frankfurt/Main 2007.

NFPA – National Fire Protection Association (1991): NFPA 424M - Manual for Airport/Community Emergency Planning. Boston, USA 1991.

NFPA – National Fire Protection Association (1998): NFPA 403 - Aircraft Rescue and Fire-Fighting Services at Airports. Boston, USA 1998.

o. V. (2001): Sicherheitsanalyse - Kombination der Techniken. Tutorial der Universität Oldenburg. Oldenburg 2001.

Paschen, Hans-R. (2000): Typische Verletzungen bei Flugunfällen. In: Lufthansa Technical Training / Flughafenfeuerwehr Frankfurt Main / Akademie für Rettungsdienst und Gefahrenabwehr (Hrsg.): Management nach Flugunfällen. Präsentation zum Vortrag. Hamburg 2000. o. S.

PlaneCrashInfo (o. J.): Statistics - Causes of Fatal Accidents by Decade. URL: www.planecrashinfo.com/cause.htm (Abruf: 18.9.2013).

Rabe, Frederik / Hofmann, Anja / Krause, Ulrich (o. J.): Vergleich von Computational Fluid Dynamics-Programmen in der Anwendung auf Brandszenarien in Gebäuden. o. O. o. J.

Renn, Ortwin (1989): Risikowahrnehmung – Psychologische Determination bei der intuitiven Erfassung und Bewertung von technischen Risiken. In: Hosemann, Gerhard (Hrsg.): Risiko in der Industriegesellschaft. Analysen, Vorsorge und Akzeptanz. Erlangen-Nürnberg 1989. S. 167-188.

Renn, Ortwin / Schweizer, Pia-Johanna / Dreyer, Marion / Klinke, Andreas (2007): Risiko – Über den gesellschaftlichen Umgang mit Unsicherheit. München 2007.

Richter, Jan-Arwed / Wolf, Christian (1997): Jet-Airliner-Unfälle seit 1952. Karlsruhe 1997.

Literaturverzeichnis

Rosenbauer International AG (o. J.): Technische Daten - Flughafenlöschfahrzeug PANTHER 4x4. URL: www.rosenbauer.com/de/world/produkte/flughafenloeschfahrzeuge/panther.html (Abruf: 17.11.2006).

Rudlof, Andreas (2012): Übersicht der deutschen Flughafenfeuerwehren. Stuttgart 2012.

Schlagbaum, Albert (2004): Gefahrenanalyse mittels HAZOP. Paderborn 2004.

Schnabel, Ulrich (2008): Die Konjunktur der Ängste. In: Die Zeit 26/2008 vom 19.06.2008. S. 40-41.

SFK – Störfall-Kommission. Arbeitskreis Technische Systeme, Risiko und Verständigungsprozesse (2004): Risikomanagement im Rahmen der Störfall-Verordnung. Bonn 2004.

Statistisches Bundesamt (2012): Todesursachen in Deutschland 2011. Wiesbaden 2012.

Westram, Heike (2013): Dämmerung – Zwischen Tag und Nacht. URL: www.br-online.de/wissensbildung/spacenight/sterngucker/erde/daemmerung.html (Abruf: 24.7.2013).

WHO – World Health Organization (2013): Global status report on road safety 2013. Genf, Schweiz 2013.

Wikipedia (o. J.): Gesetz der großen Zahlen. URL: www.de.wikipedia.org/wiki/Gesetz_der_groessen_Zahlen (Abruf: 29.12.2006).

Zeitverlag Gerd Bucerius GmbH & Co. KG (Hrsg.) (2005a): Die Zeit. Das Lexikon in 20 Bänden. Band 8. Hamburg 2005.

Zeitverlag Gerd Bucerius GmbH & Co. KG (Hrsg.) (2005b): Die Zeit. Das Lexikon in 20 Bänden. Band 16. Hamburg 2005.

Ziegler - Albert Ziegler GmbH & Co. KG (o. J.): FLF Z6. Giengen/Brenz o. J.

Zollinger, Dan (o. J.): Rigid Pavement Design - Aircraft Data. URL: [www.ceprofs.civil.tamu.edu/dzollinger/CVEN-637-Fall 2004/aircraft data](http://www.ceprofs.civil.tamu.edu/dzollinger/CVEN-637-Fall%202004/aircraft%20data) (Abruf: 19.10.2009).

Verzeichnisse der Expertengespräche

Ahrens, Reinhard. Stellvertretender Leiter Flughafenfeuerwehr, Flughafen Hamburg

Blau, Johannes. Dr., Kreiskrankenhaus Hofheim

Chaleoyprach, Lukchai. Deputy Director Rescue & Fire Fighting Department, Bangkok International Airport

Chiu, Wai-biu. Assistant Divisional Officer Main Fire Station, Hongkong International Airport

Fernandez, Joseph. Chief Airport Emergency Service, Civil Aviation Authority of Singapore

Fuchs, Wolfgang. Leiter Flughafenfeuerwehr, Flughafen Frankfurt/Main

Hahn, Karl-Christian. Leiter Flughafenbrandschutz, Flughafen Frankfurt/Main

Haupt, Peter. Leiter Flughafensicherheit, Flughafen Frankfurt/Main

Hsing, Chris. Flughafen Taipei

Kleinhammer, Elke. Diplom-Ingenieur, Luftfahrt-Bundesamt Braunschweig

Lim, Si-Ho. Arch. Engineer Rescue & Fire Fighting Team, Incheon International Airport, Republic of Korea

Lipp, Markus D. W. Prof. Dr. Dr., Universitätsmedizin Mainz

Park, Dong-Youl. General Manager Rescue & Fire Fighting Team, Incheon International Airport, Republic of Korea

Rudlof, Andreas. Leiter Flughafenfeuerwehr, Flughafen Stuttgart

Schäfer, Christian. Leiter Flughafenfeuerwehr, Flughafen Bremen

Schubert, Christian-Heinz. Flugzeugkapitän und Ermittler, Bundesstelle für Flugunfalluntersuchung Braunschweig

Toh, Heng Hock. Senior Airport Emergency Officer, Civil Aviation Authority of Singapore

Tsang, Yuk Ming. Divisional Officer, Hongkong International Airport

Walther, Klaus. Leiter Werkfeuerwehr, Flughafen Berlin-Schönefeld

Yoonpand, Nakorn. Director Rescue & Fire Fighting Department, Bangkok International Airport

