

TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN

Ingenieur fakultät Bau Geo Umwelt

Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion

Sicherheit mehrgeschossiger Holzgebäude im Brandfall –

Eine Risikoanalyse unter stochastischer Abbildung realer Ereignisverläufe im Brandfall

Dipl.-Ing. Michael Merk

Vollständiger Abdruck der von der Ingenieur fakultät Bau Geo Umwelt

der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieurs

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Oliver Fischer

Prüfer der Dissertation:

1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Stefan Winter
2. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Jochen Zehfuß,  
Technische Universität Braunschweig

Die Dissertation wurde am 03.03.2015 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Ingenieur fakultät Bau Geo Umwelt am 22.06.2015 angenommen.



## Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand in den Jahren 2010 bis 2015 an der Technischen Universität München während meiner Tätigkeit als Leiter der Prüfstelle Holzbau des Materialprüfamtes für das Bauwesen sowie als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion.

Die Bearbeitung meines Forschungsvorhabens „Brandsicherheit mehrgeschossiger Holzbau“ (Winter, et al., 2008), die darauf folgenden Forschungsaktivitäten im Bereich des vorbeugenden Brandschutzes, umfangreiche Erfahrungen durch die Bearbeitung von Brandschutznachweisen für Gebäude in Holzbauweise und nicht zuletzt die wertvollen Erfahrungen aus der Tätigkeit in der Überwachungs- und Zertifizierungsstelle für hochfeuerhemmende Bauteile in Holzbauweise haben mich auf die in dieser Dissertation zu Grunde liegenden Fragestellung gebracht. Immer wieder gestellte Fragen bezüglich der baurechtlich gestellten Anforderungen an mehrgeschossige Holzgebäude, wie z.B. *„ob bei der Gebäudeklasse 4 denn wirklich eine 60-minütige Kapselung notwendig ist oder nicht auch schon geringere Schutzzeiten ausreichend wären“*, ergaben für mich den Ansporn für diese Arbeit und den Ehrgeiz, die Zusammenhänge näher zu beleuchten und eine Lösung dazu vorschlagen zu können.

Für die großen Freiräume zu allen meinen Ideen, die uneingeschränkten Weiterentwicklungsmöglichkeiten und zuletzt für die Betreuung dieser Dissertation danke ich Herrn Univ.-Professor Dr.-Ing. Stefan Winter. Für die Übernahme des Koreferates danke ich Herrn Univ.-Professor Dr.-Ing. Jochen Zehfuß.

Nicht unerwähnt lassen möchte ich die zahlreichen, wirklich wertvollen fachlichen Diskussionen mit meinen Kollegen am Lehrstuhl, allen voran mit Norman Werther und René Stein. Des Weiteren gilt auch ein großer Dank meinem Kollegen Michael Schulte-Wrede, der mich in der „heißen Phase“ meiner Arbeit an dieser Dissertation durch Übernahme vieler Aufgaben in der Prüfstelle Holzbau in großartiger Weise unterstützt hat. Nicht zu vergessen die aufmunternde, humoristische Art und Weise.

Vor allem aber möchte ich meiner Frau Sibylle für die Unterstützung in jeglicher Hinsicht, den Verzicht auf große Teile unserer gemeinsamen Freizeitgestaltung, sowie lang anhaltende Geduld und Rücksicht über alle Höhen und Tiefen während der Erstellung dieser Arbeit danken. Ebenfalls sehr dankbar bin ich meinen Eltern für den kontinuierlichen Ansporn, die Arbeit zum Ende zu bringen, sowie tatkräftige Unterstützung bei dem zweiten großen Projekt, die Sanierung der Mühle. Speziell danke ich auch noch meiner Mutter für die Organisation des zeitweilig genutzten Promotionszimmers und Herrn Bucher (GL Breitenbergbahn) für die großzügige Bereitstellung desselben.

Meiner Oma danke ich für die positive Beeinflussung höherer Mächte durch „Glückskerzen“.

Ohne die Unterstützung aller Genannten wäre es für mich kaum möglich gewesen, erfolgreich zum heutigen Stand zu kommen.

München, im Februar 2015      Michael Merk



## **Kurzfassung**

### **Brandsicherheit mehrgeschossiger Holzbau – Eine Risikoanalyse unter stochastischer Abbildung realer Ereignisverläufe im Brandfall**

Im Focus der Arbeit steht eine stochastische Brandrisikoanalyse. Die streuenden Einflussgrößen wurden anhand von Einsatzdaten einer deutschen Berufsfeuerwehr ermittelt und mit Forschungsergebnissen externer Arbeiten ergänzt. Unter Verwendung eines ingenieurmäßigen Verfahrens zur Ermittlung von Brandverläufen wurden mittels Monte-Carlo-Simulationen Versagenswahrscheinlichkeiten von Bauteilen und Schutzbekleidungen analysiert. Ergebnis sind Vorschläge für ein System sinnvoll angepasster Bauteilanforderungen mehrgeschossiger Gebäude in Holzbaubauweise.

Stichworte: Brandschutz, Mehrgeschossiger Holzbau, Brandrisikoanalyse, System der Anforderungen

## **Abstract**

### **Fire safety in multi-storey timber buildings – A risk analysis under consideration of a stochastic timeline in case of fire**

The thesis focuses on a stochastic fire risk analysis. The varying parameters were evaluated on the basis of data of a German professional fire brigade, supplemented with external research work. By using an engineering-based methodology for identifying fire curves, failure probabilities were calculated by Monte Carlo simulations for building components and protective layers. The result is a proposal for a system with adjusted fire resistance requirements in multi-storey timber buildings.

Keywords: fire safety engineering, multi-storey timber buildings, fire risk analysis, adjusting fire resistance requirements



## Inhaltsverzeichnis

<b>Vorwort</b> .....	<b>1</b>
<b>Kurzfassung</b> .....	<b>1</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>1</b>
<b>Inhaltsverzeichnis</b> .....	<b>3</b>
<b>1 Einleitung und Zielsetzung</b> .....	<b>7</b>
1.1 Der Einsatz von Holz im Bauwesen - warum überhaupt Holz ? .....	7
1.2 Der Begriff Mehrgeschossiger Holzbau .....	10
1.3 Der Begriff der Sicherheit .....	11
1.4 Der Brandfall.....	13
1.5 Problemstellung und Rechtfertigung der Themenstellung.....	16
<b>2 Beurteilung der Sicherheit von Gebäuden im Brandfall – Brandrisikobewertung</b> .....	<b>29</b>
2.1 Einleitung .....	29
2.2 Ablauf, Ziel und mögliche Verfahren zur Durchführung von Brandrisikobewertungen.....	30
2.3 Resultat und Schlussfolgerung .....	38
<b>3 Ansatz für ein innovatives Nachweisverfahren</b> .....	<b>39</b>
3.1 Grundprinzipien für Brandschutznachweise von Gebäuden und Anlagen .....	39
3.2 Das Sicherheitskonzept für ingenieurtechnische Brandschutznachweise im Bauwesen .....	41
3.3 Angestrebte Nachweissystematik für den konstruktiven Brandschutz im Holzbau im Rahmen dieser Arbeit.....	43
<b>4 Ingenieurmäßige Ermittlung von Brandverläufen (Bemessungsbrände)</b> .....	<b>52</b>
4.1 Grundlagen.....	52
4.2 Allgemeine Methoden der Brandsimulation .....	53
4.2.1 Einleitung .....	53
4.2.2 Empirisch abgeleitete Handrechenmethoden .....	54
4.2.3 Zonen-Modelle .....	57
4.2.4 Feldmodelle .....	58
4.3 Auswahl und Diskussion des geeigneten Ansatzes.....	59
<b>5 Einflussparameter auf ein Brandereignis</b> .....	<b>60</b>
5.1 Einleitung und Überblick .....	60
5.2 Diskussion der für die weitere Arbeit maßgeblichen Parameter.....	62
5.2.1 Wahrscheinlichkeit einer Brandentstehung.....	62
5.2.2 Brandentwicklungsgeschwindigkeit.....	62
5.2.3 Brandlasten / Brandlastdichten.....	64
5.2.4 Brandentdeckung und Brandmeldung.....	64

5.2.5	Primärbrandbekämpfung .....	69
5.2.6	Größen von Nutzungseinheiten, Ventilations- bzw. Öffnungsflächen .....	69
5.2.7	Parameter zur Brandintervention (Hilfsfrist, Einsatzzeiten, Löschmaßnahmen).....	72
<b>6</b>	<b>Die Brandintervention durch die Feuerwehr .....</b>	<b>73</b>
6.1	Einleitung .....	73
6.2	Hilfsfrist, Funktionsstärke und Erreichungsgrad .....	75
6.3	Beschreibung der Einzelschritte des Feuerwehreinsatzes ab der Ankunft am Einsatzort.....	81
6.3.1	Einleitung .....	81
6.3.2	Erkundungs- und Entwicklungszeit .....	81
6.3.3	Der Vorgang der Personenrettung.....	84
6.3.4	Der Löschangriff / Die Brandbekämpfung .....	89
6.3.5	Zusammenfassung der theoretisch ermittelten Zeitwerte für die Brandintervention.....	90
6.4	Erhebungen aus realen Daten zu Feuerwehreinsätzen einer ausgewählten Großstadt .....	90
6.5	Auswertung national veröffentlichter Einsatzstatistiken der Bundesländern .....	109
6.6	Sonstige Erhebungen aus Daten zu Einsätzen von Feuerwehren .....	112
6.6.1	Ermittlung der Leistungsfähigkeiten anhand eines interkommunalen Vergleichs (IKO-Netz) .....	112
6.6.2	Weitere Ansätze zur Ermittlung der Leistungsmerkmale des abwehrenden Brandschutzes .....	112
<b>7</b>	<b>Simulation von Raumbränden zur Risikoanalyse .....</b>	<b>114</b>
7.1	Verwendetes Tool für die Simulation und Beschreibung der Vorgehensweise .....	114
7.2	Aufbau der Simulationsrechnung .....	115
7.3	Modell für die Äquivalenzbetrachtung.....	122
7.4	Verwendete Gleichungssysteme für die Simulationsberechnung.....	123
7.5	Auswertung der Simulationsergebnisse .....	127
7.6	Bewertung der Simulationsergebnisse und Vorschlag für künftige Bauteilanforderungen .....	130
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung, Ergebnis und Ausblick.....</b>	<b>134</b>
8.1	Zusammenfassung der Arbeit .....	134
8.2	Ergebnisdiskussion.....	135
8.3	Ausblick .....	136
<b>9</b>	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>138</b>
<b>10</b>	<b>Formelzeichen und Abkürzungen .....</b>	<b>147</b>
	Große lateinische Buchstaben (mit/ohne Index).....	147
	Kleine lateinische Buchstaben (mit/ohne Index).....	147
	Griechische Buchstaben.....	148
	Abkürzungen .....	149

<b>11</b>	<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>150</b>
<b>12</b>	<b>Tabellenverzeichnis .....</b>	<b>154</b>
<b>Anhang 1 zu Abschnitt 6 – Brandintervention durch die Feuerwehr.....</b>	<b>157</b>	
A1.a	Feuerwehrgesetze der 16 Bundesländer (nach eigener Recherche 12/2013).....	157
A1.b	Auswertung der statistischen Erhebungen realer Daten zu Einsätzen einer Berufsfeuerwehr und Verknüpfung mit der digitalen Gebäudedatei einer bundesdeutschen Großstadt.....	159
A1.c	Auswertung der statistischen Veröffentlichungen zu den Feuerwehren der Bundesländer .....	164
<b>Anhang 2 zu Abschnitt 7.3 – Verwendete Gleichungssysteme für die Simulationsrechnung .....</b>	<b>166</b>	
A2.a	Natürlicher Brandverlauf ohne Flashover und ohne Einfluss der Feuerwehr.....	166
A2.b	Natürlicher Brandverlauf ohne Flashover mit Umsetzung von 70% der Brandlast in der Brandentwicklungsphase und ohne Einfluss der Feuerwehr .....	168
A2.c	Natürlicher Brandverlauf ohne Flashover mit Umsetzung von 70% der Brandlast in der Brandentwicklungsphase und Einfluss der Feuerwehr .....	169
A2.d	Natürlicher Brandverlauf ohne Flashover mit Einfluss der Feuerwehr in der Brandentwicklungsphase .....	170
A2.e	Natürlicher Brandverlauf ohne Flashover mit Einfluss der Feuerwehr in der Vollbrandphase.....	171
A2.f	Natürlicher Brandverlauf ohne Flashover mit Einfluss der Feuerwehr in der Abkühlphase.....	172
A2.g	Natürlicher Brandverlauf mit Flashover ohne Einfluss der Feuerwehr.....	173
A2.h	Natürlicher Brandverlauf mit Flashover und Umsetzung von 70% der Brandlast in der Brandentwicklungsphase ohne Einfluss der Feuerwehr .....	175
A2.i	Natürlicher Brandverlauf mit Flashover und Umsetzung von 70% der Brandlast in der Brandentwicklungsphase und Einfluss der Feuerwehr .....	176
A2.j	Natürlicher Brandverlauf mit Flashover und Einfluss der Feuerwehr in der Flashoverphase .....	177
A2.k	Natürlicher Brandverlauf mit Flashover und Einfluss der Feuerwehr in der Vollbrandphase.....	178
A2.l	Natürlicher Brandverlauf mit Flashover und Einfluss der Feuerwehr in der Abkühlphase .....	179
A2.m	Ereignisbaum zu den Varianten von Brandverläufen .....	180
<b>Anhang 3 zu Abschnitt 7.4 – Verwendete Gleichungen für die Simulationsrechnung .....</b>	<b>181</b>	
A3.a	Abbildungsverzeichnis zu Anhang 3: .....	181
A3.b	Diagramme zu Versagenswahrscheinlichkeiten für Öffnungsflächenverhältnis $A_f / 2$ .....	182
A3.c	Diagramm zur Sensitivitätsanalyse für Öffnungsflächenverhältnis $A_f / 2$ .....	186
A3.d	Diagramme zu Versagenswahrscheinlichkeiten für Öffnungsflächenverhältnis $A_f / 4$ .....	187
A3.e	Diagramm zur Sensitivitätsanalyse für Öffnungsflächenverhältnis $A_f / 4$ .....	191
A3.f	Diagramme zu Versagenswahrscheinlichkeiten für Öffnungsflächenverhältnis $A_f / 6$ .....	192
A3.g	Diagramm zur Sensitivitätsanalyse für Öffnungsflächenverhältnis $A_f / 6$ .....	196
A3.h	Diagramme zu Versagenswahrscheinlichkeiten für Öffnungsflächenverhältnis $A_f / 8$ .....	199
A3.i	Diagramm zur Sensitivitätsanalyse für Öffnungsflächenverhältnis $A_f / 8$ .....	201



## 1 Einleitung und Zielsetzung

### 1.1 Der Einsatz von Holz im Bauwesen - warum überhaupt Holz ?

Holz zählt neben Stein zum ältesten, von der Menschheit eingesetzten Baustoff. Das Material ist dabei in unterschiedlichster Weise verwendbar. Außer im Bauwesen findet dieser Werkstoff ebenso mit großer Tradition Anwendung im Möbel- und Werkzeugbau. Nicht zu vergessen ist auch das Kunsthandwerk, in dem das Material Holz wegen seiner guten Modellierbarkeit und Individualität auf verschiedenste Art verwendet wird.

Im Bauwesen können die üblich verwendeten Holzbaustoffe grundsätzlich in allen „nicht erdberührten“ Bereichen unter Beachtung des konstruktiven Holzschutzes verwendet werden. Sind Konstruktionen in feuchtebeanspruchten Bereichen erforderlich, besteht die Möglichkeit, höher resistente Holzarten einzusetzen. Neben der Verwendung von Holz als Grundmaterial für einfache und komplexe lastabtragende Strukturen von Bauwerken (Stäbe, Platten, Scheiben) wird der Rohstoff ebenso für die Herstellung von Beplankungs- und Bekleidungsmaterialien für Decken, Wände, Dächer und im Ausbau für Fenster, Türen u.v.m. genutzt.

Hohe Festigkeiten und ein günstiges Stabilitätsverhalten im Verhältnis zu seinem geringen Eigengewicht bei einer leichten Verarbeitbarkeit sowie die guten Wärmedämmeigenschaften und Ökobilanzwerte lassen aus nahezu allen Sichtweisen den Baustoff Holz als hervorragendes Material für tragende und bekleidende Bauelemente erscheinen. Dabei speichert zusätzlich jedes Holzprodukt, egal ob es als Teil eines Gebäudes, einer Brücke, eines Möbelstückes oder Sonstigem gefertigt oder eingesetzt wurde, genau so viel Kohlenstoff, wie der ursprüngliche Baum massebezogen der Atmosphäre entzogen hat. Zuletzt zeichnet sich Holz als einziger weltweit nachwachsender und in großen Mengen erhältlicher Rohstoff aus.

Forschungsvorhaben aus dem medizinischen Bereich zeigen zudem, dass der menschliche Organismus äußerst positiv auf vorhandene Holzstrukturen in seiner Umgebung reagiert. In Untersuchungen wurde nachgewiesen, dass Holzinhaltsstoffe, visuelle Reize durch „warme“ Oberflächenstrukturen und das hygrothermische Verhalten von Holz positive Auswirkungen auf die Konzentrationsleistung, das Befinden, die Körperbeanspruchung und auf das vegetative Nervensystem haben (HUMAN RESEARCH, Institut für Gesundheitstechnologie und Präventionsforschung, Weiz/Austria). Untersuchte Personen fühlten sich in mit Holz ausgestatteten Räumen (Wand, Decke, Boden, Inventar) weniger beansprucht und hatten eine signifikant geringere Herzfrequenz und einen höheren Vagustonus sowie eine bessere kardiovaskuläre Regulationsfähigkeit. Herz und Kreislauf wurden durch dieselbe Arbeit weniger belastet. (Moser, 2009)

Neben den traditionellen Familienhäusern und Höfen im ländlichen Bereich entstand über mehrere Jahrhunderte bis zum 19. Jahrhundert auch im städtischen Bereich eine große Anzahl von Holzbauten. Gerade Amts- und Verwaltungshäuser wurden als mehrgeschossige Gebäude mit hoher Zimmermannskunst errichtet.

Als ein beeindruckendes Beispiel dieser vielen, bereits nach heutiger baurechtlicher Definition mehrgeschossigen Holzgebäude, kann das Knochenhauer Amtshaus am Marktplatz in Hildesheim (Abbildung 1-1) aufgeführt werden, das bereits im Jahr 1529 errichtet und nur durch die Einwirkung des Krieges im März 1945 zerstört wurde. Dank der Initiative von Hildesheimer Bürgern wurde nach vielen

Jahren der originalgetreue Wiederaufbau zum heutigen Stand vorgenommen (Quelle Wikipedia, [www.knochenhaueramtshaus.com](http://www.knochenhaueramtshaus.com)).

Zumeist standen diese aufwendigen und hoch detaillierten Gebäude als Schaubild für wirtschaftlichen und politischen Einfluss der Eigentümer und hohes Ansehen in der Bevölkerung.



Abbildung 1-1: Knochenhauer Amtshaus am Marktplatz in Hildesheim ([www.knochenhaueramtshaus.com](http://www.knochenhaueramtshaus.com))

Mit Beginn des 20. Jahrhundert wurde jedoch der Einsatz von Holz über einen Zeitraum von mehreren Jahrzehnten, vor allem im Hinblick auf das Verhalten im Brandfall, im Wesentlichen geprägt durch die Kriegserfahrungen, als ungünstig und gefährlich dargestellt. Zudem wurde kaum auf den Holzschutz geachtet, wodurch zahlreiche wenig dauerhafte Konstruktionen, vor allem auch aus bauphysikalischer Sicht entstanden. Auf Grund dieser vorgenannten Einflüsse und der Entwicklung zahlreicher neuer Baustoffe (z.B. leichte, energetisch hoch wirksame Ziegel), deren Einsatz bauphysikalisch als unproblematischer und fehlerverzeihender galt, musste der Holzbau in dieser Epoche in den Hintergrund treten.

Nach dieser zeitweilig eher negativen Sichtweise wurde in jüngster Vergangenheit mit Beginn des 21. Jahrhundert durch umfangreiche Bemühungen aus Forschung und Verbandsarbeiten in verschiedensten Ländern das Ansehen von Holz wieder verbessert und die Anwendung von Holz zunehmend gesteigert. Auf Basis dieser Bemühungen reformierte Bauordnungen im deutschsprachigen Raum (Österreich, Schweiz und Deutschland) tragen den vielen günstigen Eigenschaften des Baustoffes Holzes bereits in geringen Umfang Rechnung und bieten einen guten Weg, den Anwendungsbereich noch deutlich auszubauen.

Die Anzahl der genehmigten Wohn- und Nichtwohngebäude in Holzbauweise ist zwar – dem allgemeinen Trend folgend – nach stetiger Zunahme wegen der Finanz- und Immobilienkrise im Jahr 2007 nochmals gesunken, seit 2008 ist die Entwicklung aber wieder nach oben gerichtet (DBT2013, 2013). Im Jahr 2011 lag die Holzbauquote (Quote Anteil Holzbauweise berechnet nach Anzahl der Baugenehmigungen) bundesweit bei 15,8 %, wobei sich ein deutliches Nord-Süd-Gefälle von teils unter 5 Prozent im Norden und bis zu 40 Prozent im Südwesten bzw. 24 Prozent im Süden zeigt (Österreich 39% (2008), Schweiz 24% (2011), Schweden 55% (2009)).

Obwohl die beiden Begriffe Energieeffizienz und Nachhaltigkeit erst in den vergangenen Jahren verstärkt Einzug in das Bauwesen erhielten, prägen diese heutzutage die Wahl an eingesetzten Baustoffen und

Bauweisen durch die Planer umso mehr. Die in den letzten Jahren deutlich steigende Nachfrage nach ökologischen Gebäuden in Holzbauweise kann hiermit verknüpft bzw. erklärt werden.

Erste normative Forderungen nach Wärmedämmung wurden Anfang der 70er Jahre zuerst hygienisch begründet, die darauffolgende Energiekrise 1974 und der damit notwendige energetische Einsparungseffekt beeinflussten die folgende Gesetzgebung. Auf Grundlage des Energieeinsparungsgesetzes wurden 1977 weitere Vorschriften erlassen, um eine wirtschaftlich sinnvolle Beschränkung des Energieverbrauchs zu erreichen. Die Weiterentwicklung dieser Regeln führte in den folgenden Jahren zur Herausgabe einer zweiten und dritten Wärmeschutzverordnung und im Jahr 2002 zur Einführung der bis heute angewendeten Energieeinsparverordnung (EnEV). Zum Erreichen der gesetzten Ziele der Bundesregierung im Klimaschutz wurden die Anforderungen an Neubauten und bauliche Veränderungen in den Jahren 2007, 2009 und zuletzt 2012 durch Novellierungen stetig erhöht.

Neben dem Streben nach der Reduzierung des jährlichen Heizwärmebedarfes werden jüngst auch bisher noch nicht für eine Gebäudebewertung herangezogener Kriterien wie die Lebenszyklusbetrachtung, die Gesamtenergiebilanz, ein sparsamer Materialeinsatz, die Recyclebarkeit bzw. Wiederverwendbarkeit nach Nutzungsende und damit die Abfallvermeidung erforscht und politisch als Maßstab für „vorbildliche“ und förderbare Bauweisen angesetzt. Im Vergleich zu Stahl, Aluminium, Ziegel und Beton benötigt der Anbau, das Bewirtschaften und Ernten von Holz sowie das Bearbeiten zu den verwendbaren Endprodukten nur sehr wenig Energie. Zudem wird während des Wachstums des Rohproduktes Holz CO<sub>2</sub> aus der Atmosphäre entnommen, während die Herstellprozesse der konkurrierenden Baumaterialien CO<sub>2</sub> freisetzen. Da bei der Entsorgung, sei es thermisch oder durch Verrottung nur genau die Menge an CO<sub>2</sub> wieder freigesetzt wird, die während des Zuwachses (Rohstoffproduktion) aufgenommen wurde, bezeichnet man Holz auch als „klimaneutralen“ Baustoff.

Diese Entwicklung in Richtung einer generellen Forderung nach hoch energieeffizienten Gebäuden (Passivhaus-Bauweise bis zu „Null-Energie-“ oder sogar „Plus-Energie-Häusern“) sowie der Einsatz nachhaltiger, recyclingfähiger und ressourcenschonender Materialien und Bauweisen trägt neben den eingangs aufgeführten Eigenschaften der konstruktiven Leistungsfähigkeit und der positiven Wirkung auf den Menschen zunehmend zur Steigerung der Konkurrenzfähigkeit des Baustoffes Holz bei und bewirkt die stetige Steigerung der Marktanteile im Bauwesen.

## 1.2 Der Begriff Mehrgeschossiger Holzbau

In der Architektur spricht man allgemein von eingeschossigen Gebäuden, wenn alle nutzbaren bzw. zum Aufenthalt von Personen möglichen Räume im Erdgeschoss liegen. Bauten gelten immer dann als mehrgeschossig, wenn über der Decke des Erdgeschosses mindestens ein weiterer Raum mit ausreichender Höhe, Belichtung und sonstigen Anforderungen für den Aufenthalt von Personen vorhanden ist.

Baurechtlich findet man namentlich eine vergleichbare Unterscheidung zwischen eingeschossigen und mehrgeschossigen Gebäuden nur bei solchen mit einer Sonderbaunutzung. Gebäude mit Sonderbaunutzung sind Anlagen und Räume besonderer Art oder Nutzung, welche sich durch große Gebäudeabmessungen, den Aufenthalt großer Personenmengen, den Aufenthalt geistig oder mobil eingeschränkter Personen oder anderer Risikopotentiale wie höherer Brand- oder Explosionsgefahr von „normalen“ Gebäuden unterscheiden.

Allgemein werden Gebäude nach nationalem (deutschem) Bauordnungsrecht (in der Muster- sowie der überwiegenden Anzahl der Landesbauordnungen) in ihrer Gesamtheit in fünf Gebäudeklassen (Abbildung 1-2) eingeteilt. Dabei beinhalten die Gebäudeklassen 1 bis 3 sämtliche Objekte, welche nach früherer Bezeichnung sogenannte „Gebäude geringer Höhe“ waren und eine maximale Höhe des obersten Geschossfußbodens in Bezug auf die mittlere Geländehöhe von 7,0 m haben.

Bei der Gebäudeklasse 4 und 5 handelt es sich bauordnungsrechtlich nach alter Definition um Gebäude „mittlerer Höhe“, wobei die Gebäudeklasse 4 eine maximale Höhe nach vorheriger Definition von 13,0 m und die Gebäudeklasse 5 von 22,0 m nicht überschreiten darf. Letztere Festlegung der maximalen Höhe ergibt sich aus der Grenze des Überganges der Bekämpfungsmaßnahmen vom alternativ möglichen Außenangriff zum ausschließlichen Innenangriff durch die Rettungskräfte. Sämtliche Gebäude mit einer Höhe darüber hinaus werden als Hochhaus klassifiziert, für welche aus vorbeschriebener Ursache ein baulich grundlegend anderes Konzept mit wesentlich höher gestellten Anforderungen anzuwenden ist. Holzbauten im Klassifizierungsbereich von Hochhäusern sind auch in der heutigen Zeit auf Grund ihrer vielschichtigen, nicht nur den Brandschutz betreffenden Komplexität noch als absolute Ausnahmen anzusehen.

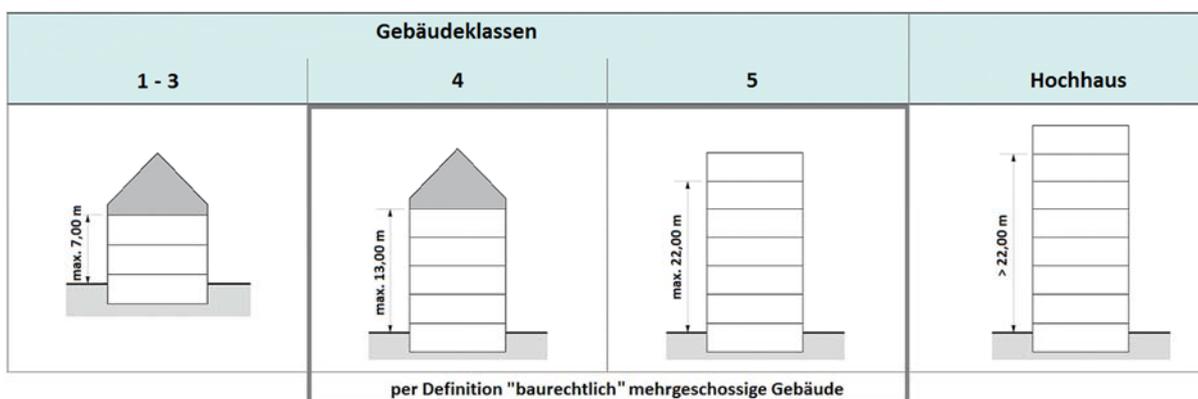


Abbildung 1-2: Darstellung der Einteilung von Gebäuden nach nationaler Musterbauordnung

Wenn auch zur Ausführung in Holzbauweise von Gebäuden der Gebäudeklasse 5 bislang in den Bauordnungen der Länder, mit Ausnahme des Bundeslandes Baden-Württemberg, noch keine deskriptiven Regelungen vorhanden sind, werden in jüngster Zeit bereits häufiger solche Gebäude auf Basis von besonderen Nachweisen zu den baurechtlichen Abweichungen in Form der Verwendung brennbarer Baustoffe vermehrt ausgeführt. Zur Ausführung der Holzbauweise in der Gebäudeklasse 4 haben die meisten Bundesländer die holzbauspezifische Muster-Richtlinie (M-HFHolzR, 2004) mit den darin enthaltenen Regelungen zu Bauteilen und Konstruktionen in ihre Technischen Baubestimmungen aufgenommen.

### 1.3 Der Begriff der Sicherheit

Nutzer von Bauwerken und Anlagen, Dritte in ihrem Einflussbereich (z.B. Besucher, Kunden im Gebäude aber auch Passanten in der Nähe des Bauwerkes auf der Straße, ...) sowie die Gesellschaft insgesamt fordern Schutz und Sicherheit vor dem Versagen von baulichen Konstruktionen (Widerstand des Tragwerkes gegen mechanische oder gegen thermische Einwirkungen bzw. Beanspruchungen) und vertrauen dabei auf die einschlägigen Rechtsgrundlagen. Diese führen zu einem meist nicht exakt definierten aber allgemein volkswirtschaftlich akzeptierten Sicherheitsniveau.

Einschlägige Literaturen aus dem Bereich des Risikomanagements beschreiben den Begriff Sicherheit wie folgt:

*„Sicherheit gegenüber einer Gefährdung besteht dann, wenn diese Gefährdung durch geeignete Maßnahmen unter Kontrolle gehalten oder auf ein akzeptierbar kleines Maß beschränkt wird. Eine absolute Sicherheit kann nicht erreicht werden.“* (SIA160, 1989)

oder

*Sicherheit ist der „Zustand, der frei von unvertretbaren Risiken der Beeinträchtigung ist oder als gefahrenfrei angesehen wird.“* (EN 61508-1:2011-02), also ein Zustand der voraussichtlich störungs- und gefahrenfreien Funktion bzw. Nutzung einer Anlage, Einrichtung, etc.

Folgerichtig ist dazu die zentrale Frage, „Wie sicher ist sicher genug?“ zu stellen.

Diese Fragestellung setzt zunächst voraus, dass wir Gefahren, die in irgendeiner Situation vorhanden sind, erkennen können. Sicherheit kann nur als relativer Zustand der Gefahrenfreiheit angesehen werden, der stets nur für einen bestimmten Zeitraum, eine bestimmte Umgebung oder unter bestimmten Bedingungen gegeben ist. Im Extremfall können aber durch Ereignisse, die sich nicht beeinflussen oder voraussehen lassen, sämtliche Sicherheitsvorkehrungen außer Kraft gesetzt werden. Sicherheit bedeutet daher nicht, dass Beeinträchtigungen vollständig ausgeschlossen sind, sondern nur, dass sie hinreichend (beispielsweise im Vergleich zum allgemeinen „natürlichen“ Risiko einer schweren Erkrankung) unwahrscheinlich sind (Schneider, 2007).

Ein prägnantes Modell für die Relativität von Sicherheitsmaßnahmen ist das Kraftfahrzeugwesen, in dem es zahlreiche sicherheitstechnische Vorschriften und auch regelmäßige Überprüfungen gibt. Dennoch

können weder Vorschriften noch Prüfungen verhindern, dass mit dem Kraftfahrzeug absichtlich, böswillig oder unabsichtlich gefährliche Zustände herbeigeführt werden oder dass Teile des Kraftfahrzeugs bei Missachtung von Vorschriften in gefährlicher Weise nicht mehr funktionieren. Analog ergeben sich die Situationen auch für das Bauwesen (<http://de.wikipedia.org/wiki/Sicherheit>).

Im zweiten Schritt geht es darum, die entsprechenden Risiken zu analysieren: "Was kann wie passieren?" Dies ist eine Frage, die man objektiv und wertungsfrei beantworten muss. Diese wird ergänzt durch die Frage "Was darf wo passieren?" Ihre Beantwortung ist eine Angelegenheit der Wertung und verlangt nach bewussten Entscheidungen.

Die Zusammenfassung der Antworten auf die beiden letzten Fragen ist eine Beurteilung: „Ist das, was passieren kann, akzeptierbar?“ oder „Ist die Situation sicher genug?“ Für den Ingenieur stellen sich, wenn die Beurteilung negativ ausfällt, in der Regel weitere Fragen, nämlich nach den geeigneten Maßnahmen, um die gewünschte Sicherheit zu erzeugen (Schneider, 2007).

Bezieht man den vorgenannten Gedankengang auf den Brandschutz, so sind die Brandbeanspruchung eines tragenden Holzbauteils und der dadurch stattfindende Abbrand objektiv bekannte Gefahren. Wird ein Bauteil oder Tragwerk nach den Vorgaben der heute gültigen EUROCODE-Normenreihen beziehungsweise nach den speziell in jedem Land zusätzlich geltenden nationalen Anhängen NA (Zusatzbestimmungen) für eine Brandbeanspruchung bemessen, dann ergibt sich unter Anwendung der semi-probabilistischen Vorgehensweise mit Aufschlag von Sicherheitsfaktoren eine Wahrscheinlichkeit für ein Versagen von  $10^{-5}$  bis  $10^{-7}$ . Darüber hinaus wird gesellschaftlich akzeptiert, dass es zu Einstürzen, Schäden und Verlusten von Personen bzw. Leben kommt (akzeptiertes Risiko).

Interessant ist in diesem Zusammenhang, dass neben dem Übergang vom früheren globalen Sicherheitskonzept – charakteristische Lasteinwirkungen wurden zulässigen Lasten bzw. Spannungen gegenübergestellt – zum semi-probabilistischen Sicherheitskonzept, mit angepassten Aufschlägen sowohl auf der Einwirkungsseite als auch auf der Widerstandsseite, auch die Anforderungen an den Widerstand gegen Versagen oder Funktionsverlust im Brandfall stetig über die Jahre gestiegen sind. Als jüngstes Beispiel kann hierfür die Einführung der Rauchwarnmelderpflicht in den einzelnen Bundesländern genannt werden. Nach eigener Recherche mit Stand Mitte 2014 haben mit Ausnahme Berlins, Brandenburg und Sachsens (alle drei Bundesländer planen die Einführung der Pflicht für 2016) bereits alle deutschen Bundesländer diese eingeführt. Die Gesellschaft ist also offenbar zunehmend weniger bereit, Verluste an Menschenleben durch nicht oder zu spät erkannte Entstehungsbrände zu akzeptieren und stellt in der Folge immer höhere Anforderungen an die Beschaffenheit von Gebäuden und die Ausrüstung derselben mit sicherheitstechnischen Anlagen.

Dieser Trend kann anhand weltweiter Statistiken zu Brandtoten der vergangenen 30 Jahre (Abbildung 1-3) abgelesen werden und sollte nach Meinung des Verfassers natürlich auch bei den künftigen Überlegungen zu neuartigen Ansätzen, besonders im Brandingenieurwesen, berücksichtigt werden.

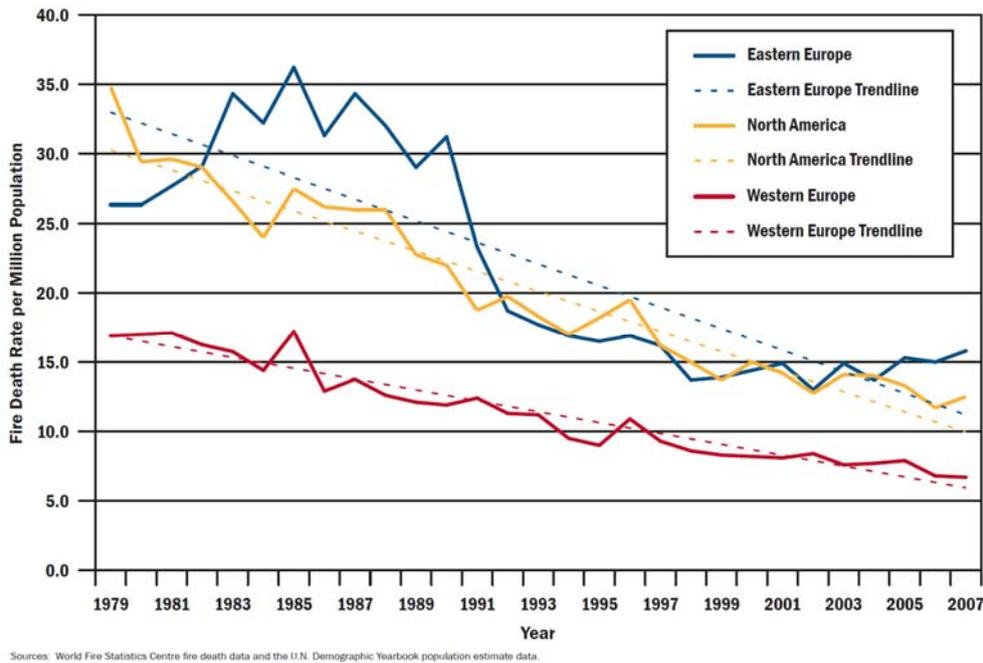


Abbildung 1-3: Trends in Fire Death Rates per Million Population by Region, 1979–2007 (FEMA, 2011)

#### 1.4 Der Brandfall

Mit den einfachen Worten „*Und Gott würfelt doch ....*“

oder dem niedergeschriebenen Urteil

*„Es entspricht der Lebenserfahrung, dass mit der Entstehung eines Brandes praktisch jederzeit gerechnet werden muss. Der Umstand, dass in vielen Gebäuden jahrzehntelang kein Brand ausbricht, beweist nicht, dass keine Gefahr besteht, sondern stellt für den Betroffenen einen Glücksfall dar, mit dessen Ende jederzeit gerechnet werden muss.“* (OVG Münster, 1987)

lässt sich die große Rolle des Zufalls bei der Brandentstehung und dem Brandverlauf in Räumen relativ gut darstellen.

Im sogenannten Brand- bzw. Verbrennungsdreieck (Abbildung 1-4) werden die für die Entstehung eines Feuers und des sich nachfolgend entwickelnden Brandes notwendigen Zusammenhänge von Brandgut, Sauerstoff und Zündenergie, welche gleichzeitig vorhanden sein müssen, gut dargestellt.

In der Regel ist in allen Gebäuden Brandgut unterschiedlichster Art und Weise stationär als immobile Brandlast oder beweglich in Form von Einrichtungsgegenständen und alltäglichem Gebrauchsgut als mobile Brandlast in meist großer Menge vorhanden.



Abbildung 1-4: Reaktionsdreieck Brandentstehung (<http://www.feuerwehr-potsdam.de>)

Nach der Entzündung eines brennbaren Materials breitet sich der Brand aus, wodurch die Menge der freigesetzten Energie im Raum stetig ansteigt. Dabei spielen in der anfänglichen Entstehungsphase des Brandes, welcher ausschließlich brandlastgesteuert vor sich geht, die Eigenschaften des Brandraumes (Größe, Beschaffenheit, Oberflächen, Öffnungen, etc.) nur eine sehr untergeordnete Rolle. Der benötigte Anteil an Sauerstoff für eine Zündung mit anschließender Brandentstehung und –entwicklung ist in der Regel als Raumluft ausreichend vorhanden. Erst in der fortschreitenden Brandentwicklung und dem Übergang zum Vollbrand entscheidet die Menge des vorhandenen Sauerstoffs sowie der Brandlast (Menge an Brandgut) über die Art des ablaufenden Brandgeschehens. Für den Brandverlauf muss dann zwischen „ventilationsgesteuerten“ (Sauerstoff nicht ausreichend vorhanden) und „brandlastgesteuerten“ (Sauerstoff ausreichend vorhanden) Verläufen unterschieden werden. Eine Sonderform des „ventilationsgesteuerten“ Brandes stellt der Schwelbrand dar, der sich durch eine unvollständige Verbrennung auf Grund ungenügender Sauerstoffzufuhr bei niedriger Verbrennungstemperatur charakterisiert.

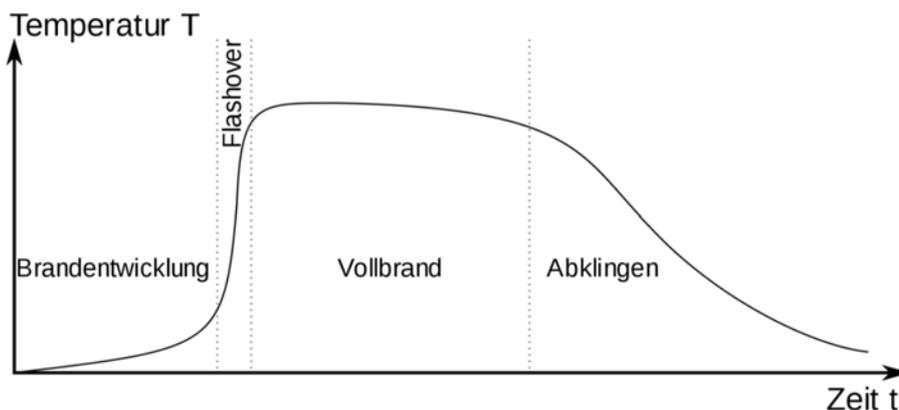


Abbildung 1-5: Grafische Darstellung eines Temperatur-Zeit-Verlaufes eines typischen Raumbrandes ohne intervenierende Einwirkung durch die Feuerwehr [[www.wikipedia.de](http://www.wikipedia.de)]

Die Zündenergie als dritte Komponente des Brandentstehungsvorgangs ist die am schwersten vorherseh- und erfassbare Größe. Meist entzünden sich initial mobile Brandlasten, wie Einrichtungs- und Gebrauchsgegenstände (z.B. Elektrogeräte) oder die Ursache ist auf menschliches Fehlverhalten, z.B. bei feuergefährlichen Arbeiten oder dem Umgang mit offenem Feuer bzw. auf mutwilliges Verhalten (Brandstiftung) zurückzuführen.

Entgegen oftmaliger Darstellung nahezu völlig unabhängig für die Wahrscheinlichkeit einer Brandentstehung ist die Art der verwendeten Bauweise bzw. die Beschaffenheit (brennbar oder nicht brennbar) der raumseitigen Bauteiloberflächen.

Dennoch werden vorwiegend für eine risikogerechte Beurteilung von Gebäuden von Versicherungsunternehmen Bauwerke in Bauartklassen (kurz BAK oder BKL) eingestuft. Diese ist abhängig von der Bauweise und korreliert im Wesentlichen direkt mit dem zu erwartenden Schadensausmaß im Brandfall, nicht mit der Brandentstehungswahrscheinlichkeit.

Die Klassifizierung ist nicht einheitlich, abhängig vom Versicherungszweig (z. B. landwirtschaftlich, gewerblich, industriell, privat) und der Tarifgestaltung werden mehrere Bauartklassen unterschieden. Für private, zu Wohnzwecken genutzte Gebäude werden in der Regel mindestens fünf Bauartklassen angesetzt:

Tabelle 1-1: Versicherung - Definition und Erklärung Bauartklassen (<http://www.top-versicherungswallexikon.de>)

Bauart- klasse	Beschaffenheit der Außenwände	Dacheindeckung
BAK I	massive Außenwände (z. B. Mauerwerk, Beton)	harte Bedachung (z. B. Ziegel, Schiefer, Beton, Metall ...)
BAK II	Stahl- oder Holzfachwerk mit Stein- oder Glasfaserfüllung, Stahl oder Stahlbetonkonstruktion mit Wandplattenverkleidung aus anderem Material als Holz oder Kunststoff. (Profilblech, Asbestzement)	harte Bedachung (z. B. Ziegel, Schiefer, Beton, Metall ...)
BAK III	Holz, Holzfachwerk mit Lehmfüllung, Holzkonstruktion mit Verkleidung jeglicher Art, Stahl- oder Stahlbetonkonstruktion mit Wandplattenverkleidung aus Holz oder Kunststoff, Gebäude mit einer oder mehreren offenen Seiten	harte Bedachung (z. B. Ziegel, Schiefer, Beton, Metall ...)
BAK IV	wie BAK I oder II	mit weicher Bedachung z.B. vollständig oder teilweise Eindeckung mit Holz, Reet, Schilf, Stroh oder ähnliches.
BAK V	wie BAK III	

Statistische Erhebungen der Versicherungsgesellschaften zum Vergleich von mineralisch errichteten Gebäuden (Bauartklasse I) und Gebäuden mit brennbar ausgeführten Konstruktionen (Bauartklasse III), wie sie z.B. im Forschungsvorhaben zur „Gleichsetzung von güteüberwachten, handwerklich gefertigten Holzgebäuden mit Fertighäusern bei Gebäudeversicherungen“ (Winter, et al., 2005) aufgeführt oder den Erhebungen zu Bränden und Brandschäden im Kanton Bern 1986 bis 1995 (Fontana, et al., 2002) zu entnehmen sind, zeigen jedenfalls keine signifikanten Unterschiede in der Höhe der Wahrscheinlichkeit einer Brandentstehung bezüglich der verwendeten Baustoffe. Einen weiteren Beweis liefern im Allgemeinen die weltweit veröffentlichten statistischen Verteilungen zu Brandursachen, aus denen abgeleitet werden kann, dass die Verwendung brennbarer Konstruktionsbestandteile die Brandentstehung weder begünstigt noch hervorruft, da auch hier die Ursache jeweils mit größtem Anteil nutzerbeeinflusst ist.

Neben den vorgenannten Bauartklassen existieren noch die sogenannten Fertighausgruppen (FHG). Bei den Fertighausgruppen werden drei Klassen unterschieden. Fertighausgruppe I enthält die aus rein mineralischen Baustoffen hergestellten Gebäude mit harter Bedachung. FHG II enthält die für den Holzbau typischen Gebäudearten, deren Außenwände feuerhemmend aus Stahl, Holz oder anderen Leichtbauteilen konstruiert sind und die außenseitig mit nicht brennbaren Baustoffen bekleidet werden. In die FHG III fallen schließlich sämtliche Gebäude, die keiner der beiden vorgenannten Klassen zugeordnet werden können.

Im Falle eines Brandes charakterisiert sich Holz mit wenigen Ausnahmen als gutmütiger Baustoff. Der Verbrennungsprozess läuft vereinfacht in vier nacheinander ablaufenden Phasen ab. In der ersten Phase kommt es zu einer Aufheizung und Abtrocknung der äußeren Randschichten. Ab dem Überschreiten einer Grenztemperatur (größtenteils abhängig von der Rohdichte des verwendeten Materials bzw. Werkstoffes) kommt es zu einer Pyrolyse (thermischen Umsetzung) des Holzes unter Freisetzung von brennbaren Gasen, welche sich dann an der Oberfläche entzünden und verbrennen. Zuletzt findet eine Verbrennung des festen kohlenstoffhaltigen Rückstandes statt. Ein wesentlicher und sehr positiver Effekt ist dabei, dass sich das Holz selbst durch seine isolierende Holzkohleschicht schützt und den weiteren Abbauprozess verlangsamt. Der dahinterliegende, ungeschädigte Querschnitt besitzt im Wesentlichen die unveränderten Festigkeits- und Steifigkeitseigenschaften.

Negativ ist, dass unter den in Bauwerken im Normalfall herrschenden Rahmenbedingungen ein Verbrennungsvorgang von Löschmaßnahmen unbeeinflusst so lange weiterläuft, bis sämtliches Brandgut verbraucht ist. Dementsprechend wird ein Brand, der in eine brennbare Konstruktion gelangt, sich dort zunächst ausbreiten. Durch die Verbrennung des Holzes werden toxische Gase und Pyrolysegase freigesetzt. Liegt im Brandraum Sauerstoffmangel vor (unterventilierter Brand) entzünden sich diese Pyrolysegase an anderer Stelle, z.B. beim Austritt durch Öffnungen vor die Fassade bei Untermischung mit frischem Sauerstoff. Dies führt dann unter Umständen zu einer ungewollt rascheren Brandausbreitung und höheren Beanspruchung der Fassaden von außen.

Bei der Betrachtung ist neben der Freisetzung von toxischen Verbrennungsprodukten durch Baustoffe bzw. Bauprodukte jeweils der entstehende Beitrag durch Gebrauchs- und Einrichtungsgegenstände, welche ebenfalls am Verbrennungsprozess beteiligt sind, zu berücksichtigen und ins Verhältnis zu setzen.

## **1.5 Problemstellung und Rechtfertigung der Themenstellung**

Bauen mit Holz oder unter Verwendung von holzbasierten Werkstoffen erfreut sich, über die vergangenen zehn Jahre gesehen, einer enorm steigenden Beliebtheit. Durch die stetig verfeinerten Bemessungsmethoden (DIN 1052, EUROCODE 5) und einer kontinuierlichen Weiterentwicklung computergestützter Ingenieurmethoden (Finite-Elemente-Methoden) für mechanische Beanspruchungen, lassen sich Holzkonstruktionen in nahezu allen Bereichen des Hochbaus als leistungsfähige Optionen gegenüber den konkurrierenden Baustoffen wie Stahl, Mauerwerk und Beton einsetzen.

Die Einsatzgebiete reichen von weitgespannten Konstruktionen in Hallen für Industrie-, Messe- oder Veranstaltungsnutzung bis zu hoch vorgefertigten, flächigen Varianten für Wand-, Decken- und Dachbauteile für Wohn-, Büro- und Verwaltungsbauten in ein- und mehrgeschossiger Ausführung. Sieht man von den baurechtlichen Regelungen einmal ab, sind mit Ausnahme von erdberührten und dauerfeuchten Bereichen, der Holzverwendung im Bauwesen keine wesentlichen Grenzen gesetzt.

Grundsätzlich werden in allen Ländern die für die Planung, Genehmigung und Ausführung von Gebäuden notwendigen Regeln und Vorschriften durch Bauordnungen vorgegeben bzw. festgelegt. Vergleicht man international die Anforderungen und Limitierungen für den Einsatz von Holz, so fallen diese selbst in den deutschsprachigen Ländern und sogar innerhalb dieser in den einzelnen Regionen äußerst unterschiedlich aus. Eine Tendenz für die einheitliche Betrachtung und Festlegung von brandschutztechnischen Anforderungen an Gebäuden in Holzbauweise zeigen jüngste Forschungsarbeiten, welche national durch Forschungsstellen wie z.B. das IBMB (Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz in

Braunschweig), den Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion der TU München oder im Rahmen von nationalen Einzelvorhaben und europäischen Forschungsclustern, wie zum Beispiel dem Netzwerk „Fire Safe Use of Wood“ (FSUW) durchgeführt wurden.

Für alle Länder sehr ähnlich bzw. in den Grundanforderungen gleich sind die Anforderung an den Schutz von Leib und Leben von Menschen und Tieren sowie die Vermeidung von negativen Auswirkungen auf die Umwelt und der Schutz von Sachgütern.

Für Deutschland definiert die Musterbauordnung (MBO, 2002) im Paragraphen MBO-§ 14 als brandschutztechnisch übergeordnetes, allgemeingültiges Schutzziel folgende Anforderungen:

*„Bauliche Anlagen sind so anzuordnen, zu errichten, zu ändern und instand zu halten, dass der Entstehung eines Brandes und der Ausbreitung von Feuer und Rauch (Brandausbreitung) vorgebeugt wird und bei einem Brand die Rettung von Menschen und Tieren sowie wirksame Löscharbeiten möglich sind.“*

Im Grundgesetz der Bundesrepublik Deutschland (BRD, 1949) wird in Art. 2 das Recht eines jeden auf Leben und körperliche Unversehrtheit festgelegt.

Neben der vorstehend aufgeführten, über sämtliche Landesbauordnungen gleichlautenden Grundsatzforderung zur Anordnung, Errichtung, Änderung und Instandhaltung von baulichen Anlagen können die allgemeinen Schutzzielanforderungen, wie nachfolgend aufgeführt, benannt werden:

- Schutz des Lebens und der Gesundheit von Menschen und Tieren  
Nutzer, Dritte und Rettungskräfte → öffentlich rechtliche Belange
- Schutz von persönlichen Sachwerten und deren Dritter  
Privat- und Betriebseinrichtungen, Güter, Waren → öffentlich und privatrechtliche Belange
- Schutz der Natur und Umwelt (Wasser, Boden, Luft) → öffentlich rechtliche Belange

Als grundlegende Anforderungen beschreiben die Musterbauordnung in §3 und in Folge auch die davon abgeleiteten Landesbauordnungen, dass

- *„Anlagen so anzuordnen, zu errichten, zu ändern und instand zu halten sind, dass die öffentliche Sicherheit und Ordnung, insbesondere Leben, Gesundheit und die natürlichen Lebensgrundlagen, nicht gefährdet werden“* und
- *„Bauprodukte und Bauarten nur verwendet werden dürfen, wenn bei ihrer Verwendung die baulichen Anlagen bei ordnungsgemäßer Instandhaltung während einer dem Zweck entsprechenden angemessenen Zeitdauer die an sie gestellten Anforderungen erfüllen und gebrauchstauglich sind“.*

Neben den rein baurechtlichen Schutzzielen können ergänzende Anforderungen aus volks- und betriebswirtschaftlichen Interessen entstehen. Hierbei handelt es sich um den Schutz von Waren und Produktionsgütern, der Begrenzung von Betriebsunterbrechungen oder der Wiedererlangung von Anlagengenehmigungen nach einem Brandereignis und der Maßnahmenoptimierung zur Erzielung einer wirtschaftlich tragbaren Versicherungsprämie.

Abschließend müssen in diesem Zusammenhang noch die Schutzziele zur Vermeidung unverträglicher Auswirkungen auf die Umwelt genannt werden, wobei diese im wesentlichen Bestandteil von öffentlich-rechtlichen Regelwerken (z.B. Löschwasserrückhalte-Richtlinie) sind und üblicherweise erst im Bereich großvolumiger Sonderbauten ihre Anwendung finden.

Zwar fallen die gestellten Anforderungen an das Verhalten von Tragwerken unter Brandbeanspruchung im nationalen (Bundesländer) wie auch internationalen Vergleich unterschiedlich hoch aus, die Beurteilung von Bauwerken im Bereich des Wohn-, Büro- und Verwaltungsbaus erfolgt jedoch überwiegend durch deskriptiv, also beschreibend bzw. präskriptiv, also vorschreibend festgelegte Regeln (Bauordnung). Dabei folgen die Regeln hauptsächlich dem Prinzip, dass Mindestanforderungen für Mustergebäude (in Deutschland (MBO, 2002) insgesamt fünf, vgl. Abbildung 1-2) mit maximalen Ausdehnungen bzw. Höhen beschrieben werden. Eine feingliedrigere Abstufung bzw. eine Interpolation zur gebäude- und nutzungsspezifischen Anpassung zwischen den festgelegten Grenzen ist in den deutschen Bauordnungen nicht vorgesehen. Für Gebäude, die sich zwischen zwei Klassifizierungsgrenzen befinden, lassen sich dementsprechend keine reduzierten Brandschutzmaßnahmen ermitteln. Es sind jeweils die höchsten Maßnahmen bis zur nächsten Grenze anzusetzen. Ebenso finden sich derzeit in Deutschland, mit Ausnahme des Bundeslandes Baden-Württemberg, weder in der Musterbauordnung noch in den daraus abgeleiteten Landesbauordnungen Regelungen zum Einsatz brennbarer Baustoffe in den Normalgeschossen bei Gebäuden mit mehr als fünf Geschossen bis zur Hochhausgrenze.

Eine Möglichkeit zur alternativen Beurteilung von Gebäuden ergibt sich aus § 67 der Musterbauordnung (MBO, 2002), in der auch eine an Schutzziele orientierte brandschutztechnische Bemessung zugelassen wird. Dabei ist in einem ganzheitlichen Brandschutzkonzept, z.B. mit Hilfe von anerkannten Ingenieurmethoden des Brandschutzes nachzuweisen, dass die in der Bauordnung verankerten Schutzziele des Brandschutzes zuverlässig erreicht werden können. Die generellen Anforderungen des §14 können in diesem Sinn als zu Grunde liegende Leistungsanforderungen (performance based requirements) verstanden werden.

Deterministische Ingenieurverfahren stehen hierzu zwar in begrenzter Menge für große Nutzungseinheiten, meist mit Sonderbaucharakter (Industriebau, Versammlungsstätte, ...), zur Verfügung, sind aber nicht ohne weiteres auf Wohn- und Büro- bzw. Verwaltungsgebäude und vor allem zur Beurteilung von Holzkonstruktionen anwendbar (z.B. äquivalente Branddauer  $t_a$ ).

Vielfältige Wünsche von Bauherrn und Architekten zu Bauweisen, welche häufig aus gestalterischen Gründen die Sichtbarkeit von Oberflächen aus Holz fordern, können durch diese fehlenden Beurteilungs- bzw. Bemessungsmethoden nicht erfüllt werden. „Echte“ Holzbauten werden durch die Bevölkerung gewöhnlich über erkennbare Tragstrukturen und sichtbaren Holzbekleidungen definiert. Ein weiterer Aspekt ist die anfangs beschriebene, durch diverse Forschung belegte positive Wirkung „fühlbaren“ Holzes auf die Nutzer bzw. allgemein den Menschen in Räumen.

Für die Realisierung wirtschaftlicher Konstruktionen und dem Bauen in nicht geregelten Gebäudebereichen werden deshalb in der heutigen Zeit zunehmend Nachweise des vorbeugenden Brandschutzes auf der Basis von umfangreichen Gutachten mit darin begründeten Abweichungen von den deskriptiven Vorgaben (Mustergebäude nach Bauordnung) erstellt. Erreicht werden diese Sonderkonzepte und -konstruktionen durch Nachweise fast ausschließlich auf Basis von „Erfahrungen und weiterführenden Versuchen“, welche in der Regel Genehmigungsverfahren mit hohem Aufwand nach sich ziehen. Die

Verwendung wissenschaftlich eindeutig belegbarer und künftig allgemein anwendbarer Regeln ist noch bei keinem dieser Objekte erkennbar.

Nach heutigem Stand der baurechtlichen Regelungen sind, ohne von diesen abzuweichen, in Deutschland – mit Ausnahme des Bundeslandes Baden-Württemberg – für Gebäude mit bis zu maximal fünf Geschossen (vgl. Abbildung 1-2, Gebäudeklasse 4) für tragende und aussteifende als auch für raumabschließende Wand- und Deckenbauteile ausschließlich Konstruktionen mit Aufbauten zu verwenden, die im Brandfall einen „hochfeuerhemmenden“ Widerstand erreichen. Diese Anforderung gilt per baurechtlicher Definition als erfüllt, wenn:

- das Bauteil eine durchgehende Schicht aus nichtbrennbaren Baustoffen aufweist (MBO, 2002) und
- die hohlraumfüllenden Dämmstoffe nicht brennbar sind sowie einen Schmelzpunkt von  $\geq 1000^{\circ}\text{C}$  haben (M-HFHHolzR, 2004) und
- allseitig eine brandschutztechnisch wirksame Bekleidung aus nichtbrennbaren Baustoffen angeordnet ist (M-HFHHolzR, 2004) und
- das Brandschutzvermögen der Bekleidung gemäß EN 14135 geprüft und die Leistungskriterien nach DIN EN 13501-2:2003-12, Abschnitt 7.6.4 während eines Zeitraumes von mindestens 60 Minuten (Kapselklasse K<sub>2</sub>60) erfüllt wurden (Bauregelliste A Teil2, Anlage 13 (2005/1)) und
- das Bauteil inklusive seiner Brandschutzbekleidung in Feuerwiderstandsprüfungen nach DIN EN 13501-2 mindestens die Klasse REI 60 bzw. EI 60 erreicht hat (Bauregelliste A Teil2, Anlage 0.1.2 (2012/2), Tabelle 1).

Alle Brandprüfungen sowohl für das Bauteil selbst, als auch für die Bekleidung werden auf Basis der Brandbeanspruchung nach der Einheits-Temperatur-Zeitkurve (DIN EN 1363-1:2012-10) vorgenommen.

Konstruktionen die sämtliche vorgenannten Bedingungen nachweislich erfüllt haben, werden durch die Ausstellung eines allgemein bauaufsichtlichen Prüfzeugnisses geregelt und verwendbar gemacht. Diese Bauteile können dann unter Berücksichtigung konstruktiver Grundprinzipien für Anschlüsse, Durchdringungen sowie Installationsführungen geplant und eingesetzt werden. Um ein gleichbleibendes Mindestmaß an Qualität in der Ausführungsplanung als auch der Ausführung selbst zu erhalten, haben sich Unternehmen, die solche hochfeuerhemmende Bauteile nach der Musterrichtlinie herstellen, einer laufenden Fremdüberwachung und Zertifizierung zu unterziehen.

Mit der Forderung des Baurechtes nach vorgenannten hochfeuerhemmenden Konstruktionen wird eine Erfüllung aller gesetzten Schutzziele bei Gebäuden bis zu fünf Geschossen angenommen.

Durch den baurechtlich speziell für den Brandschutz definierten Grundsatz im §14 MBO wird gefordert, dass durch geeignete Maßnahmen der Entstehung eines Brandes und der Ausbreitung von Feuer und Rauch (Brandausbreitung) vorgebeugt werden und bei einem Brand die Rettung von Menschen und Tieren sowie wirksame Löscharbeiten möglich sein müssen.

Weitere Schutzziele lassen sich für den Brandschutz aus den Bauordnungstexten nicht explizit entnehmen. Sie müssen entsprechend aus den gestellten Grundanforderungen selbst abgeleitet werden. In der Auslegung sind zusätzlich auch die Grundsätze bzw. Vorgehensweisen von Rettungs- und

Brandbekämpfungsmaßnahmen der Feuerwehr zu berücksichtigen. Als wesentliche Hilfestellung kann dazu das Grundsatzpapier der Fachkommission Bauaufsicht (Farmers, et al., 2008) herangezogen werden. Wie aus nachfolgender Aufgliederung der Schutzziele ersichtlich wird, werden unterschiedliche, geforderte Leistungsmerkmale zur Erfüllung verschiedener Schutzziele notwendig.

Durch traditionell begründete und ggf. nicht ohne weitreichende Auswirkungen veränderbare Zwangspunkte kann aber auch eine Reduzierung bzw. Abänderung bestimmter Merkmale nur in geringem Maße oder gar nicht möglich sein. Beispielsweise würde eine Reduzierung des Feuerwiderstandes von tragenden und aussteifenden Gebäudestrukturen innerhalb der Gebäudeklassen aus der Entwicklung der Bauordnung heraus allein durch einen Ansatz geeigneter Kompensationsmaßnahmen nicht alle Belange erfüllen können. Sämtliche taktischen Überlegungen der Feuerwehr im Einsatz zu verfügbaren Zeiten der Standsicherheit (sicheres Betreten zu Rettungs- und Löschmaßnahmen) brandbeanspruchter Gebäudeteile basieren auf den Gebäudemodellen der Bauordnung mit den verknüpften Feuerwiderstandsdauern. Dennoch bleibt auch hier die Frage nach der Wahl der anzusetzenden Beanspruchung für den Nachweis dieser Eigenschaften zu klären.

Wie zahlreiche Statistiken zeigen, kann die **Entstehung eines Brandes** durch baulich konstruktive Maßnahmen im Allgemeinen nur in sehr geringem Maße beeinflusst werden, da die Ursachen der Brandentstehung durchwegs auf technisches Versagen oder menschliches Fehlverhalten zurück zu führen sind. In der aktuellen Brandursachenstatistik für das Jahr 2012 führt das IFS (Institut für Schadenverhütung und Schadenforschung in Kiel), wie auch in den vergangenen Jahren, Elektrizität mit einer Häufigkeit von 30% als meist vorkommende Ursache auf. Sieht man von dem zweithöchsten Anteil (22%) unbekannter bzw. nicht zugeordneter Ursachen ab, folgen menschliches Fehlverhalten mit 16%, Überhitzung mit 11% und Brandstiftung mit 10% Häufigkeit. Alle weiteren aufgeführten Ursachen wie Blitzschlag, Explosion, feuergefährliche Arbeiten, offenes Feuer und Selbstentzündung liegen bei einem aufsummierten Anteil von ca. 11% und können dementsprechend als Einzelursache bei der Betrachtung nahezu vernachlässigt werden.

Technische Anlagen im Bereich der elektrischen Installationen, wie z.B. schneller und präziser ansprechende Fehlerstromschutzschalter oder Leistungsschutzschalter, welche die Entstehung von Störlichtbögen in der Elektroinstallation frühzeitig registrieren und automatisch den Stromkreis vor der Entwicklung eines Kabelbrandes unterbrechen können (Quelle: Siemens Innovation, Referenz-Nr. IN2012.09.6d), werden stetig weiterentwickelt. Es ist tendenziell davon auszugehen, dass sich mit der bereits stattfindenden kontinuierlichen Sanierung des Gebäudebestandes und der einhergehenden Anpassung der Installationsführung und –technik an den heutigen Stand der Technik der hohe Anteil an Brandursachen, welcher auf Elektroinstallationen oder –geräte zurückzuführenden ist, reduzieren wird. In diesem Zusammenhang muss für künftige Betrachtungen in Brände, welche im Inneren von Konstruktionen (sehr selten) ihren Ursprung haben und Brände die außerhalb der Installationsführung, z.B. in der Hohlraumdose durch lose Kontakte oder den elektrischen Endgeräten bzw. –verbrauchern durch Überlast entstehen, unterschieden werden. Bereits heute besteht ein technisch als sehr hoch anzusehendes Niveau bei Richtlinien für Elektroanschlüsse. Als anerkannte Regeln der Elektrotechnik gelten die Bestimmungen des Verbandes der Elektrotechnik, Elektronik und Informationstechnik e.V. – VDE, welche bei Einhaltung eine Brandentstehung innerhalb der elektrischen Leitungsführung so gut wie ausschließen lassen. Zusätzlich gibt der VdS, ein Unternehmen des Gesamtverbandes der Deutschen Versicherungswirtschaft e. V., mit der Richtlinie VdS-2023 (GDV, 2001) weitere Hinweise für „Elektrische Anlagen in baulichen Anlagen mit vorwiegend brennbaren Baustoffen.“

Aus dem vorgenannten Beispiel ist ersichtlich, dass in einigen Bereichen die stetige Weiterentwicklung der Technik bereits einen sehr hohen Beitrag zur Vermeidung der Brandentstehung und deren Auswirkungen auf die bauliche Struktur leisten kann. Ebenfalls sei an dieser Stelle auch noch mal auf die bereits in Kapitel 1.3 dargestellte, flächendeckende Einführung der Rauchwarnmelderpflicht im Wohnungsbau verwiesen. Bei gleichbleibendem Sicherheitsniveau und unveränderter Brandentstehungshäufigkeit sollte sich die dadurch zunehmende Früherkennung entsprechend positiv auf die künftige Auslegung von baulichen Mindestanforderungen auswirken, da die Schadenseintrittshäufigkeit (Wahrscheinlichkeitsdichte und Verteilungsfunktion) und das entstehende Ausmaß („worst credible“-Szenario) im heute angewendeten, semiprobabilistischen Sicherheitskonzept die Beaufschlagung von charakteristischen Eigenschaften (z.B. design fire scenario) wesentlich beeinflusst (vgl. hierzu auch Kapitel 3.2).

Die **Ausbreitung von Feuer und Rauch** (Brandausbreitung) ist entgegen der Brandursache direkt abhängig von der konstruktiven Ausbildung sämtlicher tragender, aussteifender und/oder raumabschließender Bauteile. Eine gleichbedeutende Rolle haben die Verbindungen der Bauteile untereinander und der leistungsfähige Verschluss von Öffnungen oder Durchdringungen.

Oberstes Grundprinzip zur Behinderung der Ausbreitung von Feuer und Rauch ist die Bildung von Zellen und Einheiten, welche die Auswirkungen eines Brandes auf einen oder wenige Räume ausreichend lange begrenzen und von Dritten fernhalten. In den meisten Fällen, insbesondere bei Wohn- oder Büro- bzw. Verwaltungsbauten bleibt ein Brand durch die Leistungsfähigkeit der umfassenden Bauteile und den nach bestimmter Zeit einsetzenden, brandbekämpfenden Maßnahmen der Feuerwehr auf diese abgegrenzte Fläche, vom Baurecht als Nutzungseinheit definiert bzw. den Initialbrandbereich begrenzt.

Neben den direkten Brandweiterleitungspfaden innerhalb von Gebäuden kann sich Feuer und Rauch aber auch, trotz funktionierendem baulichen Raumabschluss der jeweiligen Zelle bzw. Nutzungseinheit, über Öffnungen in der Fassade auf eine benachbarte Einheit ausbreiten. Da geometrische Anordnungen und die Qualität des Verschlusses der Fassadenöffnungen aus gestalterischen und nutzungsspezifischen Aspekten baurechtlich nur sehr gering beeinflusst werden können, muss ein Überschlag über diesen Weg zunächst akzeptiert werden. Hier verbleibt dann nur noch die Möglichkeit Regelungen zu treffen, die eine Begünstigung der Ausbreitung zeitlich weitestgehend behindern. Solche Regelungen betreffen derzeit national die Beschaffenheit bzw. das Material der angeordneten Fassadenoberflächen. Für niedrige Gebäude (GKL 1-3 nach Abbildung 1-2) werden baurechtlich normalentflammbare Baustoffe und für alle anderen Gebäude und Sonderbauten schwerentflammbare bzw. sogar nicht brennbare Baustoffe gefordert. Als übergeordnetes, jedoch in den Bauordnungstexten nicht aufgeführtes Schutzziel wurde durch den Normenausschuss (NABau) zum Brandverhalten von Baustoffen im Zuge der Erarbeitung eines Entwurfes zu Grundlagen für die Brandprüfung von Fassaden – derzeit letzte Fassung des Entwurfes (E DIN 4102-20:2010-03) – festgelegt, dass „bei einem Brand an der Gebäudeaußenwand es vor dem Löschangriff der Feuerwehr nicht zu einer Brandausbreitung über mehr als zwei Geschosse oberhalb der Brandetage kommen darf. Zu den übrigen Seiten (seitlich und nach unten) darf keine selbstständige Brandausbreitung außerhalb des Primärbrandbereiches stattfinden. Als notwendiger Zeitraum für die, durch entsprechende Fassadeneigenschaften, selbstständige Begrenzung der Brandausbreitung wurde 20 Minuten festgelegt. In einem abgeschlossenen Forschungsvorhaben (Klingelhöfer H.G., 2002) wurden die erarbeiteten Prüfgrundlagen unabhängig untersucht und bestätigt.

Weitestgehend abgeschlossene Forschungen, Untersuchungen und ausgearbeitete Regeln, vornehmlich aus dem Schweizer Großprojekt „Brandsicherheit und Holzbau“ aus den Jahren 2001 bis 2005 (LIGNUM, 2003), (Bart, et al., 2009) und der HighTech Offensive Bayern HTO TP2 (Winter, et al., 2008) stellen dazu Varianten bereit, die neben der rein materialtechnischen Seite auch über konstruktive Maßnahmen Brandüberschläge über die Fassade bremsen bzw. über die festgelegte Zeit behindern können.

Kommt es in seltenen Fällen zu einer Ausbreitung über die einzelne (Nutzungs-) Einheit, z.B. durch vorzeitiges Versagen von Bauteilen oder durch fassadenseitigen Brandüberschlag, hinaus, bilden die Umfassungsbauteile der benachbarten Einheiten weitere Barrieren. Werden auch diese übersprungen, wird der Brand an einer übergeordneten, abschnittsbildenden Ebene mit baurechtlich sehr hoher Wertung, baurechtlich bezeichnet als innere oder äußere Brandwand oder Gebäudeabschlusswand, schlussendlich vor weiterer Ausbreitung gestoppt.

Damit die vorgenannten raumabschließenden Eigenschaften von den Bauteilen wirksam erfüllt werden können, müssen diese zum einen über die notwendige Zeit standsicher bleiben und auch ein Ein- und Durchdringen des Brandes durch sich selbst, ihre Fügstellen, Verschlüsse von Öffnungen oder Installationssträngen verhindern. Drittes und ebenso wesentliches Kriterium ist, dass der Brand während des Zeitraums nicht in die Konstruktion gelangen darf und sich dort auf nicht bekämpfbaren Pfaden unkontrollierbar ausbreiten kann.

Um auf internationaler Ebene einheitliche Prüf- und Beurteilungsgrundlagen zu verwenden, wurde für jegliche Untersuchungen zur Feststellung vorgenannter Eigenschaften zum Erhalt der Tragfähigkeit, der Standsicherheit sowie des Raumabschlusses, inklusive der Verschlüsse von Durchdringungen (Fenster, Türen, Schotte und Schächte mit brandschutztechnischen Anforderungen) die Prüfung nach der sogenannten Einheits-Temperatur-Zeit-Kurve, kurz als ETK bezeichnet, nach ISO 834 (Abbildung 1-6) festgelegt. Diese normative Vorgabe einer zeitabhängigen Temperaturänderung im Versuchsstand gibt die aufzubringende Beanspruchung für Brandversuche vor. Sämtliche Klassifizierungen von Bauprodukten oder Bauteilen, wie zum Beispiel F60 national oder R60 europäisch, beziehen sich dementsprechend immer auf eine Brandbeanspruchung, welche dieser Einheits-Temperaturzeitkurve folgt, wodurch das Brandverhalten von Bauteilen in Bauwerken gemessen und miteinander verglichen werden kann. National ist der Ablauf dieses Prüfverfahrens in DIN 4102-2 (DIN 4102-2:1977-09) definiert.

Vorausgesetzt wird dabei, dass die ETK sämtliche, die Entwicklung eines Brandes beeinflussenden Randbedingungen wie die Art, Größe und Zusammensetzung der Brandlast, die Geometrie des Brandraumes, die während des Brandes herrschenden Ventilationsbedingungen usw., auf der sicheren Seite liegend abdeckt. Allein aus der vorgenannten großen Vielfalt der streuenden Randbedingungen ist ersichtlich, dass diese pauschalisierende Bemessungsgrundlage äußerst konservativ angelegt werden musste und dementsprechend für viele Einzelfälle zu hohe Anforderungen bzw. Beanspruchungen ergeben wird. Als wesentlicher Unterschied ist noch anzuführen, dass im Vergleich zu natürlich verlaufenden Bränden die Temperatur mit der Zeit stetig ansteigt. Reale Brände dagegen weisen im ersten Stadium meist einen wesentlich steileren Temperaturanstieg mit zum Teil deutlich höherem Temperaturmaximum auf, erlöschen jedoch nach Verbrauch jeglicher, zur Verfügung stehender Brandlast wieder von selbst (Abbildung 1-5).

Der Temperaturanstieg der Einheits-Temperaturkurve bei einem Normbrand in einem Prüfofen wird mathematisch in Abhängigkeit von der Zeit durch eine logarithmische Funktion beschrieben. Diese

Funktion liefert die Temperaturerhöhung  $\Delta\theta$  unter Berücksichtigung der Anfangstemperatur zum Zeitpunkt  $t_0$  im Brandraum. Die Temperaturerhöhung nach der Einheits-Temperaturkurve (ETK) wird entsprechend folgender Gleichung ermittelt:

$$\Delta\theta(t) = \theta(t) - \theta_{t=0} = 345 \lg(8t + 1) \quad [1]$$

Hierbei sind:

- $\Delta\theta(t)$  zeitabhängige Temperaturdifferenz gegen die Ausgangstemperatur in [K]
- $\theta(t)$  Brandraumtemperatur zum Zeitpunkt  $t$  in [K]
- $\theta_{t=0}$  Temperatur der Probekörper zum Zeitpunkt  $t=0$  (Versuchsbeginn) in [K]
- $t$  Zeit in [min]

Auf die historische Entwicklung dieser mittlerweile rund hundert Jahre alten Normbrandkurve wird an dieser Stelle nicht näher eingegangen. Abhandlungen hierzu finden sich in ausgewählten Literaturquellen wie z.B. (Babrauskas, et al., 1978) .

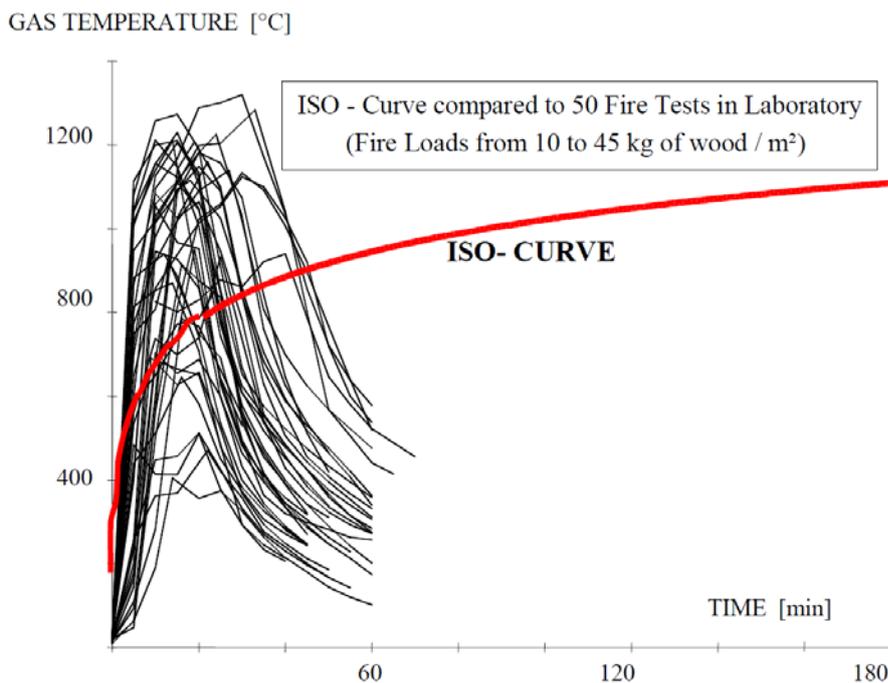


Abbildung 1-6: Vergleich aus 50 Naturbrandversuchen zur ETK, entnommen aus (LEONARDO DA VINCI PILOT PROJECT, 2005 S. 1-8)

Die **Rettung von Menschen und Tieren** ist das höchste aller anzusetzenden Schutzziele, für das im Regelfall kein Kompromiss z.B. zugunsten wirtschaftlicherer Bauweisen oder architektonisch außergewöhnlichen Entwürfen eingegangen werden darf.

Im Wesentlichen funktioniert die Erfüllung des Schutzziels durch Einhaltung

- der Anforderungen zur vorbeschriebenen Begrenzung der Ausbreitung von Feuer und Rauch sowie
- der Schaffung von funktionellen sowie sicheren Stellen und Bereichen zur möglichen Selbstrettung während der Brandentstehungsphase und
- der möglichen Rettung von Personen und Tieren durch Einsatzkräfte während der Brandentwicklungsphase und aus noch brandunbeanspruchten Bereichen.

Für Bauwerke bedeutet dies im Allgemeinen, dass die Grundstrukturen für die Rettungswege mit der Abtrennung von Nutzungseinheiten gegen die Ausbreitung von Feuer und Rauch sowie die Standsicherheit über ausreichende Zeit gewährleistet sein muss. Nur wenn diese in ausreichendem Maß vorhanden und funktionstüchtig sind, ist der Schutz flüchtender Bewohner bzw. Nutzer als auch der Rettungskräfte während der Bergungs- und Löscharbeiten über den Zeitraum des Brandereignisses vorhanden.

Abbildung 1-7 zeigt in einem anschaulichem Diagramm die einzelnen Phasen der Personenrettung aus einem Gebäude im Brandfall.

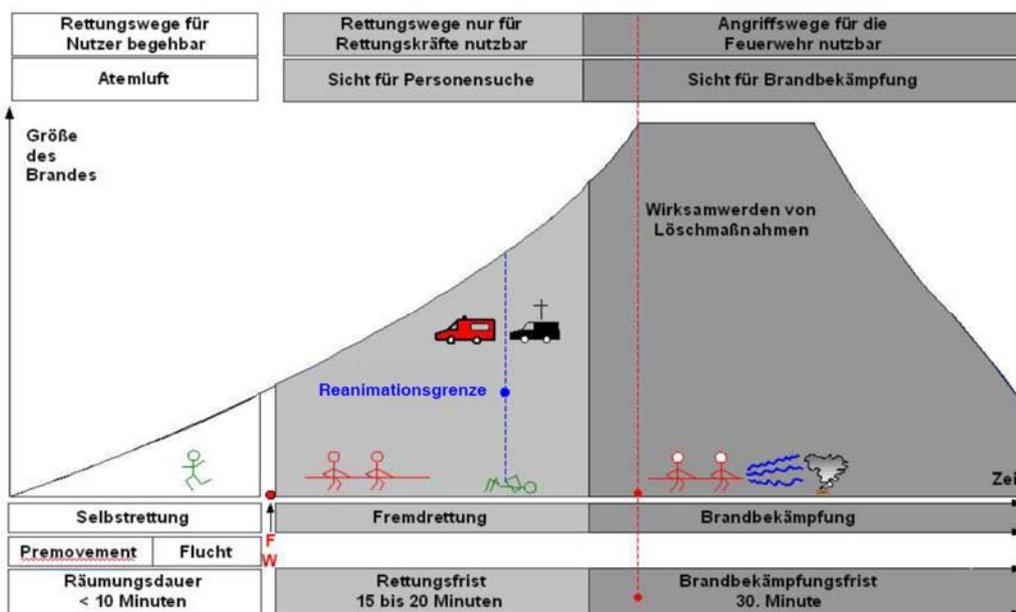


Abbildung 1-7: Brandphasen mit zugeordneten Hauptnutzungen der Rettungswege und Bedingungen für die Nutzbarkeit der Rettungswege im Brandfall, entnommen aus (Hosser, 2013)

Die bauaufsichtlichen Anforderungen an Rettungswege haben deshalb das vordergründige Ziel, dass der erste Rettungsweg möglichst sicher und deshalb auch möglichst lange für die Selbstrettung als Fluchtweg benutzbar ist. Im Idealfall, retten sich alle Personen innerhalb eines Gebäudes selbstständig aus den Gefahrenbereichen. Trotzdem geht der Gesetzgeber im zu Grunde gelegten System der Rettungswege davon aus, dass als „worst case“ der erste Rettungsweg durch Feuer und Rauch unpassierbar wird und es zu einem Totalausfall dieser Fluchtmöglichkeit kommt. Daher wird baurechtlich für jede Nutzungseinheit mit Aufenthaltsräumen ein zweiter (vom ersten Rettungsweg unabhängiger) Rettungsweg gefordert. Diese Unabhängigkeit gilt im Normalfall (keine Sonderbaunutzung) nur für die vertikalen Teile der Rettungswege. Anforderungen an die Unabhängigkeit der horizontalen Rettungswege werden erst in Gebäuden

besonderer Art und Nutzung mit einem zu erwartendem höheren Personenaufkommen gestellt. Dementsprechend dürfen in Standardgebäuden die beiden unabhängigen vertikalen Rettungswege über denselben Rettungsweg (Flur) erreicht werden.

Für alle Aufenthaltsräume von Nutzungseinheiten, die nicht zu ebener Erde liegen, gilt, dass der erste Rettungsweg über eine Treppe (ortsfester Rettungsweg) führen muss. Der zweite Rettungsweg kann über eine weitere Treppe oder eine mit Rettungsgeräten der Feuerwehr erreichbare Stelle führen. Treppen oder Flure, die der Sicherstellung des ersten oder zweiten Rettungsweges dienen, werden als notwendige Treppen bzw. notwendige Flure bezeichnet. Auf einen zweiten Rettungsweg darf verzichtet werden, wenn die Rettung über einen sicher erreichbaren Treppenraum erfolgen kann, in den Feuer und Rauch nicht eindringen können (Sicherheitstreppenraum).

Als Rettungsgeräte der Feuerwehr stehen für Gebäude mit einer Brüstungshöhe von zum Anleitern bestimmten Fenstern oder Stellen bis zu acht Metern über der Geländeoberfläche im Mittel tragbare Leitern, für anleiterbare Fenster oder Stellen bis zu 23 m Hubrettungsmittel (Drehleiterfahrzeuge) der Feuerwehr zur Verfügung.

In den entsprechenden Vorschriften der LBOs und ergänzende Verordnungen, Richtlinien und Technischen Baubestimmungen finden sich die konkretisierten Anforderungen an

- notwendige Flure und Laubengänge
- notwendige Treppen
- notwendige Treppenräume bzw. sichere Außentreppe
- Sicherheitstreppenräume
- Ausgänge ins Freie
- maximale Länge von Rettungswegen
- Größe und Anordnung von Fenstern, die als Rettungswege dienen
- Rettungsgeräte der Feuerwehr
- Feuerwehrflächen

(Quelle Brandschutzatlas (Mayr, et al., 2014))

Neben den vorgenannten, rein geometrischen und organisatorischen Vorgaben werden durch das Baurecht als zweite wesentlich Komponente des Systems der Rettungswege bauliche Vorgaben zu den Mindestwiderständen und der Materialität der Tragstruktur und des Raumabschlusses der umfassenden als auch rettungswegführenden Bauteile vorgegeben. Hier gilt ebenfalls, je höher das Gebäude (größer die Gebäudeklasse), desto höher sind die gestellten Anforderungen. Geregelt werden hauptsächlich

- der Feuerwiderstand sowie der Raumabschluss der Umfassungsbauteile (Treppenraumwände)
- die Brennbarkeit der Baustoffe von Bauteilen, Einbauten und Bekleidungen
- die Mindestbeschaffenheit von Öffnungsverschlüssen in den Treppenraum (Türen, Schotte, ...)
- das Mindestmaß an Öffnungsflächen (Fenster, Klappen) zur Rauchableitung ins Freie, sowie Angaben zur Position und Art der Aktivierbarkeit (manuell oder automatisch) im Brandfall.

**Wirksame Löscharbeiten** müssen grundsätzlich dadurch ermöglicht werden, dass die Feuerwehr eine bauliche Anlage von der öffentlichen Verkehrsfläche aus ungehindert erreichen und die Rettungswege als Angriffswege nutzen kann. Zusätzlich müssen durch Sicherstellung einer ausreichenden Standsicherheit für den Brandfall die wirksamen Löscharbeiten für eine bestimmte Zeit ermöglicht werden.

Grundlage für die Entscheidung einen Löschangriff innerhalb eines in Brand geratenes Gebäude durchzuführen, ist die zweifelsfreie Einschätzung der Feuerwiderstandsdauer tragender, aussteifender sowie umhüllender Bauteile. Durch die Feuerwehr kann die Einschätzung der noch vorhandenen Standsicherheit des Gebäudes nur auf Grund der Gebäudeklasse und der bereits vorhandenen Brandeinwirkung vorgenommen werden. Diese Entscheidung muss unmittelbar mit Beginn der Brandbekämpfung auf rein visueller Basis und ohne verfügbare weitere Informationen, z.B. aus einem Brandschutzkonzept, durch die am Einsatzort befindliche Leitung getroffen werden können. Daraus ergibt sich, dass eine feingliedrige Differenzierung des Feuerwiderstandes auf Basis ingenieurmäßiger Ansätze zur heutigen Zeit nicht unmittelbar zielführend ist.

Müssen aufgrund der Brandentwicklung beim Eintreffen der Feuerwehr einzelne, brandschutztechnisch abgetrennte Räume, die Nutzungseinheit, der Brandabschnitt/ Brandbekämpfungsabschnitt oder gar das Gebäude aufgegeben werden, können aber die benachbarten Räume, Nutzungseinheiten oder Brandabschnitte / Brandbekämpfungsabschnitte / Gebäude durch den Feuerwehreinsatz geschützt werden, handelt es sich gleichwohl im bauordnungsrechtlichen Sinn um "wirksame Löscharbeiten".

Unterstützend können anlagentechnische Maßnahmen, wie Brandmelde- oder Löschanlagen eingesetzt werden, welche mit einer sehr hohen Wahrscheinlichkeit die Brandbekämpfung auf ein deutlich reduziertes Maß begrenzen. Dabei kommt es durch den Einsatz von Brandmeldeanlagen, im Optimalfall auf eine Leitstelle der Feuerwehr (ILS) aufgeschaltet, zu einer frühzeitigen Brandentdeckung und -meldung, wodurch der Brand in den überwiegenden Fällen noch im Entwicklungsstadium bekämpft werden kann. Sowohl das Beanspruchungsniveau als auch das Ausmaß der zu leistenden Brandbekämpfung sind zu diesem Zeitpunkt noch gering. Der Markt stellt hierzu ein sehr breites Spektrum an Varianten und Möglichkeiten für die Auslegung und den Betrieb von Meldeanlagen bereit. Baurechtlich geregelt sind derzeit nur die beiden „Extrema“,

- der singulären Installation von Rauchmeldern in Wohnräumen auf Grund der in den einzelnen Bundesländern eingeführten Rauchwarnmelderpflicht und
- die vollautomatische Brandmeldeanlage mit Aufschaltung nach DIN EN 54 Teil 1 (DIN EN 54-1:2011-06) und den zugehörigen weiteren Normenteilen.

Dazwischen existieren am Markt zwar Lösungen, die Verwendbarkeit zu Kompensationszwecken ist jedoch auf Grund der fehlenden baurechtlichen Akzeptanz nicht gegeben.

Einen weitaus höheren Beitrag kann die Anordnung einer automatischen Löschanlage, üblicherweise in Verbindung mit einer vorab beschriebenen Brandmeldeanlage leisten. Im Falle eines Brandes halten die auslösenden Sprinkler den sich entwickelnden Brand räumlich und in seiner Energiefreisetzung eng begrenzt. Dementsprechend ist die finale Bekämpfung des Brandes durch die Feuerwehr einfach und die Beanspruchung auf die den Brand umgebenden Bauteile gering. Da solche Lösungen derzeit noch einen sehr hohen anlagentechnischen Aufwand bedeuten und dementsprechend mit sehr hohen und damit fast immer unwirtschaftlichen Kosten verbunden sind, wird diese Variante zumindest im Wohnbau heutzutage noch nicht eingesetzt. Ein weiteres Hindernis ist der im Vergleich hohe Aufwand an Wartung und

sicherheitstechnischen Begutachtungen solcher Anlagen, die einerseits hohe laufende Kosten erzeugen und andererseits einen immer wieder kehrenden Zugang zu den einzelnen Nutzungseinheiten erfordern, welcher gerade im Bereich der Wohnnutzung sich oftmals als problematisch darstellt.

Eine meist mit dem Holzbau in Verbindung gebrachte und eng mit dem Schutzziel der Behinderung der Ausbreitung von Feuer und Rauch verbundene Problematik ist das Eindringen eines Brandes in die Konstruktion und damit in nicht kontrollierbare bzw. bekämpfbare Hohlräume. Unkontrollierbare Brände können innerhalb von Bauteilen über direktes Eindringen und Ausbreiten in Hohlräumen oder durch die Entstehung von Glimmbränden innerhalb der Konstruktion entstehen. Solche Brände führen zwar nicht unmittelbar zu einem Bauteilversagen, können nicht bekämpfbar aber über einen großen Zeitraum (oft über Tage) hinweg zu einer nicht selbst erlöschenden, weiterführenden Schädigung der Bauteile und final zu einem Totalverlust eines Brandabschnittes bzw. eines Gebäudes führen. In diesem Fall wäre das Schutzziel der wirksamen Löschmaßnahmen nicht erreicht.

Werden brennbare Baustoffe in Konstruktionen von mehrgeschossigen Gebäuden (GKL 4 und ggf. auch künftig GKL 5 nach Abbildung 1-2) verwendet, muss durch jeweils raumseitig angeordnete, geeignete Maßnahmen über einen ausreichenden Zeitraum das Eindringen des Brandes und die Entzündung brennbarer Bestandteile innerhalb des Bauteiles be- bzw. verhindert werden. In den meisten Bundesländern Deutschlands wird baurechtlich die Erfüllung dieser Anforderung durch die Anordnung einer sogenannten Kapselbekleidung gewährleistet. Für die Herstellung dieser wirksamen Kapselbekleidung werden derzeit ausschließlich nicht brennbare (mineralische) Bekleidungslagen in ausreichender Dicke gefordert. Der Nachweis der ausreichenden Wirksamkeit wird, wie auch bei sämtlichen anderen Untersuchungen von Bauteilen, mittels Brandprüfung unter der Beanspruchung nach der Einheits-Temperaturzeitkurve (ETK, vgl. Gleichung [1]) vorgenommen.

Alle vorgenannten Schutzziele gelten als erfüllt, wenn Bauwerke ohne Abweichung nach den Vorgaben der jeweils im entsprechenden Land geltenden Bauordnung geplant und ausgeführt werden. Die zahlreichen Erfahrungen der vergangenen Jahre aus der Realisierung von mehrgeschossigen Gebäuden in Holzbauweise haben jedoch gezeigt, dass mit wenigen Ausnahmen, eine vollständig konforme Ausführung nach den deskriptiven Regeln der Bauordnungen wegen vielfältiger Belange nicht möglich ist. Abweichungen in den verschiedensten Bereichen werden notwendig und der Nachweis der Gleichwertigkeit des abweichenden Ansatzes ist meist mit enormen zeitlichen und finanziellem Aufwand verbunden. Zudem hinterlässt dies stets eine Restunsicherheit bei den Planern und Bauherren bis zur vollständigen Genehmigung und Umsetzung.

An dieser Stelle setzt die vorliegende Arbeit an und soll entsprechende Hilfestellungen für die künftige Auslegung von Gebäuden in Holzbauweise liefern.

**Ziel** der vorliegenden Arbeit ist die Erarbeitung eines Vorschlages, wie künftig auf Basis ingenieurtechnischer Ansätze Wohn-, Büro- und Verwaltungsgebäude neben den deskriptiven Regeln der Bauordnung bemessen und beurteilt werden können. Um wirtschaftliche Bemessungsergebnisse zu erzielen, sind die spezifischen Eigenschaften von Gebäuden in Holzbauweise mit Hinblick auf den Einsatz

brennbarer Konstruktions-, Bekleidungs- sowie Dämmmaterialien und der einhergehenden Gefahren- bzw. Risikopotentiale im Ansatz zu berücksichtigen.

Im Vordergrund soll dabei die Erarbeitung eines Modells stehen, mit welchem auf Basis parametrischer Temperatur-Zeit-Kurven dem planendem Brandschutzingenieur die Möglichkeit geben werden soll, auf einfache Weise notwendige Maßnahmen und Bauteilaufbauten (Feuerwiderstand und Schutzbekleidung / Kapselung) für mehrgeschossige Holzgebäude zu definieren. Dabei sollen möglichst die heute vielfältigen Konstruktionsweisen, brennbare Kapselbekleidungen bzw. Raumboflächen und in begrenztem Umfang brennbare Dämmstoffe realistisch berücksichtigt und angewendet werden können. In der grundlegenden Systematik sollen die Prinzipien des EUROCODE gewahrt bleiben und das allgemein in der Tragwerksplanung bewährte Konzept der Bemessung nach Grenzzuständen mit Teilsicherheitsbeiwerten (Einwirkung  $E_d \leq$  Widerstand  $X_d$ ) für die Überlegungen herangezogen werden. Hierfür müssen belastbare Aussagen zur Zuverlässigkeit und Dauerhaftigkeit angesetzter Maßnahmen aufgezeigt und diskutiert werden.

Grundsätzliches Ziel der Bestrebungen ist, die bisher allein zur Verfügung stehenden deskriptiven Regelungen zu notwendigen Feuerwiderständen und Schutzzeiten von Kapselbekleidungen mit parametrischen Tabellenwerken sinnvoll und flexibel zu ergänzen.

Obwohl derzeit noch nicht alle Grundlagen (parametrischer Abbrand von Holz und Holzwerkstoffen, instationärer Wärmedurchgang und Hochtemperaturverhalten von mineralischen Bekleidungsmaterialien) zur rein rechnerischen Bemessung zusammengesetzter Bauteile auf Basis von parametrischen Temperatur-Zeitkurven vollständig erforscht und vorhanden sind, soll das zu erarbeitende Verfahren auch heute schon als aussagekräftiges Beurteilungsverfahren für Abweichungen vom derzeitigen Bauordnungsrecht herangezogen werden können.

Für die Berechnung der parametrischen Temperatur-Zeit-Verläufe werden nach einer durchzuführenden Studie notwendiger Eingangsparameter aus vorhandenen, wissenschaftlichen Erkenntnissen zu Verfahren der Naturbrandsimulation entsprechend ihrer Anwendungsgrenzen geeignete Ansätze ausgewählt und auf die zu lösenden Problemstellungen adaptiert. Zusätzlich werden in die rechnerisch ermittelten Brandverläufe an den zu erwartenden Zeitpunkten einsetzende Interventionsmaßnahmen (Löschangriff durch die Feuerwehr, ggf. ergänzt durch geeignete Anlagentechnik) implementiert und auf die reduzierte Energiefreisetzung angepasst. Sowohl für den Ansatz der parametrischen Brandkurve als auch für den Zeitpunkt, den Umfang und die Effektivität der einsetzenden Brandbekämpfungsmaßnahme wird eine Diskussion zur Auftretenswahrscheinlichkeit bzw. zur Ausfallwahrscheinlichkeit geführt.

Da die Leistungsfähigkeit der Feuerwehren über die Gesamtheit gesehen mit sehr hohen Streuungen (Einsatzstärke, Ausbildungs- und Ausrüstungsstand, neben- oder hauptberuflich) behaftet ist, wird als erster Ansatz eine Erhebung im Einsatzbereich der Berufsfeuerwehr einer deutschen Großstadt verwendet. Hierzu wurden aus einem definierten Zeitraum die Einsatzdaten und -protokolle gesammelt und für eine Verwendung in probabilistischen Modellen aufbereitet. Eine Erweiterung auf weitere Großstädte, aber vor allem auch auf die Erfassung der Leistungsfähigkeit von Feuerwehren im ländlichen Bereich kann im Anschluss an diese Arbeit im Zuge weiterer Forschungsarbeiten anhand des vorgestellten Verfahrens eingepflegt werden.

**Notwendige Abgrenzung:** Wegen der zu Grunde liegenden Vorgänge und Taktiken der Feuerwehr im Innen- und Außenangriff kann das angestrebte Verfahren grundsätzlich nur Gültigkeit für Bereiche von

Gebäuden besitzen, in denen der zweite Rettungsweg durch Rettungsgeräte der Feuerwehr sichergestellt werden kann. Für Hochhäuser werden andere Ansätze notwendig. Ebenfalls ist die Verwendbarkeit des in dieser Arbeit vorgestellten Modells für Sonderbauten nicht direkt gegeben, es muss im Vorfeld die Gültigkeit der verwendeten Eingangsparameter überprüft werden.

## **2 Beurteilung der Sicherheit von Gebäuden im Brandfall – Brandrisikobewertung**

### **2.1 Einleitung**

Der Begriff des Brandrisikos wird im Bauwesen sprachlich sehr breit gefächert und häufig nicht seiner eigentlichen Bedeutung entsprechend verwendet.

Richtigerweise wird im Ingenieurwesen das Risiko allgemein als das Produkt aus Eintrittshäufigkeit bzw. Eintrittswahrscheinlichkeit und der Ereignisschwere bzw. des Schadensausmaßes bezeichnet.

Die Eintrittshäufigkeit bezeichnet dabei die Häufigkeit, mit der ein Ereignis innerhalb eines bestimmten Zeitintervalls eintritt. Bei der Ermittlung ist auf die Verwendung einer genügend großen Menge an verfügbaren statistischen Daten und Erfahrungen aus der Vergangenheit zu achten. Nur auf Basis einer entsprechend großen Grundgesamtheit an Informationen und Daten lassen sich mit dem Verfahren der Risikobewertung ausreichend verlässliche Aussagen treffen.

Die Einheit des Schadensausmaßes hängt von der jeweiligen Betrachtungsweise ab. Ein Schaden lässt sich monetär beziffern oder als Wert für befürchtete Todesfälle bzw. potenziell schwer Betroffene (unter Festlegung eines Verletzungsgrades) darstellen. Nicht jedes Schadensausmaß lässt sich jedoch in Geld ausdrücken. Grundsätzlich könnte die Bewertung von Menschenleben auf der Grundlage externer Präferenzen des Marktes durchaus erfolgen, tatsächlich stehen dieser Bewertung jedoch inakzeptable ethische Probleme entgegen. In der EU werden Leben grundsätzlich nicht monetär bewertet. Ausnahme ist hier die Bewertung verschiedener medizinischer Maßnahmen bezüglich ihrer Effektivität zur statistischen Verlängerung der Lebenszeit der Bevölkerung, wobei bereits auch hier ethische Probleme auftreten können. Letztendlich ist mangels einheitlicher Definitionen für den "Schaden" die Bewertung oft subjektiv.

Das Risiko lässt sich in Anlehnung an (Spangenberg, 2008) anhand nachfolgender, in Abbildung 2-1 dargestellter Gleichung definieren. Anhand der Darstellung in den vier Rahmen ist zusätzlich das Prinzip der Maßnahmenermittlung erkennbar. Ebenfalls wird gezeigt, dass die Höhe und der Umfang von getroffenen Schutzmaßnahmen auch direkt die Eintrittshäufigkeit beeinflusst. Eine unmittelbare Ableitung aus dieser Tatsache ist die speziell für den Brandschutz gestellte Forderung der Bauordnungen, dass

*„bauliche Anlagen so anzuordnen, zu errichten, zu ändern und instand zu halten sind, dass der Entstehung eines Brandes und der Ausbreitung von Feuer und Rauch (Brandausbreitung) vorgebeugt wird und bei einem Brand die Rettung von Menschen und Tieren sowie wirksame Löscharbeiten möglich werden.“*  
aus §14 (MBO, 2002).

Die Brandrisikobewertung ist die methodische und rechnerische Erfassung von Risiken eines Brandes nach Maßgabe verschiedener Einflussgrößen zu dessen Entstehung, Verlauf und Schadenspotential.

In einer vom Verfasser betreuten Diplomarbeit zum Thema Brandrisikobewertung von Holzgebäuden (Stammler, 2009) wurden international vorhandene und heute meist für den Bereich des Brandschutzes verwendete Risikobewertungsverfahren recherchiert und hinsichtlich ihrer verwendeten Einflussparameter und der Anwendbarkeit auf die nationalen Problemstellungen gegenüber gestellt und analysiert.



Abbildung 2-1: Definition des Risikos und der Komponenten, in Anlehnung an (Spangenberg, 2008)

Nachfolgend wird ein Überblick über die Verfahren der Brandrisikobewertung als auch die Unterschiede der üblich verwendeten Verfahrenstypen geben.

## 2.2 Ablauf, Ziel und mögliche Verfahren zur Durchführung von Brandrisikobewertungen

Allen Bewertungsverfahren liegt ein ähnliches Ablaufschema zu Grunde. Zunächst müssen die Gefahren und deren Auswirkungen auf die zu bewertende Sache oder das Objekt erkannt bzw. eingeschätzt werden. Die für die jeweilige Gefahr zugehörige Eintrittswahrscheinlichkeit muss als Eingangsgröße auf Basis statistischer Berechnungen ermittelt werden.

Für eine spätere Vergleichbarkeit von Ergebnissen aus Risikobetrachtungen verschiedener Objekte muss sichergestellt sein, dass sämtliche Berechnungen auf Basis gleicher Faktoren und Annahmen, d.h. durch Anwendung desselben Bewertungsverfahrens durchgeführt wurden. Ein Vergleich von Ergebnissen, welche aus unterschiedlichen Methoden gewonnen wurden, ist nicht möglich.

Durch die Risikobewertung ergeben sich Zielwerte, die das Brandrisiko, meist anhand einer Kennzahl, darstellen. Wird das sich ergebende Risiko zu hoch eingeschätzt bzw. liegt das erhaltene Ergebnis oberhalb eines definierten Grenzwertes, werden bauliche oder anlagentechnische Maßnahmen bzw. Änderungen notwendig. Diese müssen die Eintrittshäufigkeit, die Versagenswahrscheinlichkeit und damit

das Schadensausmaß so reduzieren, dass sich im Ergebnis für das beurteilte Objekt / Gebäude ein akzeptiertes Risiko ergibt.

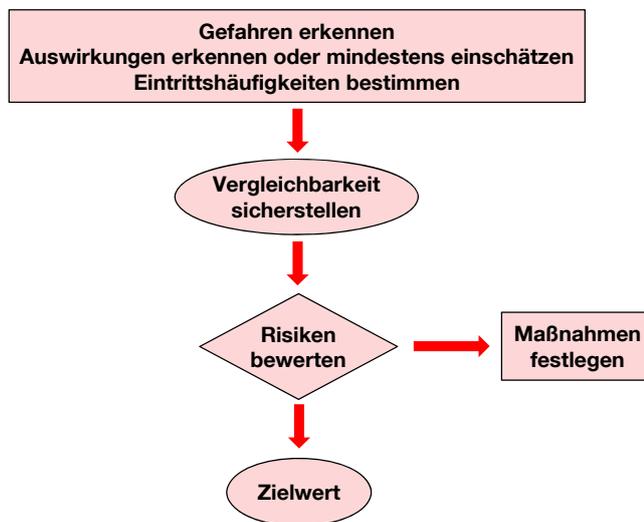


Abbildung 2-2: Ablaufschema einer Risikoanalyse, entnommen aus (Spangenberg, 2008)

Für die Bewertung des vorhandenen Brandrisikos eines Gebäudes stehen grundsätzlich drei verschiedene Verfahrenstypen zur Auswahl:

- Qualitative Bewertungsverfahren
- Quantitative Bewertungsverfahren
- Semi-quantitative Bewertungsverfahren

Sie unterscheiden sich im Wesentlichen in ihrem Aufbau und dem Detaillierungsgrad des sich ergebenden Ergebnisses bzw. der Aussagekraft.

Alle drei Verfahren werden ausführlich in der Masterarbeit (Stammler, 2009) beschrieben und gegenüber gestellt. Für ausgewählte Verfahren wurden anhand realer Baumaßnahmen bzw. Objekte beispielhafte Berechnungen durchgeführt.

Nachfolgend wird deshalb nur ein kurzer Überblick zu den drei Verfahrensarten gegeben.

Mit den **Qualitativen Bewertungsverfahren** können keine Brandrisiken berechnet bzw. durch Zahlen eindeutig bestimmt werden (Frantzych, 1998). Das Brandrisiko wird anhand von Check-Listen-Verfahren qualitativ bewertet. Für die bestehende Risikohöhe kann jedoch kein absoluter Wert ermittelt werden. Werden Maßnahmen auf Grund einer Beurteilung getroffen, erfolgt eine neuerliche Bewertung anhand der Check-Listen. Diese Art des Verfahrens ist dementsprechend geeignet, um wiederkehrend objektbezogene Brandschutzmaßnahmen zu identifizieren, die zur Reduzierung des Brandrisikos

beitragen. Eine direkte Ableitung notwendiger (Kompensations-) Maßnahmen zu abweichenden Bauausführungen vom geltenden Baurecht ist nicht möglich. Es kann beispielsweise mit Hilfe einer Check-Liste für einen Neubau oder ein Bestandsgebäude festgestellt werden, ob ausreichende organisatorische oder abwehrende Maßnahmen vorhanden sind und welche Kriterien das Brandrisiko vermindern können. Abbildung 2-3 zeigt beispielhaft einen Ausschnitt einer solchen Checkliste aus England:

<b>FIRE RISK ASSESSMENT CHECK SHEET</b>					
Use this checklist as a basis for your own risk assessment. Review regularly and keep up to date					
Premises:			Date:		
This fire risk assessment should identify:					
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Items which pose a risk of fire within the shop premises</li> <li>▪ Features of the shop which could place people at risk in the event of a fire</li> </ul>					
Measures which can be put into place to reduce or eliminate those risks					
<i>Hazard</i>	<i>Yes/ No</i>	<i>Risk Level Low/ Med/ High</i>	<i>Existing precautions and procedures</i>  <i>Recommendations for improvement</i>	<i>Date Done</i>	<i>Signature</i>
...					
...					
...					
...					
<b>COMBUSTIBLE MATERIALS</b>					
Combustible materials eg paper not stored safely					
Walls/ceilings have combustible coverings					
Other combustible items which may pose a significant threat					
Flammable substances are used/ stored in the shop					
Combustible waste is not correctly managed					
...					
...					
...					
...					
<b>FIRE DETECTION AND WARNING</b>					
There are no facilities or arrangements in place for detecting a fire					
...					

Abbildung 2-3: Auszug FIRE RISK ASSESSMENT SHEET (Onlinequelle <http://www.oxonrcc.org.uk/>)

Qualitative Bewertungsverfahren in Form von Checklisten kommen vornehmlich im Industriebau, im Büro- und Verwaltungsbau sowie zur Bewertung der Sicherheit öffentlicher Gebäude zum Einsatz und sind im Wesentlichen ein Teil des organisatorischen Brandschutzes. Hierzu werden diese überwiegend im Vorfeld der Nutzungsaufnahme zur Ermittlung von Forderungen zu Nachbesserungsmaßnahmen als auch von Versicherungsunternehmen zur Gebäudebewertung verwendet. Eine regelmäßige Anwendung qualitativer Bewertungsverfahren im Bereich des Wohnungsbaus konnte im Zuge der Recherchen nicht festgestellt werden.

**Quantitative Brandrisikobewertungen** stellen im Gegensatz zu den textbasierten qualitativen Bewertungen rein rechnerische Verfahren dar, mit denen tatsächliche Brandrisiken eines Gebäudes berechnet werden können. Sie teilen sich in statistische und deterministische bzw. stochastische Analyseverfahren auf.

Die statistischen Analysen werden auf Grundlage von komplexen Entscheidungsbäumen in Form von Ereignis- oder Fehlerbäumen durchgeführt.

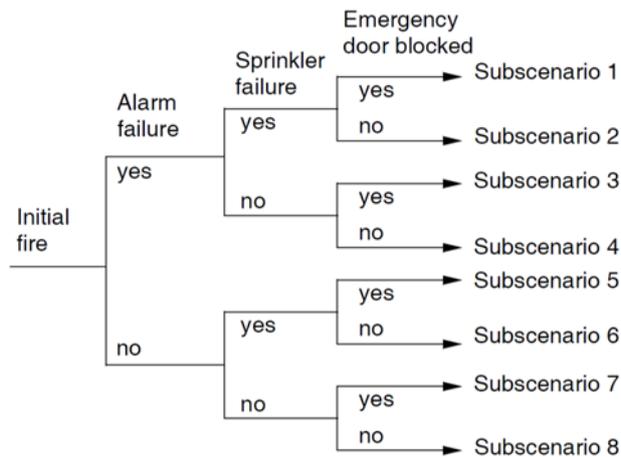


Abbildung 2-4: Beispielhafter Aufbau eines Ereignisbaumes (Frantich, 1998)

Abbildung 2-4 zeigt beispielhaft den Aufbau eines Ereignisbaumes. Für den Fall eines Brandausbruchs werden unterschiedliche Szenarien (Ereignisse) unter der Berücksichtigung der Ausfallwahrscheinlichkeit der vorhandenen Anlagentechnik bzw. der Eintrittswahrscheinlichkeit eines Versagens der angeordneten Infrastruktur erzeugt. Diese Einzelereignisse sind jeweils mit einer Eintrittswahrscheinlichkeit belegt. Aus der einfachen Multiplikation der Wahrscheinlichkeiten je Verzweigung lassen sich für das jeweilige Szenario Eintrittswahrscheinlichkeiten berechnen, mit denen sich dann eine globale Risikobeurteilung erstellen lässt.

Anwendung finden diese Verfahren vor allem im Bereich des Maschinenbaus als auch in der Elektrotechnik. Normativ wird in (DIN EN 60300-3-1:2005-05) auf die Ereignisbaumanalyse als geeignete Methode für generelle Zuverlässigkeits- sowie auch Risiko- und Sicherheitsanalysen explizit hingewiesen. Eine kurze Darstellung der Ereignisbaumanalyse findet sich auch in (DIN EN 31010:2010-11). Zuletzt ist eine neue Norm (DIN EN 62502:2011-06) mit dem Titel "Verfahren zur Analyse der Zuverlässigkeit - Ereignisbaumanalyse (ETA)" im Juni 2011 erschienen.

Eine ähnliche Vorgehensweise stellt das Fehlerbaumverfahren (vgl. Abbildung 2-5) dar. Hier werden ebenfalls anhand von verketteten Abläufen Wahrscheinlichkeitswerte berechnet. Im Gegensatz zu Ereignisbäumen werden hier Wahrscheinlichkeiten möglicher Ursachen für ein Systemversagen ermittelt. Fehlerbaumverfahren sind geeignet für eine Risiko- mit gleichzeitiger Fehleranalyse von zum Beispiel brandschutztechnischen Anlagen. In der Normenreihe (DIN 25424:1990-04) Fehlerbaumanalyse, werden neben der Darstellung der grundlegenden Methodik auch Handrechenverfahren zur Auswertung eines

Fehlerbaumes bereitgestellt. Des Weiteren wird in (DIN EN 61025:2007-08) mit der Fehlzustandsbaumanalyse ein analoges Verfahren für die Risikoanalyse geregelt.

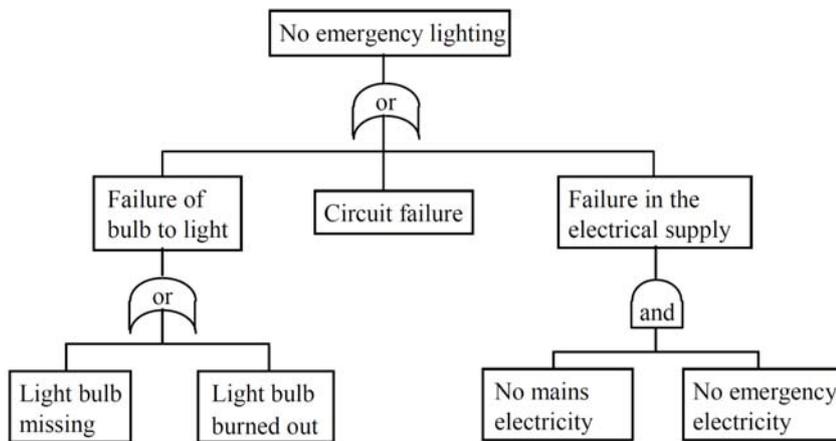


Abbildung 2-5: Beispielhafte Abfolge der Analyse mittels Fehlerbaumes (Frantzich, 1998)

„Weniger aufwendige quantitative Brandrisikobewertungsverfahren stellen die deterministischen Verfahren dar. Hier wird keine Aussage zu „Was kann wie oft passieren und in welcher Form tritt es auf?“ getroffen, sondern es werden Betrachtungen zu den Auswirkungen des schlimmsten Falles, der eintreffen kann, dem sogenannten Worst-Case-Szenario angestellt. Es wird für das Eintreten des schlimmsten Falles, also das maximale Schadensausmaß, die Wahrscheinlichkeit berechnet.“ (Stammler, 2009)

Werden mittels dieser Verfahren Finanzmodelle beurteilt, erfolgt neben der Berechnung des Worst-Case auch die Ermittlung des Best-Case sowie des wahrscheinlichsten bzw. mittleren Szenarios, bezeichnet als Average Case, Middle Case oder auch Most-Likely-Case. Letzteres ergibt sich aus dem Einsetzen von jeweiligen Mittelwerten.

Die Ungenauigkeit in diesem Verfahren besteht jedoch darin, dass sie nur einige diskontinuierliche Ergebnisse einschließt und alle anderen möglichen Resultate ignoriert. Zudem erfolgt keine Aufschlüsselung des Ergebnisses nach dessen Auftretenswahrscheinlichkeit. Trotz vorgenannter Nachteile und Ungenauigkeiten kommt diese Art der Analyse in vielen Unternehmensbereichen wegen ihrer Einfachheit zum Einsatz.

Als genaueste und aussagekräftigste quantitative Methode kann die stochastische Risikoanalyse unter Verwendung der Monte-Carlo-Simulation angesehen werden. Sie ist eine rein computergestützte Technik und wird von Fachleuten in vielen verschiedenen Branchen, wie z.B. in der Finanz- und Versicherungsbranche, dem Projektmanagement, der Energiewirtschaft, Transport- und Umwelttechnik, der Fertigung und Planung sowie Forschung und Entwicklung eingesetzt.

„Bei der Monte Carlo-Simulation werden durch Simulation Modelle von möglichen Ergebnissen durch Substituieren einer Reihe von Werten (der so genannten Wahrscheinlichkeitsverteilung) für jeden Unbestimmtheitsfaktor erstellt. Die Ergebnisse werden dann immer wieder neu berechnet, und zwar jedes Mal unter Verwendung eines anderen Satzes von Zufallswerten aus den Wahrscheinlichkeitsfunktionen. Je nach Anzahl der Unbestimmtheiten und der dafür angegebenen Bereiche, können auf diese Weise u. U. Tausende oder Zehntausende von Neuberechnungen während einer Monte Carlo-Simulation

vorgenommen werden. Mit anderen Worten, die Monte Carlo-Simulation generiert Verteilungen von möglichen Ergebniswerten.“ (Palisade, 2010)

Die Ergebnisse einer solchen Simulation können dann als Wahrscheinlichkeitsverteilungen (Dichtefunktionen) als auch kumulierte Verteilungen dargestellt werden. Abbildung 2-6 zeigt beispielhaft die beiden Graphen für eine Visualisierung der Simulationsergebnisse.

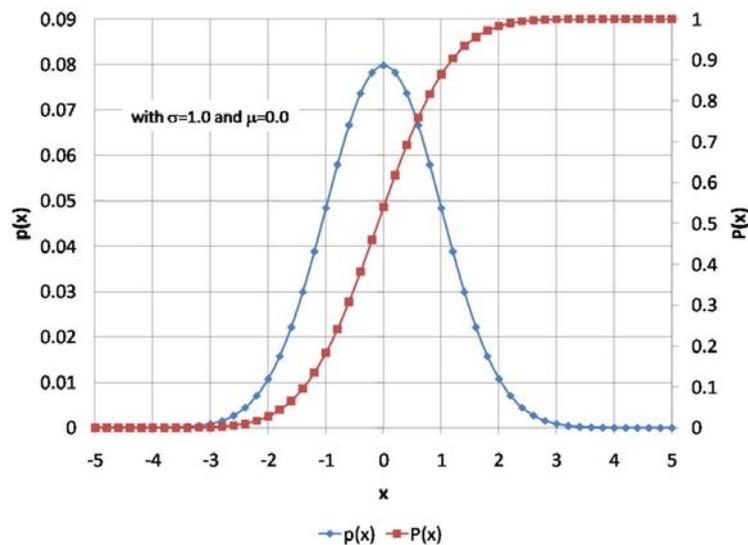


Abbildung 2-6: Beispiel für eine grafische Darstellung der Funktion einer Gauss'schen Wahrscheinlichkeitsverteilung (Mittelwert 0 und Standardabweichung 1) und kumulativer Verteilungsfunktion (entnommen aus <http://engineering.tamu.edu>)

Eine Kombination aus den qualitativen und den quantitativen Verfahren ist die **semi-quantitative Risikobewertung**. Sie kann wegen ihrer einfachen Rechenvorgänge auch händisch durchgeführt werden. Im Gegensatz zu den qualitativen Verfahren wird hier als eindeutiges Ergebnis ein Zahlenwert generiert, der dem vorherrschenden Brandrisiko einen bestimmten Wert zuweist.

„Semi-quantitative Bewertungsverfahren sind bezüglich ihres Zeitaufwandes und ihrer Ergebnisgenauigkeit zwischen den qualitativen und quantitativen Verfahren einzuordnen. Es ist möglich, in verhältnismäßig kurzer Zeit ein Risiko zu ermitteln und sich einen Überblick zu verschaffen. Wie bei den quantitativen Verfahren lassen sich auch hier die Ergebnisse unterschiedlicher semi-quantitativer Analyseverfahren nicht miteinander vergleichen bzw. nicht gleich interpretieren.“

Semi-quantitative Analysen werden meist anhand von sogenannten Index-Verfahren durchgeführt. Sie beruhen auf langjährigen Statistiken und bestehen aus Tabellen, in welchen für je eine bestimmte Gebäudeeigenschaft oder Ausstattung ein definierter Indexwert vorgesehen ist. Diese Werte werden mit Hilfe von Tabellen bestimmt und in einfachen Rechenvorgängen zu einem gesamten Index zusammengeführt.“ (Stammler, 2009) Anhand dieses Indexes lässt sich für eine bauliche Anlage das

Brandrisiko einschätzen und ein Vergleich zu Ergebnissen anderer (Referenz-)Beurteilungen von Objekten herstellen. Viele dieser Index-Verfahren wurden vorrangig für Brandschutz-Analysen entwickelt.

Bezüglich der vorgestellten Analyseverfahren ist vor der Durchführung einer Brandrisikobewertung also zu entscheiden, welche detaillierte Genauigkeit das Ergebnis liefern muss und wie viel Zeit in die Analyse investiert werden soll.

Abbildung 2-7 verdeutlicht den Zusammenhang zwischen Genauigkeit und Zeitaufwand der drei zur Verfügung stehenden Verfahren.

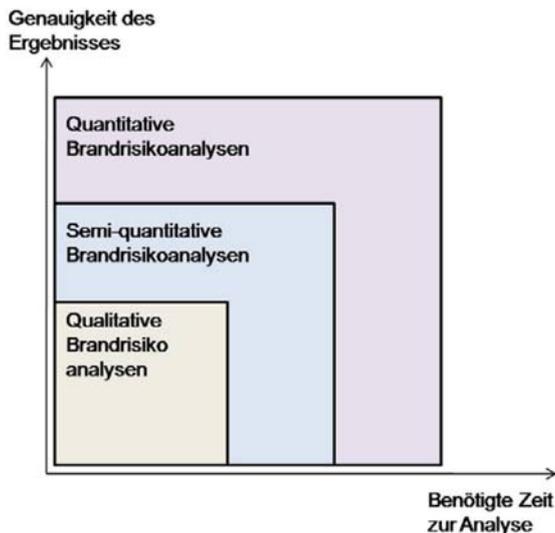


Abbildung 2-7: Zusammenhang von Aufwand zu Ergebnis bei Risikoanalysen, entnommen aus (Stammler, 2009)

Für den Bereich der Brandrisikobewertung wird international eine Vielzahl von verschiedenen Verfahren verwendet. Ein Grund für die große Anzahl verschiedener Verfahren ist die unterschiedlich hohe Bewertung bzw. der Stellenwert einzelner Maßnahmen in den Ländern. So werden baulichen, anlagentechnischen und organisatorischen Maßnahmen verschiedenste Bedeutungen zugewiesen und dementsprechend dominant in den Berechnungen verankert.

Abbildung 2-8 zeigt eine Übersicht der angewandten Verfahren im internationalen Vergleich. Grundsätzlich ist die Entwicklung von Bewertungsverfahren abhängig von den Normen und Bauordnungen der jeweiligen Länder.

Nach (Stammler, 2009) ist im europäischen Raum ein Trend zu den semi-quantitativen Analyseverfahren erkennbar. In der Arbeit wird ausgeführt, dass die Gretener Methode bereits in den Sechziger Jahren für eine Versicherung in der Schweiz entwickelt wurde und die Grundlage für viele später entwickelte Verfahren bildet. Nicht nur semi-quantitative Verfahren basieren auf der Gretener Methode, sondern auch quantitative Verfahren wurden auf Basis dieser Methode entwickelt. Ein Beispiel dafür stellt das Verfahren FRAMEworks aus den USA dar. Im Rahmen der Recherche stellte sich heraus, dass in den USA sowohl quantitative, als auch semi-quantitative Verfahren angewendet werden.

Land	Verfahren	Verfahrensart	
Schweiz	Gretener Methode (1960)	semi-quantitativ	
	SIA 81		
	VKF 2007		
Schweden / Norwegen	FRIM-MAB		
USA	NFPA 101 A (1995)		quantitativ
	BOCA		
	HFRI		
	NFRAP (1986)		
	FRAMEworks		
Australien	Vaughan Beck Methode (1979)		
	NBFSSC		
Canada	FIRECAM		

Abbildung 2-8: Auszug international verwendeter Verfahren, entnommen aus (Stammler, 2009)

„Die Anfänge der quantitativen Brandrisikobewertung finden sich in Australien, in dem von Vaughan Beck 1979 entwickelten ersten quantitativen Analyseverfahren. Die Entwicklung wurde vorgenommen, in der Absicht Gebäude zu planen, welche kosteneffektive Brandschutzkonzepte beinhalten. Aus diesem Grund bestehen die auf Beck basierenden stochastischen Verfahren aus den Komponenten „The Expected Risk of Life (ERL)“ und „Fire Cost Expectation (FCE)“. Das Berechnungsverfahren wurde in den USA dann für die Risikoanalyse und Kosteneffizienz von Hochhäusern weiter entwickelt.

Das Verfahren FIRECAM aus Canada wurde in Zusammenarbeit mit Vaughan Beck von David Yung entwickelt. Im Rahmen dieser Entwicklung wurden stochastische und deterministische Modelle kombiniert.“ (Stammler, 2009)

Da die meisten dieser Verfahren im Auftrag von Versicherungsgesellschaften entwickelt wurden, sind deren Methodik zwar veröffentlicht, detailliertere Informationen wie z.B. die einzelnen Berechnungsschritte oder die verwendeten Eingangsdaten aber meist nicht erhältlich.

Das zuletzt für die wissenschaftliche Beurteilung von mehrgeschossigen Gebäuden in Holzbauweise verwendete semi-quantitative Verfahren war die Indexmethode FRIM-MAB 2.0 in der Dissertation (Kampmeier, 2008). Die Abkürzung FRIM-MAB steht für „Fire Risk Index Method for Multi-storey Apartment Buildings“ und wurde an der Lund-Universität (Schweden) im Rahmen des Forschungsprojektes „Fire-safe Wood Frame Multi-storey Apartment Buildings“ auf Grundlage einer „Delphi-Umfrage“ speziell für den mehrgeschossigen Holzbau entwickelt.

„Die FRIM-MAB 2.0 wurde von einer Expertengruppe entwickelt und anhand einer Delphi-Befragung bewertet und bestätigt. Die Expertengruppe setzte sich aus jeweils einem Experten der vier teilnehmenden nordischen Länder Dänemark, Finnland Norwegen und Schweden zusammen. Die Gruppe für die Delphi-

*Befragung bestand aus insgesamt 20 Teilnehmern, die aus den Bereichen Ingenieurbüro, Feuerwehr, Materialprüfung, Forschung und Versicherungen stammten und ebenfalls aus den Ländern Dänemark, Finnland, Norwegen und Schweden kamen. Die Bewertung der einzelnen Gewichtungen erfolgte auf Grundlage des Wissens und der Erfahrung der Experten der Delphi-Gruppe.“ (Kampmeier, 2008)*

Der Index setzt sich aus 17 Hauptparametern zusammen, die mit unterschiedlich hoher Gewichtung in das Ergebnis der Brandrisikobewertung eingehen. Unter der Bezeichnung FRIM-MAB-D wurde in (Kampmeier, 2008) die Methode auf eine Anwendung für Deutschland weiterentwickelt. Durch eine erneute Delphi-Umfrage wurde eine Anpassung der Parametergewichtungen mit dem Ziel vorgenommen, eine vergleichende Bewertung des Brandrisikos ähnlicher mehrgeschossiger Wohngebäude der Gebäudeklasse 4 vorzunehmen.

### **2.3 Resultat und Schlussfolgerung**

Im vorhergehenden Kapitel wurden die drei unterschiedlichen Verfahren zur Risikobeurteilung, das qualitative, das quantitative sowie das semi-quantitative Verfahren, vorgestellt.

Bei der qualitativen Methode können weder Beanspruchungen ermittelt, noch die Höhe der Wirksamkeit von Maßnahmen beurteilt werden. Für das gesetzte Ziel dieser Arbeit, der Erarbeitung eines globalen Nachweisverfahrens auf Basis ingenieurtechnischer Ansätze, ist die Methode also ungeeignet. Entsprechend verbleiben nur die quantitativen Methoden mit der Möglichkeit einer Einbindung rechnerischer Abläufe.

Während bei den deterministischen Verfahren nur punktuell Werte für bestimmte Zustände ermittelt werden können, bieten die stochastischen Verfahren die Möglichkeit, streuende Einflussgrößen und damit reale Umgebungsbedingungen berücksichtigen zu können. Die Monte Carlo-Simulation als stochastisches Analyseverfahren bietet zusammengefasst die nachfolgenden entscheidenden Vorteile, weshalb dieses Verfahren für die vorliegende Arbeit gegenüber der deterministischen Analyse auszuwählen ist:

- Die Ergebnisse der Simulation enthalten die jeweilige Auftretenswahrscheinlichkeit zu den einzelnen Ereignissen. Es können die Ergebnisse somit direkt der Bewertung eines akzeptablen Risiko gegenüber gestellt werden (Probabilistik).
- Durch die generierten Daten bzw. Wahrscheinlichkeitsverteilungen ist es einfach, Diagramme zu den verschiedenen Resultaten und deren Auftretenswahrscheinlichkeit zur visuellen Beurteilung zu erstellen (vgl. Abbildung 2-6).

Durch Empfindlichkeitsanalysen lassen sich die Eingabeparameter ermitteln, welche die größten Auswirkungen auf das Resultat haben.

Die weitere Entwicklung des Ingenieurverfahrens wird daher in dieser Arbeit auf Basis einer statistischen Methode, der Monte-Carlo-Analyse vorgenommen.

### 3 Ansatz für ein innovatives Nachweisverfahren

#### 3.1 Grundprinzipien für Brandschutznachweise von Gebäuden und Anlagen

Für jedes Bauvorhaben müssen im Vorfeld zur baulichen Ausführung Nachweise erbracht werden, die eine Konformität der geplanten Maßnahme mit den einschlägigen Bestimmungen aufzeigen. Es muss nachgewiesen werden, dass die Allgemeinen sowie die speziell an den Brandschutz gestellten Leistungsanforderungen, wie

- die Gewährleistung der öffentlichen Sicherheit und Ordnung, insbesondere der Schutz von Leben, Gesundheit und der natürlichen Lebensgrundlagen nach (MBO, 2002) § 3 sowie
- die Behinderung der Entstehung eines Brandes und der Ausbreitung von Feuer und Rauch und die Mindestmaßnahmen zur Rettung von Menschen und Tieren und wirksamer Löscharbeiten nach (MBO, 2002) § 14

sichergestellt sind.

Die anzuwendenden Bestimmungen für die Ermittlung der Anforderungen ergeben sich aus den geltenden Bauordnungen in Verbindung mit den zugehörigen Verordnungen und Verwaltungsvorschriften auf Basis der je nach Gebäudeklassifizierung abgestimmten „Grundkonzepte“. Die erforderlichen Nachweise werden dann mit Hilfe von normativen Vorgaben, Richtlinien und Regeln, welche in den eingeführten technischen Baubestimmungen (Bauministerkonferenz, 2014) aufgelistet sind, erstellt.

Zum Inhalt der zu erstellenden Bauvorlagen gehören im Wesentlichen die Darstellung der Maßnahme in einem amtlichen Lageplan, die vollständigen Bauzeichnungen, eine Baubeschreibung sowie die Nachweise zur Standsicherheit, Brandschutz sowie Wärme-, Schall- und Erschütterungsschutz.

Abbildung 3-1 zeigt die hierarchische Abfolge der anzuwendenden Regelungen zur Erstellung der erforderlichen Nachweise. Werden diese Regeln als „Erfüllungsgehilfe“ für die Nachweise entsprechend Ihrer Veröffentlichung und Einführung verwendet, so gelten allgemein die geforderten Schutzziele als eingehalten.

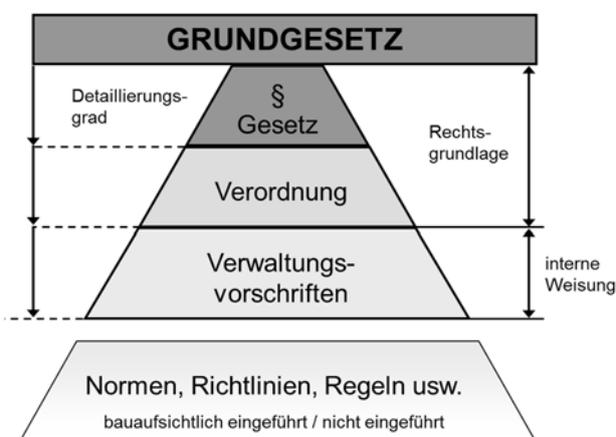


Abbildung 3-1: Hierarchische Darstellung der Regelungen im Bauwesen (entnommen aus (Mayr, et al., 2014))

Abweichungen von diesen eingeführten Regeln sind möglich, wenn in gesonderten Nachweisen eine gleichwertige Erfüllung der vereinbarten Schutzziele dargestellt werden kann. Obwohl sich in der heutigen Baupraxis regelmäßig zahlreiche Abweichungen in den Genehmigungsverfahren ergeben, sind diese auf Grund ihrer individuellen Charakteristiken sowie der wenigen zur Verfügung stehenden und hochkomplexen Nachweismöglichkeiten bisher nicht standardisierbar. Sollen Nachweise zu weitreichenden Abweichungen der baurechtlichen Vorgaben erbracht werden, ist vom Ersteller meist eine vertiefte Kenntnis der Grundlagen des Brandingenieurwesens erforderlich.

Der Nachweis, dass ein geplantes Vorhaben im Brandfall die allgemein gestellten Schutzziele erfüllen kann, ist ein wesentlicher Teil der Planung, der neben dem Schallschutz große Auswirkung auf die Gestaltung des Gebäudes sowie der verschiedenen Bestandteile wie Bauteile, Anlagen usw. hat. Je nach Umfang der Maßnahme bzw. dessen Gefährdungspotential für Mensch und Umwelt werden die Nachweise im Anschluss einer unabhängigen Prüfung durch Sachverständige unterzogen.

Die Gesamtheit der für den Brandschutz zu erbringenden Maßnahmen kann unterteilt werden in solche, die der Vorbeugung von Bränden bzw. dem Schutz von Personen, Tieren und Sachgütern dienen und solchen, die im Falle eines Brandes zur Abwehr weitgehender Auswirkungen dienen. Tabelle 3-1 gibt einen Überblick über die Zusammenhänge und den Inhalt der Nachweise.

Tabelle 3-1: Darstellung der vier Hauptgruppen eines Brandschutznachweises für bauliche Anlagen (Hosser, 2013)

Hauptgruppe		Nachweisinhalte
Vorbeugender Brandschutz	Baulicher Brandschutz	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rettungskonzept (horizontale und vertikale Rettungswege)</li> <li>• Brandwände (Brandabschnitte, Rauchabschnitte)</li> <li>• Tragende und aussteifende Bauteile wie Wände, Decken, Dachtragwerk</li> <li>• Raumabschließende Bauteile wie (Trennwände)</li> <li>• Außenwände</li> <li>• Treppen und Treppenräume, Flure</li> <li>• Ausbau (Schächte, Unterdecken, Hohlraumestriche, Doppelböden, Wand- und Deckenverkleidungen, Fußbodenbeläge, Dämmungen)</li> <li>• TGA (Aufzüge, Elektrotechnik, Raumluf-, Sanitär-, Wärme-/ Heiztechnik)</li> </ul>
	Anlagentechnischer Brandschutz	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Alarmierungsanlagen</li> <li>• Anlagen zur Brandbekämpfung (Feuerlöscher, Steigleitungen, Wandhydranten, Löschanlagen, Gebäudefunkanlagen, Feuerwehraufzüge)</li> <li>• Brandfallsteuerung von Aufzügen, Lüftungsanlagen, etc.</li> <li>• Maßnahmen zur Rauch- und Wärmeableitung</li> <li>• Feststellanlagen für Brand- und Rauchschutztüren</li> <li>• Ersatzstromversorgung, Sicherheitsbeleuchtung, Funktionserhalt</li> <li>• Blitzschutz</li> </ul>
	Organisatorischer Brandschutz	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Brandschutzordnung, Brandschutzbeauftragter, Selbsthilfe im Brandfall</li> <li>• Flucht- und Rettungspläne</li> <li>• Feuerwehrpläne</li> <li>• Brandschutz während der Bauzeit</li> </ul>
Abwehrender Brandschutz		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Flächen für die Feuerwehr</li> <li>• Feuerwehruzgänge</li> <li>• Löschwasserversorgung</li> </ul>

### 3.2 Das Sicherheitskonzept für ingenieurtechnische Brandschutznachweise im Bauwesen

Brandereignisse sind außergewöhnliche Vorkommnisse, welche ähnlich wie Explosionen, Hochwasser und Erdbeben entgegen den alltäglich auftretenden Einwirkungen auf Bauwerke (Eigen- und Nutzlasten) nur äußerst selten eintreten und kaum vorhersehbar sind.

Nach dem heutigen Stand der europäischen Normung mit der Umsetzung in die jeweiligen nationalen Regeln gilt als wesentliches Prinzip für sämtliche Nachweise der Tragsicherheit und der Gebrauchstauglichkeit, unter Normaltemperatur als auch unter Hochtemperatur (bezeichnet als konstruktiver Brandschutznachweis), die Beschreibung der Nachweissituationen durch Grenzzustände mit streuenden Einflussgrößen. Für diese Einflussgrößen werden Bemessungswerte ermittelt, die aus (meist genormten) charakteristischen Werten und Teilsicherheitsbeiwerten berechnet werden. Die Bemessungswerte bzw. Teilsicherheitsbeiwerte werden so festgelegt, dass der betrachtete Grenzzustand mit einer vorgegebenen Zuverlässigkeit nicht überschritten wird. Für die erforderliche Zuverlässigkeit werden in Abhängigkeit von den möglichen Folgen bei Überschreiten des Grenzzustandes Richtwerte genannt (Hosser, et al., 2008).

Die mechanischen Einwirkungen auf Bauwerke, Bauwerksteile und Tragwerke werden je nach Beanspruchungsart durch die entsprechenden Teile des EUROCODE 1 vorgegeben bzw. geregelt. Für die Bemessung bzw. den Nachweis von Tragwerken des Hochbaus ergeben sich die notwendigen Berechnungsgrößen aus dem Teil 1 (DIN EN 1991-1-1:2010-12) in Form von Wichten, Eigengewichts- und Nutzlasten.

Für die Bestimmung der allgemeinen Einwirkungen im Brandfall stehen zur Bemessung nach EUROCODE 1 der Teil 1-2 (DIN EN 1991-1-2:2010-12) sowie der zugehörige nationale Anhang NA (DIN EN 1991-1-2/NA:2010-12) zur Verfügung, wobei in letztgenanntem Dokument die für Deutschland geltenden Werte geregelt sind (Nationally determined parameter, NDP).

Neben einem normativen Verfahren eines vereinfachten Naturbrandmodells für vollentwickelte Raumbrände, welches in Kapitel 7.3 noch näher beschrieben und angewendet wird, sind in vorgenanntem nationalen Anhang zusätzlich normierte Rechenverfahren und Vorgaben zur Bestimmung der Wärmefreisetzungsrates, wie Brandlastdichte und Brandentwicklungsgeschwindigkeit angegeben.

In Kapitel BB.5 des nationalen Anhangs NA (DIN EN 1991-1-2/NA:2010-12) ist das für den Brandfall anzuwendende Sicherheitskonzept für die Ermittlung erforderlicher Zuverlässigkeiten von tragenden und/oder raumabschließenden Bauteilen eines Gebäudes im Brandfall festgelegt. Die erforderliche Zuverlässigkeit hängt von der Auftretenswahrscheinlichkeit eines Schadenfeuers in einer Nutzungseinheit eines Gebäudes und den mit dem brandbedingten Versagen der Bauteile verbundenen Schadensfolgen ab. Die zulässige bedingte Versagenswahrscheinlichkeit  $p_{f,fi}$  im Brandfall bzw. der damit verknüpfte Zuverlässigkeitsindex  $\beta_{fi}$  ergibt sich aus dem Quotienten der für alle Lastfälle geltenden zulässigen Versagenswahrscheinlichkeit  $p_f$  von Bauteilen und der jährlichen Auftretenswahrscheinlichkeit  $p_{fi}$  von mindestens einem Schadenfeuer in der betreffenden Nutzungseinheit (vgl. Gleichung [2] und [3]).

$$p_{f,fi} = \frac{p_f}{p_{fi}} \quad [2]$$

Als zulässige Versagenswahrscheinlichkeit wird für eine mittlere Schadensfolge ein Wert von  $1,3 \cdot 10^{-5}$  angesetzt, für geringe Schadensfolgen ist der Ansatz eines reduzierten Wertes von  $1,1 \cdot 10^{-4}$  ausreichend. Die zugehörigen Richtwerte für den Zuverlässigkeitsindex sind mit 4,2 bzw. 3,7 angegeben, wobei sich dieser aus der Umkehrfunktion der Standard-Normalverteilung der bedingten Versagenswahrscheinlichkeit errechnet (vgl. Gleichung [3]).

$$\beta_{fi} = -\Phi^{-1}(p_{f,fi}) \quad [3]$$

Für die Behandlung von Zuverlässigkeiten in der Tragwerksplanung stehen im EUROCODE 0 Anhang B (DIN EN 1990:2010-12) Empfehlungen für die Einhaltung der Kriterien zur Verfügung. Dieser Anhang umfasst zwei Verfahren zur Behandlung der Zuverlässigkeit von Bauwerken (für Grenzzustände der Tragfähigkeit). Durch Berücksichtigung von Schadensfolgeklassen, denen angenommene Schadensfolgen und die Gefährdung des Bauwerks zugrunde liegen, sowie einer Differenzierung der Qualitätsanforderungen an den Entwurf, die Berechnung und die Ausführung je nach Bauwerkstyp ist eine individuelle Anpassung der Teilsicherheitsbeiwerte für die Einwirkungen und die Bauteilwiderstände möglich.

Die jeweiligen Werte für den Zuverlässigkeitsindex wurden in (Hosser, et al., 2008) auf Basis eines Vergleichs der Zuverlässigkeit von unter Naturbrandbeanspruchung mittels stochastischer Methoden (FORM/SORM bzw. Monte-Carlo-Simulation) berechneten Stahl-, Beton- und Holzbauteilen und der unter Normbrandbeanspruchung ermittelt. Mittels der bedingten Versagenswahrscheinlichkeit im Brandfall bzw. dem zugehörigen Zuverlässigkeitsindex werden die Bemessungswerte (charakteristischer Wert multipliziert mit Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_{fi}$ ) für die maßgebenden Einflussgrößen der Brandeinwirkung, die Brandlastdichte  $q$  und die Wärmefreisetzungsrates errechnet.

Die Auftretenswahrscheinlichkeit eines Brandes (Schadensfeuer) wird auf Basis der Auftretenswahrscheinlichkeiten eines Entstehungsbrandes  $p_1$ , der manuellen Brandbekämpfung (Primärangriff durch den Nutzer)  $p_{2,1}$ , der Brandbekämpfung durch die Feuerwehr  $p_{2,2}$  sowie gegebenenfalls der Ausfallwahrscheinlichkeit durch automatische Brandbekämpfungseinrichtungen  $p_3$  (Löschanlagen) ermittelt.

$$p_{fi} = p_1 \cdot p_{2,1} \cdot p_{2,2} \cdot p_3 \quad \text{mit} \quad [4]$$

$$p_1 = \exp(a \cdot A^b) - 1 \approx a \cdot A^b \quad [5]$$

mit  $a$  .... Basiswert der bezogenen Brandentstehungshäufigkeit je Quadratmeter in  $(\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$   
 $b$  .... von der Nutzung und Unterteilung der Nutzungseinheit (Raumzellen) abhängiger Exponent  
 $A$  .... Grundfläche der brandschutztechnisch abgetrennten Nutzungseinheit in  $\text{m}^2$

Für Wohngebäude wird für  $a$  ein Wert von  $4,8 \cdot 10^{-5}$  und für  $b$  der Wert 0,9 vorgeschlagen. Vereinfacht darf hier für  $p_1$  ein Wert von  $3,0 \cdot 10^{-3}$  verwendet werden, dieser entspricht dann einer Nutzungseinheit von rund  $100 \text{ m}^2$ .

Als Werte für die Berücksichtigung der Brandbekämpfungsmaßnahmen werden im nationalen Anhang eine Ausfallwahrscheinlichkeit für die Primärbekämpfungsmaßnahme von 50 %, für die Feuerwehr im Bereich der gängigen Hilfsfrist 20 % und für automatische Löschanlagen (VdS Standard) 2 % angesetzt.

Sämtliche vorgenannten normativen Festlegungen, insbesondere die vereinbarten Versagenswahrscheinlichkeiten, gelten für die Bemessung zur tragenden, aussteifenden oder raumabschließenden Wirkung von Bauteilen. Für eine Bemessung der im Holzbau verwendeten Schutzbekleidungen (Kapselung) werden keine Vorgaben für anzusetzende Versagenswahrscheinlichkeiten gemacht. Die Gründe dafür dürften der bisher fehlende Bemessungsansatz und die hohen zeitlichen Abfolgen in der Normungsarbeit sein. Die Wirkung von Kapselbekleidungen wird bis heute ausschließlich auf rein versuchstechnischer Basis bestimmt bzw. nachgewiesen.

Aus dem nationalen Anhang NA zu EUROCODE 1, Teil 1-7 (DIN EN 1991-1-7/NA:2010-12) für außergewöhnliche Einwirkungen auf Hoch-, Ingenieur- und Infrastrukturbauten mit Regelungen zur Festlegung von Strategien zur Sicherung dieser Bauten unter außergewöhnlichen Einwirkungen kann entnommen werden, dass für Nachweise auf der Grundlage von Wahrscheinlichkeitsbetrachtungen der repräsentative Wert der außergewöhnlichen Einwirkung mit einer Überschreitungswahrscheinlichkeit von  $p \leq 10^{-4}/a$  festgelegt werden soll. Im Vergleich zu den Festlegungen im NA zu den Brandeinwirkungen würde dieser Wert eine geringe Schadensfolge darstellen.

### **3.3 Angestrebte Nachweissystematik für den konstruktiven Brandschutz im Holzbau im Rahmen dieser Arbeit**

Im Rahmen von schutzzielorientierten Brandschutznachweisen sollen die Konstruktionen künftig für realistische, objektbezogene Randbedingungen bemessen werden können, wobei hierfür die rechnerischen Methoden des Brandschutzingenieurwesens als Grundlage dienen sollen. Der Nachweis, dass die grundsätzlich gestellten Schutzziele eingehalten werden, soll nach Möglichkeit unter Verwendung des semi-probabilistischen Sicherheitskonzeptes unter Berücksichtigung von erforderlichen Zuverlässigkeiten geführt werden können.

Wie aus Tabelle 3-1 ersichtlich, ist im Zuge des baulichen Brandschutznachweises durch geeignete Methoden darzustellen, dass im Brandfall die tragenden und aussteifenden sowie die raumabschließenden Bauteile ihre Funktion über die jeweils erforderliche Zeitdauer nicht verlieren. Dieser Teilbereich des konstruktiven Brandschutzes umfasst für den Holzbau die Beurteilung

- des Feuerwiderstandes in Bezug auf die Tragfunktion und/oder den Raumabschluss,
- der brandschutztechnischen Schutzbekleidungen gegen das vorzeitige „Mitbrennen“ von Konstruktionsteilen
- der Durchdringungen und Abschlüsse sowie
- des Verhaltens brennbarer Oberflächen in Bezug auf die Ausbreitung (Räume / Fassade).

Da ein Versagen von Bauteilen und Bauteilschichten in den vorgenannten Bereichen sehr unterschiedliche Folgen auf das Brandgeschehen und dessen Auswirkung auf Mensch, Umwelt und Sachgüter hervorruft, müssen diesen, entsprechend ihrer daraus folgenden brandschutztechnischen Bedeutung, unterschiedlich hohe Anforderungen zugewiesen werden.

Die Schadensfolgeklassen des EUROCODES orientieren sich zunächst sehr grob und übergeordnet lediglich an der Höhe der zu erwartenden Verluste an Menschenleben. Im Rechenverfahren zur Bestimmung der Anforderungen an Baustoffe und Bauteile sowie an die Größe der Brandbekämpfungsabschnitte im Industriebau nach (DIN 18230-1:2010-09) werden, bereits auf den Brandschutz spezifisch abgestimmt, wesentlich feingliedrigere Beurteilungsmöglichkeiten geschaffen. Durch die Kategorisierung in Brandsicherheitsklassen SK<sub>b</sub> wird hier eine Unterscheidung notwendiger Bauteilanforderungen in Abhängigkeit der jeweiligen Versagensauswirkung vorgenommen.

Diese Systematik kann auch auf „normale Gebäude“ mit Wohn-, Büro- bzw. Verwaltungsnutzung in ähnlicher Weise adaptiert werden. Bezogen auf den Holzbau lassen sich hierdurch feingliedrigere Anforderungen stellen und den spezifischen Eigenschaften gegenüberstellen.

Werden die einzelnen Bauteile eines Gebäudes in ihre Funktionen aufgeteilt, so ergeben sich im Prinzip vier Kategorien, an die in absteigender Reihenfolge auf Grund ihres sinkenden Gefährdungspotentials immer geringere Anforderungen gestellt werden können. Diese Kategorien sollen im Folgenden als Brandsicherheitsklassen für den Holzbau mit der Abkürzung SK<sub>HB</sub> bezeichnet werden. Aus der Brandsicherheitsklasse ergeben sich folglich die einhergehenden Anforderungen an die Zuverlässigkeit bzw. der zulässigen Versagens- oder Ausfallwahrscheinlichkeit. Die vier Funktionen sind

- die Brandabschnittsbildung
- die Tragsicherheit
- der Raumabschlusses sowie
- die Brandausbreitung in und auf Bauteilen innerhalb von Nutzungseinheiten bzw. Brandabschnitten.

Tabelle 3-2 zeigt eine Verknüpfung von vorkommenden Bauteilarten bzw. -funktionen in Gebäuden mit den vorgeschlagenen vier Brandsicherheitsklassen SK<sub>HB0</sub> bis SK<sub>HB3</sub>.

Tabelle 3-2: Vorschlag für Brandsicherheitsklassen SK<sub>HB</sub> im Holzbau

Klasse	Bauteilart	Schadensausmaß bei Versagen
SK <sub>HB3</sub>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Umfassungsbauteile (Wände, Decken) von Brandabschnitten</li> <li>• Tragende und aussteifende Bauteile, deren Versagen zum Verlust des Raumabschlusses einzelner Umfassungsbauteile von Brandabschnitten führen</li> <li>• Lüftungsleitungen, Installationsschächte und –kanäle, die innere Brandabschnitte überbrücken bzw. Feuerschutzabschlüsse, Schottungen, o.ä., welche Brandabschnitte trennen</li> </ul>	Katastrophal
SK <sub>HB2</sub>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bauteile, deren Versagen zum Einsturz der tragenden Konstruktion (Tragwerk, Gesamtkonstruktion) innerhalb des Brandabschnittes führen</li> <li>• Bauteile, deren Versagen zum Verlust des Raumabschlusses und zu einer direkten Beanspruchung von ortsfesten Rettungswegen führen</li> </ul>	Groß
SK <sub>HB1</sub>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bauteile, deren Versagen zum Verlust des Raumabschlusses und zu einer Brandübertragung auf benachbarte Einheiten, jedoch nicht zum Ausfall von ortsfesten Rettungswegen führen.</li> <li>• Lüftungsleitungen, Installationsschächte und –kanäle, die trennende Bauteile überbrücken bzw. Feuerschutzabschlüsse, Rohrabschottungen, Kabelabschottungen und dergleichen in trennenden Bauteilen oder die solche mit geforderter Feuerwiderstandsklasse durchdringen</li> </ul>	mäßig

SK <sub>HB</sub> 0	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Schutzbekleidungen, bei deren Versagen ein Eindringen des Brandes in die Konstruktion und die Gefahr unkontrollierbarer Hohlraumbrände zu erwarten ist.</li> <li>• Entsprechend ihrer brandschutztechnischen Bedeutung untergeordnete Bauteile wie z.B. das Dachtragwerk, sofern das Versagen einzelner Bauteile nicht zur Beeinflussung vorgenannter Klassen SK<sub>HB</sub> 1 bis 3 führt.</li> </ul>	gering
--------------------	--	--------

Den übergeordneten Schutzzielen folgend, müssen Bauteile der Brandsicherheitsklasse SK<sub>HB</sub>3 die höchste Zuverlässigkeit in Bezug auf die Einwirkung durch ein Schadensfeuer aufweisen. Als elementarer Bestandteil des Brandschutzes ist diese Klasse dazu bestimmt, das Übergreifen eines Feuers auf andere Gebäude oder Gebäudeabschnitte zu verhindern. Ebenso muss der benachbarte Brandabschnitt für den Fall, dass das Ausmaß der Brandausbreitung erfolgreiche Löschmaßnahmen nicht mehr zulässt, für die Einsatzkräfte eine gesicherte Rückzugsmöglichkeit bieten. Im Grundsatzpapier zur "Rettung von Personen" und "wirksame Löscharbeiten" der Fachkommission Bauaufsicht (Farmers, et al., 2008) wird unter Absatz II, Pkt. 4 aufgeführt: *„wenn aufgrund der Brandentwicklung beim Eintreffen der Feuerwehr einzelne, brandschutztechnisch abgetrennte Räume, die Nutzungseinheit, der Brandabschnitt / Brandbekämpfungsabschnitt oder das Gebäude aufgegeben werden müssen, die benachbarten Räume / Nutzungseinheiten / Brandabschnitte / Brandbekämpfungsabschnitte / Gebäude durch den Feuerwehreinsatz aber geschützt werden können, handelt es sich gleichwohl im bauordnungsrechtlichen Sinn um "wirksame Löscharbeiten".“*

In Anlehnung an die Festlegungen in (DIN EN 1991-1-2/NA:2010-12) für „Standardgebäude“ ohne besondere Nutzung darf die auf ein Jahr bezogene Versagenswahrscheinlichkeit  $p_f$  die Schwelle für ein hohes Schadensausmaß von rund  $1,0 \cdot 10^{-6}$  nicht überschreiten.

Aus dem vorhergehenden Absatz wird ersichtlich, dass man annimmt, dass die auf Bauteile wirkende Brandbeanspruchung unter Umständen durch Löschmaßnahmen der Feuerwehr im zeitlichen Verlauf erst sehr spät bzw. gar nicht reduziert werden kann oder durch eine sehr schnelle Brandentwicklung das Ausmaß des Brandes bereits die Möglichkeiten für einen wirksamen Löschangriff der Feuerwehr übersteigt. Die Auslegung des Widerstandes brandabschnittsbildender Bauteile muss also so hoch gewählt werden, dass diese einer Beanspruchung über die gesamte Branddauer ohne Einwirken durch die Feuerwehr standhalten können. Dieser anzusetzende Widerstand kann ebenfalls aus der bisher verwendeten Bezeichnung für Bauteile der höchsten Brandwiderstandsklasse, der „feuerbeständigen“ Bauweise abgeleitet werden. Diese Bauteile sollen aus sprachlicher Bezeichnung heraus also gegen jegliches Feuer beständig bleiben.

In den aktuellen Regelungen der Bauordnungen (MBO) wird dieser höhere Anspruch an brandabschnittsbildende Bauteile im Vergleich zu den übrigen tragenden und/oder aussteifenden Bauteilen durch zusätzlich erforderliche Eigenschaften wie die mechanische Stoßbeanspruchbarkeit abgebildet. Innerhalb eines Brandabschnittes können die brandabschnittsbildenden zwar nur so lange wirksam bleiben, solange sie durch die aussteifenden Nachbarbauteile ge- bzw. unterstützt werden, hinter den brandabschnittsbildenden Bauteilen befinden sich jedoch jeweils unbeanspruchten Bauteile, die eine Aussteifung übernehmen können. Als einfachstes Beispiel kann die in der Gebäudeklasse 3 geforderte F30/F90-Gebäudeabschlusswand aufgeführt werden. Diese erfüllt bei einer Beanspruchung von außen auf das Gebäude einen neunzigminütigen Widerstand, obwohl das Gebäude selbst nur über Bauteile von 30 Minuten Widerstand verfügt.

Abbildung 3-2 zeigt zusammenfassend die anzusetzenden Einwirkungen und die notwendigen Widerstände von Bauteilen der Klasse SK<sub>HB3</sub>.

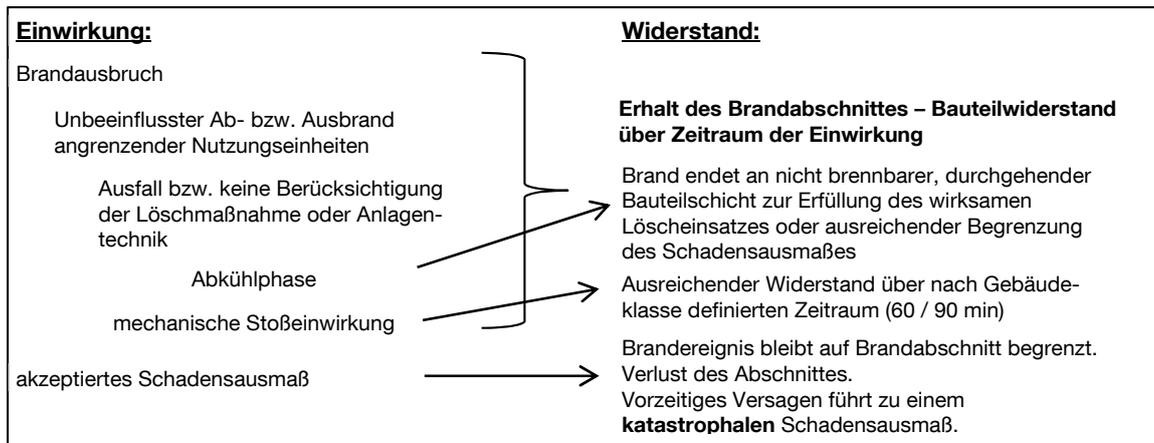


Abbildung 3-2: Gegenüberstellung der Einwirkungen zu notwendigen Widerständen für Bauteile der Klasse SK<sub>HB3</sub>

Für die Ermittlung der anzusetzenden Einwirkung bedeutet dies, dass aus allen anschließenden Nutzungseinheiten durch einen Vergleich der wesentlichen Parameter wie Größe der Einheit, Brandlast und Öffnungsflächen, diejenigen maßgeblich werden, welche die größte Beanspruchung aus Energiefreisetzungspotential  $HRR_{max,d}$  und zugehöriger Ventilation ergeben. Anlagentechnische Maßnahmen wie Branddetektion oder automatische Löschanlagen sollten wegen der Möglichkeit von Funktionsstörungen, Teil- oder Totalausfällen in der höchsten Sicherheitskategorie entsprechend ihrer Ausfallwahrscheinlichkeit nur reduziert berücksichtigt werden.

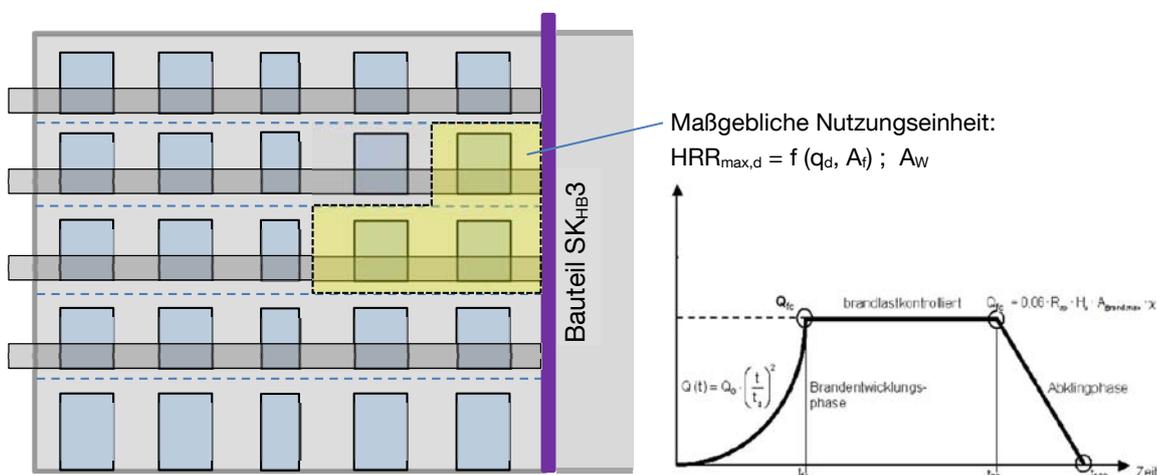


Abbildung 3-3: Beispielhafter Ansatz zur Ermittlung der maßgeblichen Beanspruchung in der Kategorie SK<sub>HB3</sub>

Bei der nächst niedrigeren Kategorie SK<sub>HB2</sub> wird grundsätzlich eine Intervention durch die Feuerwehr voraus gesetzt. Mit Eintreffen der Einsatzkräfte beginnt die eindeutig festgelegte Prozesskette der abwehrenden Maßnahmen, beginnend mit der Erkundungs- bzw. Orientierungsphase. In dieser Phase muss der Einsatzleiter unter Berücksichtigung aller ihm zur Verfügung stehenden Informationen zum zeitlichen Verlauf des Brandes festlegen, welcher Restzeitraum für das sichere Vorstoßen, Agieren und Zurückziehen der Einsatzkräfte innerhalb des Gebäudes noch zur Verfügung steht. Eine Fehleinschätzung

dieses Zeitrahmens führt in direkter Weise zu einer erheblichen, überwiegend lebensbedrohlichen Gefährdung (Einsturz von Gebäudeteilen) der im Einsatz befindlichen Kräfte.

Vorgenannte Entscheidungsabläufe der Feuerwehr für den Einsatz am Schadobjekt bedingen eine absolut eindeutige Korrelation zwischen den äußeren Gebäudemerkmalen und der Dauer des vorhandenen Widerstandes der Gebäudekonstruktion im Brandfall oder eine genaue Kenntnis der spezifischen Gebäudedaten. Diese Zuteilung der äußeren Gebäudemerkmale wird, zumindest in den deutschsprachigen Ländern, anhand von Gebäudeklassifizierungen über die Höhe von der Geländeoberkante bis zum Fußboden des obersten Geschosses mit Aufenthaltsräumen vorgenommen. In Abbildung 1-2 wurden bereits die Gebäudeklassen mit den zugehörigen Höhen der deutschen Musterbauordnung dargestellt. Werden in künftigen Systemen die Feuerwiderstandsklassen oder Raumabschlüsse objektspezifisch und nicht starr nach den fünf Gebäudeklassen festgelegt, so wird eine entsprechende Kennzeichnung der Gebäude in einem für die Feuerwehr leicht zugänglichen Bereich erforderlich. Vorstellbar ist hierzu eine Gebäudetafel mit den wichtigsten Kennwerten des Gebäudes im Bereich des Gebäudezugangs.

Anforderungen an die ausreichende Tragsicherheit von Bauteilen innerhalb eines Brandabschnittes (Bauteile SK<sub>HB2</sub>) ergeben sich aus der Notwendigkeit der Aufrechterhaltung von:

- Fluchtwegen für die Selbstrettung von Nutzern bzw. Bewohnern
- Angriffswegen für die Fremdrettung und den Löschangriff

Innerhalb des zeitlichen Ablaufes eines Brandfalles kommt es zunächst, sofern noch keine Beeinträchtigung von Rettungswegen stattgefunden hat, zu einer Selbstrettung des überwiegenden Teils der im Gebäude befindlichen Nutzer bzw. Bewohner. Für Gebäudebereiche, deren Einheiten bzw. Fluchtwege noch nicht direkt durch Branderscheinungen, wie Feuer, Temperatur und Rauch beansprucht sind, finden teilweise in den ersten 10 Minuten vor dem Eintreffen von Einsatzkräften zusätzlich Personenrettungen, ggf. nicht mehr selbstrettungsfähiger Personen, durch gegenseitige nachbarschaftlicher Hilfestellungen statt.

Bauteile in der Kategorie SK<sub>HB2</sub> müssen im Brandfall die Standsicherheit des Haupttragwerkes über die Dauer der Personenrettung bis zum Abschluss oder der Aufgabe der Löschmaßnahmen sicherstellen. Ein vorzeitiges Versagen der Bauteile würde zu einem Teileinsturz der Gesamtkonstruktion führen oder den Ausfall des baulichen Rettungsweges bedeuten und hat in den Auswirkungen einen direkten Einfluss auf die Gefahr von Leib und Leben der im Einflussbereich des Brandes befindlichen Personen (Nutzer, Bewohner, Rettungskräfte). Entsprechend der normativen Vorschläge nach (DIN EN 1991-1-2/NA:2010-12) darf für „Standardgebäude“ ohne besondere Nutzung die auf ein Jahr bezogene Versagenswahrscheinlichkeit  $p_f$  die Schwelle für ein mittleres Schadensausmaß von  $1,3 \cdot 10^{-5}$  nicht überschreiten. Damit liegt die akzeptierte Versagenshäufigkeit rund eine Zehnerpotenz unterhalb der brandabschnittsbildenden Bauteile.

Abbildung 3-4 zeigt zusammenfassend die anzusetzenden Einwirkungen und die notwendigen Widerstände von Bauteilen in der Klasse SK<sub>HB2</sub>.

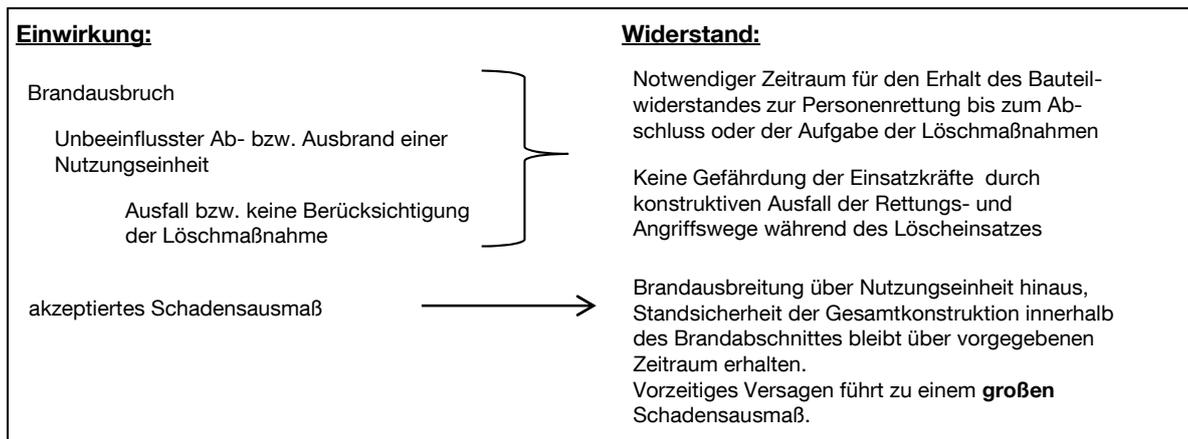


Abbildung 3-4: Gegenüberstellung der Einwirkungen zu notwendigen Widerständen für Bauteile der Klasse SK<sub>HB2</sub>

Die dritte Kategorie SK<sub>HB1</sub> enthält Bauteile, deren Versagen zwar eine ungewollte Brandausbreitung auf Bereiche Dritter zur Folge hat (Sachschaden), jedoch nur mittelbar Gefahren auf die Gesundheit bzw. das Leben von Personen oder Tieren darstellt. Mit der Klasse SK<sub>HB1</sub> findet somit ein Übergang von Personen- und Tierschutz zum Sachwertschutz statt. Mit dem reduzierten Schutzziel kann dementsprechend auch die auf ein Jahr bezogene Versagenswahrscheinlichkeit  $p_f$  weiter reduziert werden. Da hierfür keine Werte normativ existieren, wird vorgeschlagen, diesen aus dem Mittelwert zwischen dem nach Norm (DIN EN 1991-1-2/NA:2010-12) mittleren und geringen Schadensausmaß zu bilden. Aus der Mittelwertbildung ergibt sich dementsprechend ein Wert für  $p_f$  von  $5,5 \cdot 10^{-5}$ .

Innerhalb dieses Ansatzes wird angenommen, dass der Verlust des Raumabschlusses zwischen zwei benachbarten Nutzungseinheiten wegen des prognostizierten Löschangriffs durch die Feuerwehr keine erhöhten Auswirkungen auf die Beanspruchung der Bauteile der Kategorie SK<sub>HB2</sub> erzeugt.

Abbildung 3-5 zeigt zusammenfassend die anzusetzenden Einwirkungen und die notwendigen Widerstände von Bauteilen in der Klasse SK<sub>HB1</sub>.

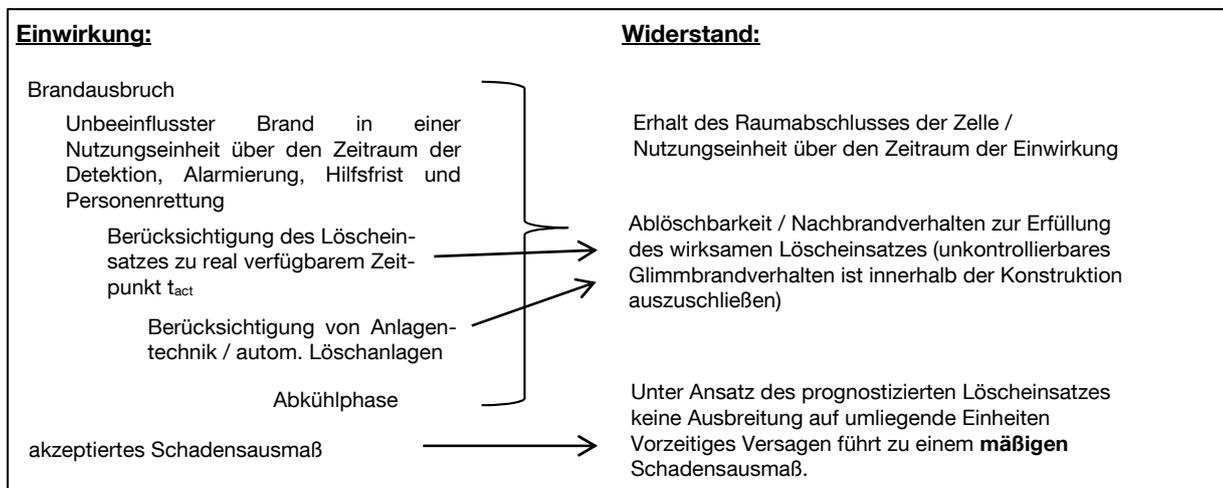


Abbildung 3-5: Gegenüberstellung der Einwirkungen zu notwendigen Widerständen für Bauteile der Klasse SK<sub>HB1</sub>

Die niedrigste Kategorie  $SK_{HB0}$  enthält Bauteile oder Teile (z.B. Schutzbekleidungen oder Fassadenbekleidungen) von solchen, deren Versagen keinerlei Auswirkung auf die darüber liegenden Kategorien bedeutet. Zum Beispiel hat das Versagen einer Kapselbekleidung zwar eine direkte Brandeinwirkung auf die dahinter liegenden Bestandteile der Konstruktion zur Folge, der durch die Klasse  $SK_{HB1}$  geforderte Raumabschluss muss dabei trotzdem weiterhin erhalten bleiben. Hierfür hat das Bauteil einen unabhängigen Nachweis entsprechend der Beanspruchung nach Klasse  $SK_{HB1}$  zu erbringen. Ebenso hat ein Teileinsturz des Tragwerks, wie z.B. einzelne Sparren einer Dachkonstruktion, innerhalb einer Nutzungseinheit keinerlei Auswirkungen auf die vorgenannten Kategorien  $SK_{HB}$  1 bis 3. Um die darüber liegenden Kategorien nicht negativ zu beeinflussen, ist das Nachbrandverhalten der Bauteile jeweils zu berücksichtigen.

Wegen des geringen Schadensausmaßes und der nur indirekt bestehenden Gefahr für Personen und Tiere bei Versagen von Bauteilen der Kategorie  $SK_{HB0}$  kann eine auf ein Jahr bezogene Versagenswahrscheinlichkeit  $p_f$  von  $1,0 \cdot 10^{-4}$ , entsprechend den Festlegungen für außergewöhnliche Einwirkungen nach (DIN EN 1991-1-7/NA:2010-12) akzeptiert werden.

Anmerkung: Der Wert für diese bezogene Versagenswahrscheinlichkeit von  $1,0 \cdot 10^{-4}$  stellt einen Vorschlag des Verfassers dieser Arbeit für die weiteren Betrachtungen dar, da hierzu keine baurechtlichen Festlegungen recherchierbar sind.

Abbildung 3-6 zeigt zusammenfassend die anzusetzenden Einwirkungen und die notwendigen Widerstände von Kapselbauteilen in der Klasse  $SK_{HB0}$  und in Abbildung 3-7 für Fassadenbekleidungen.

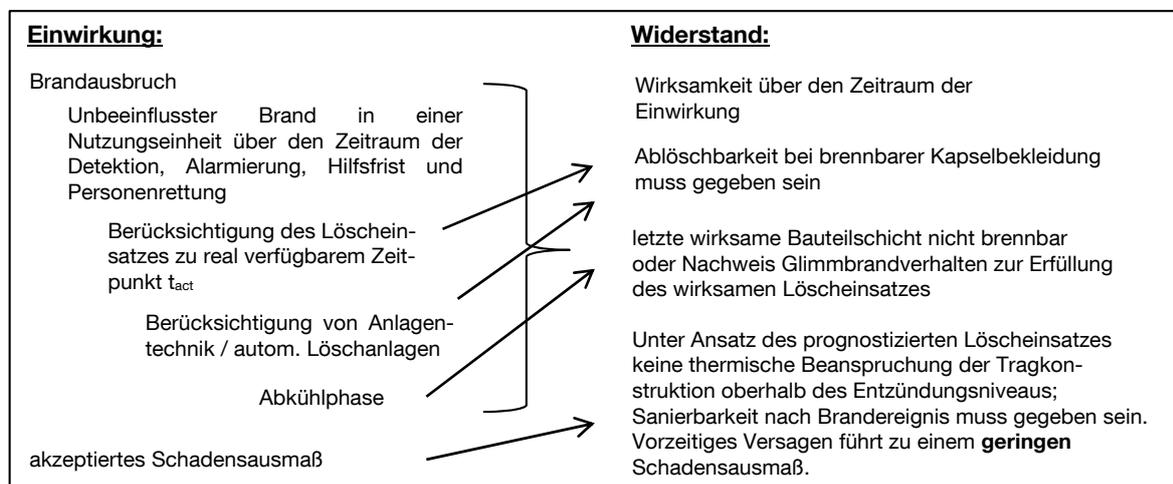


Abbildung 3-6: Gegenüberstellung der Einwirkungen und Widerstände für Bauteile der Klasse  $SK_{HB0}$  (Kapselung)

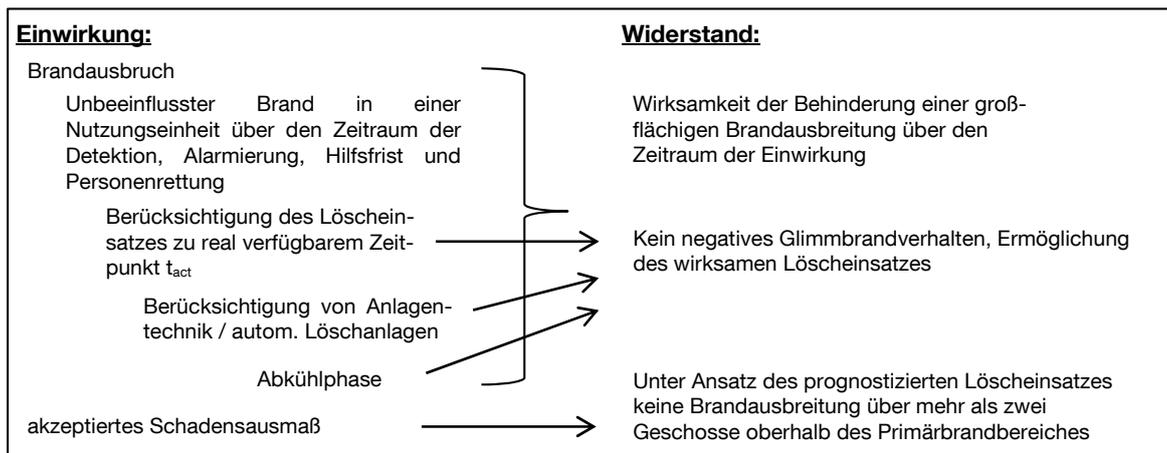


Abbildung 3-7: Gegenüberstellung der Einwirkungen und Widerstände für Bauteile der Klasse SK<sub>HB0</sub> (Fassade)

Tabelle 3-3 zeigt die Zusammenstellung der vorgeschlagenen Versagenshäufigkeiten für die Bemessung von Bauteilen in den jeweiligen Sicherheitskategorien.

Tabelle 3-3: Zusammenstellung akzeptierbaren Versagenshäufigkeiten nach den Brandsicherheitsklassen SK<sub>HB</sub> 0 bis 3

Klasse	Schadensausmaß bei Versagen nach Tabelle 3-2	Vorschlag für zulässige Versagenswahrscheinlichkeit (Bezugszeitraum 1 Jahr)	Quelle / Ansatz	Schadensausmaß nach Norm
SK <sub>HB3</sub>	katastrophal	$1,0 \cdot 10^{-6}$	(DIN EN 1991-1-2/NA:2010-12)	hoch
SK <sub>HB2</sub>	groß	$1,3 \cdot 10^{-5}$	(DIN EN 1991-1-2/NA:2010-12)	mittel
SK <sub>HB1</sub>	mäßig	$5,5 \cdot 10^{-5}$	Mittelwertbildung	- *)
SK <sub>HB0</sub>	gering	$1,0 \cdot 10^{-4}$	(DIN EN 1991-1-7/NA:2010-12)	gering

\*) Schadensausmaß nach Norm nicht vorhanden. Ansatz für die weitere Verwendung in dieser Arbeit als Mittelwert von „mittel“ und „gering“ gebildet.

Zur besseren Veranschaulichung der zeitlichen Abläufe im Brandfall sowie der Zuteilung der vorbeschriebenen Brandsicherheitsklassen enthält Abbildung 3-8 eine zusammenfassende Darstellung. Hierin ersichtlich sind über Zeitstahle aufgetragen die angesetzte Einwirkungsdauer sowie der jeweils akzeptierte Zeitpunkt des Versagens einer Bauteilfunktion erkennbar.

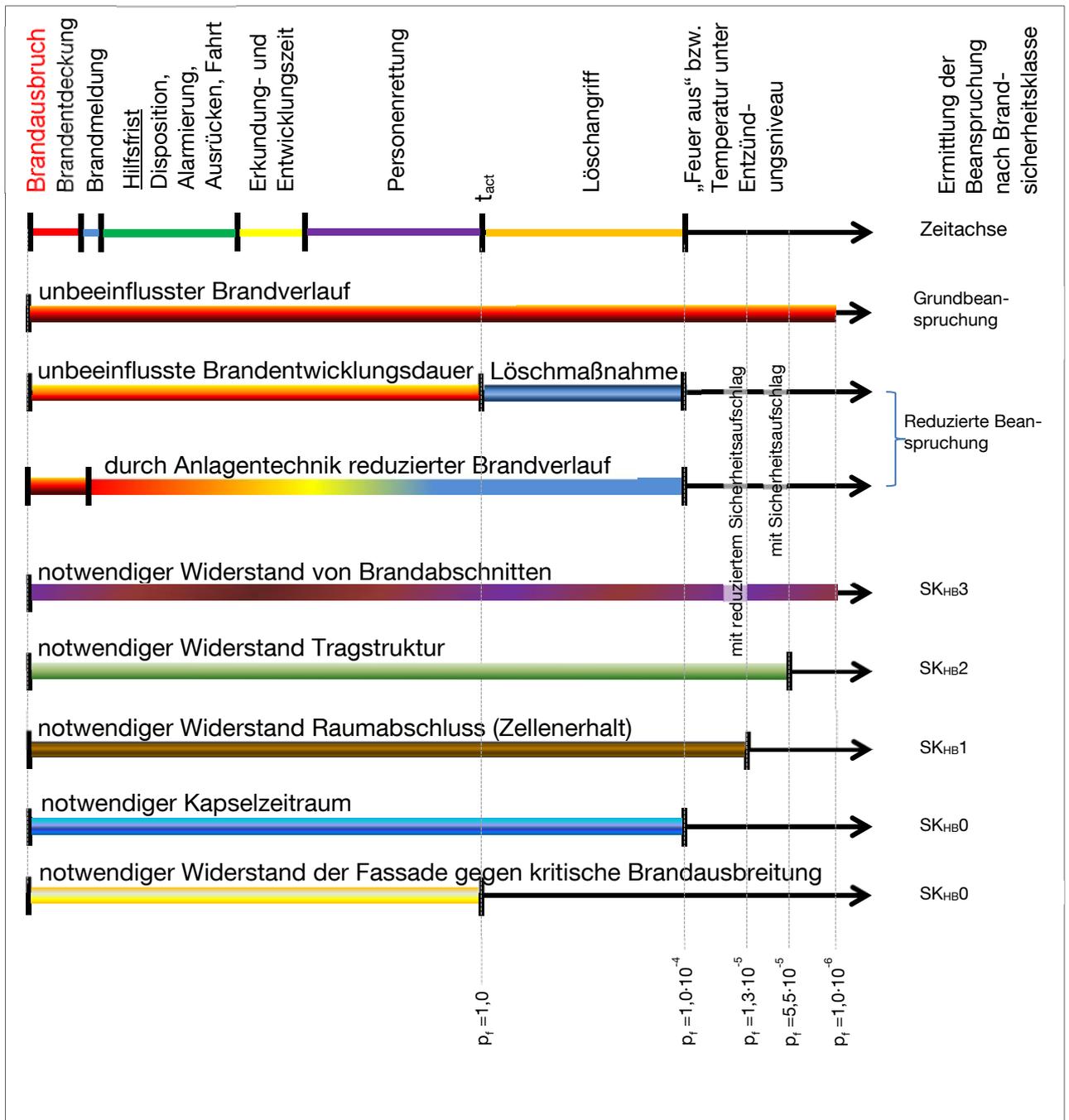


Abbildung 3-8: Zeitliche Übersicht des Zusammenhangs zwischen Brandsicherheitsklasse, Beanspruchung und Widerstand

## 4 Ingenieurmäßige Ermittlung von Brandverläufen (Bemessungsbrände)

### 4.1 Grundlagen

Brände können sich in undefinierbar viele Richtungen entwickeln. Je nach den zum Zeitpunkt des Brandausbruches vorherrschenden Bedingungen in der nahen Umgebung entsteht eine mögliche Bandbreite der Brandentwicklung von einem unter niedriger Temperatur verlaufenden Schwelbrand bis zum voll ausgebildeten Brandverlauf mit hohem Beanspruchungs- und Brandausbreitungspotential.

Ein geeigneter Ansatz zur rechnerischen Erfassung des Brandverlaufes muss dementsprechend die wahrscheinlich auftretenden Branderscheinungen hinreichend abdecken können. Dabei muss der Abdeckungsgrad nicht den „worst case“ Fall, welcher auf äußerst unwahrscheinlichen Randbedingungen basiert, einschließen, sondern vielmehr auf „worst credible“ Szenarien und Annahmen basieren, einer Betrachtung der möglichen Eintrittswahrscheinlichkeit und der Schadensauswirkung im Sinne des damit verbundenen Schadensausmaßes. Die Randbedingungen sind so zu wählen, dass sie Brandfälle im Gebäude auch mit hinreichender Wahrscheinlichkeit abbilden können.

Für die Festlegung von Brandszenarien in Form von Quelltermen existieren bislang keine allgemeingültigen Vorgehensweisen. Berechnungsansätze existieren lediglich für Holzkrippen, Flüssigkeits- (pool-fire) und Gasbrände. Für diverse Einrichtungsgegenstände, wie z.B. gepolsterte Sitzgarnituren oder Bettmatratzen existieren zum Teil exakte Verläufe der Energiefreisetzung aus Brandversuchen (vgl. zahlreiche Veröffentlichungen des NIST - National Institut of Standard and Technology, Bereich Building and Fire Research, [http://www.nist.gov/el/fire\\_research/firesafety/fireontheweb.cfm](http://www.nist.gov/el/fire_research/firesafety/fireontheweb.cfm)). Vergleicht man jedoch die Ergebnisse aus ähnlichen Versuchsreihen, also z.B. nur Matratzen, sind bereits sehr hohe Streuungen in den Werten und Verläufen festzustellen. Zudem lassen sich die einzelnen Freisetzungsraten wegen ihrer gegenseitigen Beeinflussung nicht zu einem globalen Verlauf für einen eingerichteten Raum aufsummieren. Zur exakten Ermittlung der Energiefreisetzungsraten sind also nur Brandversuche für die jeweilige Brandlastkonfiguration möglich. Da diese in der Regel sehr aufwendig und kostenintensiv sind, scheiden diese aus wirtschaftlichen Gründen fast immer aus. Außerdem ist jeder Brandversuch nur für genau die untersuchte Konfiguration (Brandlastverteilung, Ort der Zündung, Ventilationsbedingungen, ...) gültig.

Einfachere, ingenieurmäßige Ansätze für die Festlegung zeitlicher Verläufe von Energiefreisetzungsraten in Abhängigkeit der wesentlichen brandbeeinflussenden Größen werden in zahlreicher Literatur, wie z.B. in (Karlsson, et al., 2000), (SFPE, 2002) oder (Schneider, et al., 2014) ausführlich wissenschaftlich mit allen Grundlagen behandelt und beschrieben. Obwohl diese das Brandszenario nicht exakt nachstellen und auch nur konservative Ergebnisse liefern können, bilden sie die heute ausschließliche Methode zur Bestimmung parametrischer Brandbeanspruchungen. Im nachfolgenden Kapitel werden die möglichen Verfahren zur ingenieurmäßigen Bestimmung zeitlicher Verläufe überblicksweise zum Verständnis zusammengefasst, da hierzu zahlreiche Abhandlungen in verschiedenen Literaturquellen aus Forschungsberichten, Dissertationen und Lehrbüchern vorhanden sind. Der Überblick soll als Grundlage für die weiteren Überlegungen dienen. Die Aufzählung ist wegen der großen Vielfalt nicht abschließend.

## 4.2 Allgemeine Methoden der Brandsimulation

### 4.2.1 Einleitung

Die Simulationen möglicher Brandverläufe stellt im Ingenieurwesen eine noch sehr junge Disziplin dar. Grundsätzlich kann zwischen physikalischen und mathematischen Modellen zur Beschreibung von Bränden unterschieden werden.

*„Das physikalische Modell kopiert eine reale Situation (Nachbau in verkleinertem Maßstab) unter Berücksichtigung von Skalierungen und Ähnlichkeitsgesetzen. Ein bekanntes Beispiel aus dem Forschungsbereich der Strömungsmechanik sind Windkanalversuche, bei denen die Reynoldszahl als Skalengesetz benutzt wird. In der Brandforschung sind jedoch eine ganze Reihe von Ähnlichkeitsgesetzen zu beachten. Dies hat in der Regel zur Folge, dass eine Modellierung nur für einen bestimmten Teilaspekt widerspruchsfrei erfolgt und andere Aspekte nur näherungsweise erfüllt sind.“*

*„Mathematische Modelle bestehen aus einem System von Gleichungen, welche die auftretenden Phänomene anhand der maßgebenden Parameter beschreiben. Die Gleichungssysteme sind die mathematische Form der Naturgesetze. Meistens ist die Struktur dieser Gleichungen schon derart komplex, dass sie nur numerisch gelöst werden können. Daher wird unter Modell oft auch der zugehörige Computercode in einer bestimmten Programmiersprache verstanden.“*

*Mathematische Brandmodelle können noch weiter unterteilt werden in deterministische und probabilistische Modelle. Deterministische Modelle beschreiben die Brandentwicklung und den Brandverlauf für eine spezielle, vom Benutzer in Form von Rand- und Anfangsbedingungen zu präzisierende Ausgangssituation, welche die zeitliche Entwicklung des betrachteten Systems festlegen. Sie bestehen aus einer Zusammenstellung mathematischer Algorithmen, welche die als relevant eingeschätzten physikalischen Gesetzmäßigkeiten und Abhängigkeiten beschreiben. Die deterministischen Modelle können sich erheblich in ihrer Komplexität unterscheiden.*

*Die probabilistischen Modelle beschreiben Brände als eine Folge von Ereignissen und simulieren die Brandentwicklung auf der Basis von Wahrscheinlichkeiten für das Auftreten bestimmter Ereignisse sowie Übergangswahrscheinlichkeiten zwischen bestimmten Zuständen.*

*Die Schwierigkeit bei dieser Art von Modellen besteht allerdings darin, die entsprechenden Wahrscheinlichkeiten aus statistischen Auswertungen von Beobachtungen oder Versuchsergebnissen bzw. aus Zuverlässigkeitsanalysen zu ermitteln. Sie sind im Sinne der oben formulierten Zielsetzungen nicht relevant und werden im Folgenden deshalb nicht behandelt.*

*„Grundsätzlich lassen sich drei Gruppen von mathematischen deterministischen Brandsimulationsmodellen unterscheiden:*

- *Empirisch belegte Ansätze,*
- *Zonenmodelle,*
- *Feldmodelle (CFD)“*

Beschreibung entnommen aus (Hosser, 2009).

Abbildung 4-1 gibt grafisch einen Überblick über die vorhandenen Möglichkeiten zur Modellierung von Bränden.

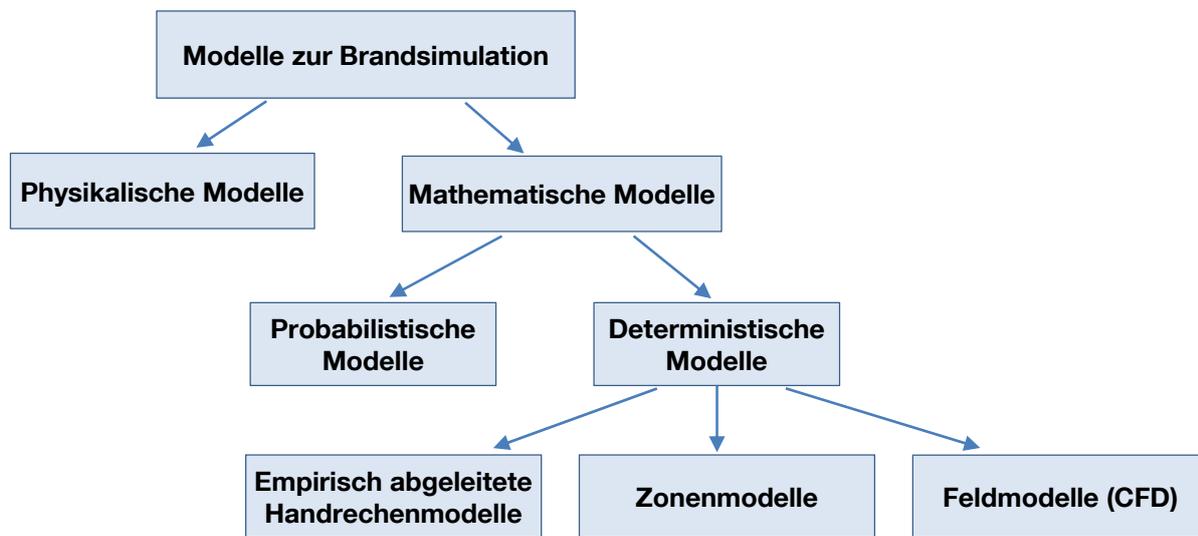


Abbildung 4-1: Übersicht zu Modellen der Brandsimulation (Mayer, 2012)

Da die einzelnen Verfahren in existierender Fachliteratur, Masterarbeiten und Dissertationen bereits mehrfach und ausgiebig behandelt wurden, enthalten die folgenden drei Abschnitte lediglich eine Kurzbeschreibung einiger ausgewählter, heute verwendeter deterministischer Methoden der Brandsimulation, erheben jedoch keinen Anspruch auf die Nennung aller bekannten Methoden. Die Modelle wurden untersucht, um die Verwendbarkeit für nachfolgende probabilistische Untersuchungen zu prüfen und das am besten geeignete Modell zu bestimmen.

#### 4.2.2 Empirisch abgeleitete Handrechenmethoden

Empirisch abgeleitete Handrechenmethoden wurden als vereinfachte mathematische Beziehungen aufgrund von Experimenten und Messreihen entwickelt. Diese Verfahren haben in ihrer Aussage eine Bandbreite von der einfachen Bestimmung der Maximaltemperatur im Brandraum und dem Auftrittszeitpunkt über die Beschreibung von Flammenhöhen bis hin zur umfassenden zeitlichen Beschreibung von Temperaturverläufen in der Heißgasschicht als Ein-Zonen-Modell. Andere Kenngrößen, wie z. B. die Strahlungseinwirkung, können darauf basierend dann durch physikalische Gesetzmäßigkeiten beschrieben werden.

Im Jahr 1970 veröffentlichten Magnusson und Thelandersson (Magnusson, et al., 1970) auf vereinfachten Masse- und Energiebilanzen basierende Kurven, mit denen in Abhängigkeit von der Brandlastdichte und dem Öffnungsfaktor der Temperaturzeitverlauf im Brandraum aus Tabellen bzw. Diagrammen abgelesen werden kann. Die Methode basiert auf diversen Annahmen und Vereinfachungen, stellt jedoch wegen der grafischen Aufbereitung in Diagrammform und der begrenzten Anzahl an Eingangsparametern ein äußerst

einfach anzuwendendes Verfahren dar. Mittels bekanntem Öffnungsfaktor und Brandlastdichte lassen sich bereits Temperatur-Zeit-Verläufe direkt aus den Diagrammen ermitteln (vgl. Abbildung 4-2).

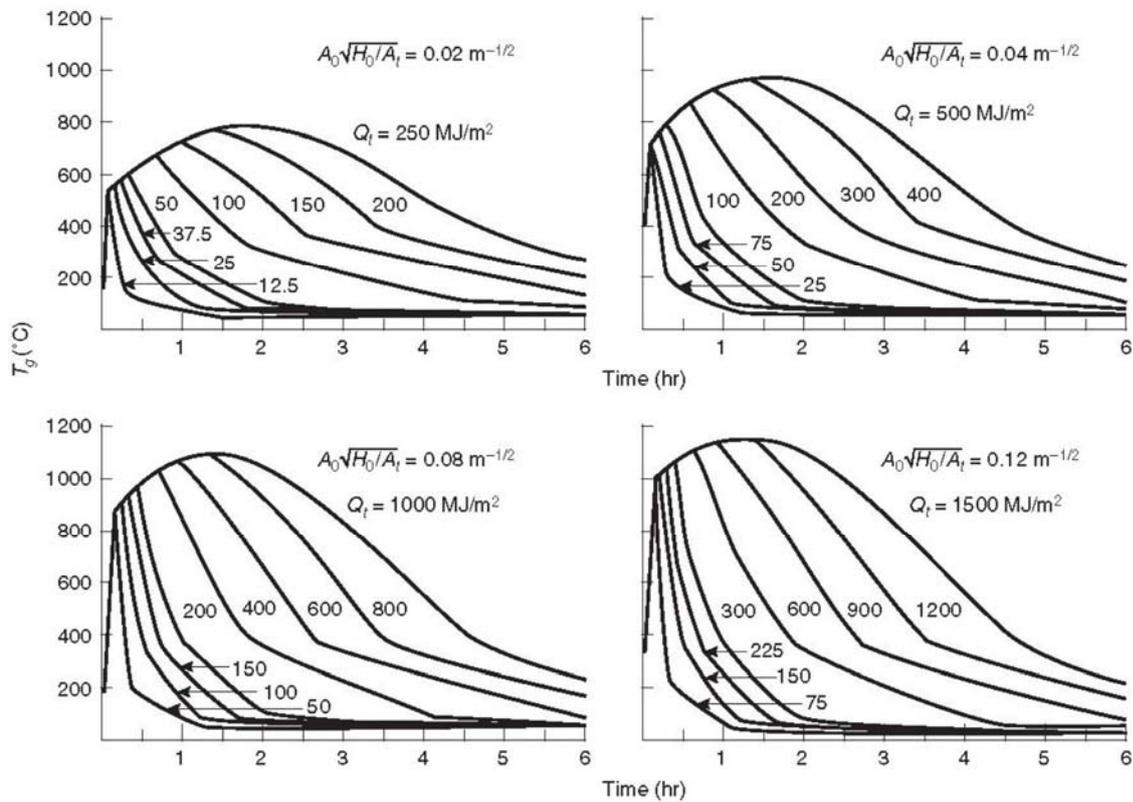


Abbildung 4-2: Diagramme zur grafischen Methode nach Magnusson & Thelandersson (SFPE, 2002)

Dr. Vytenis Babrauskas stellte im Jahre 1981 im Fire Safety Journal eine Methode zur Berechnung der Temperatur der oberen Gasschicht bei einem Raumbrand der Öffentlichkeit vor. Dieser Wert wird durch insgesamt fünf Faktoren, die Energiefreisetzungsrate, die Raumgeometrie, die Wärmeleitung der umfassenden Bauteile, die Höhe der Ventilationsöffnung sowie die Verbrennungseffektivität beeinflusst. Das Modell ist in (SFPE, 2002) ausführlich beschrieben, genaue Anwendungsgrenzen der Eingangsparameter sind bei dieser Methode jedoch nicht definiert.

Im Jahr 1983 wurde von Margaret Law ein weiterer empirischer Ansatz zur Ermittlung der Höchsttemperatur bei Raumbränden, nun jedoch inklusive des Zeitpunktes des Auftretens, veröffentlicht. Da dieser Ansatz nur auf Basis einer kleinen Anzahl von Realbrandversuchen abgeleitet wurde, sind auch diese Ergebnisse nur bei hinreichender Übereinstimmung mit den damals untersuchten Raumgrößen, Ventilationsbedingungen, Brandlastdichten im ventilationsgesteuerten Brandfall als genau zu werten. Auch diese Methode ist in (SFPE, 2002) ausführlich beschrieben.

Bezüglich der Berechnung von Temperaturverläufen ist zunächst die Methode nach McCaffrey, Quintierre und Harkleroad (McCaffrey, et al., 1981) zu nennen. Der Ansatz beinhaltet die Ermittlung von Heißgastemperaturen in der Brandentwicklungsphase bis zum Eintritt des Flash-Overs ( $\sim 600^\circ\text{C}$ ), liefert

jedoch nur für brandlastgesteuerte Brände in kleinen Räumen hinreichend genaue Ergebnisse. Als Eingangsgrößen werden bei dem Verfahren die Energiefreisetzungsrate, die Raumgröße, die Größe der Öffnungsflächen sowie die gemittelten thermischen Eigenschaften der Umfassungsbauteile verwendet.

Im Brandschutzteil des EUROCODE 1 (DIN EN 1991-1-2:2010-12) ist im Anhang A (informativer Anhang) ein Verfahren zur Bestimmung parametrischer Temperaturzeitkurven enthalten, dessen Anwendung auf Brandabschnitte / Räume mit einer Grundfläche von bis zu 500 m<sup>2</sup> und einer maximalen Höhe von 4,0 m abgegrenzt wird. Zusätzlich darf der betrachtete Raum über keine Öffnungen im Dach bzw. der Decke verfügen. Im Verfahren wird der Verlauf prinzipiell durch die Bestimmung zweier Bereiche, der Erwärmungsphase und der Abkühlphase, beschrieben. Die Erwärmungsphase wird beschrieben mit

$$\theta_g = 20 + 1325 \cdot (1 - 0,324 \cdot e^{-0,2 \cdot t^*} - 0,204 \cdot e^{-1,7 \cdot t^*} - 0,472 \cdot e^{-19 \cdot t^*}) \quad [6]$$

wobei  $\theta_g$  die Temperatur im Brandraum darstellt. Der Faktor  $t^*$  stellt die mittels Öffnungsfaktor O und thermischer Eigenschaften b der Umfassungsbauteile modifizierte Zeit t dar. Nach Erreichen der Maximaltemperatur  $\theta_{max}$  beginnt die linear abfallende Abkühlkurve bis die Ausgangstemperatur wieder erreicht ist. Je nach Zeitdauer der Erwärmungsphase kommt eine von drei verschiedenen linearen Funktionen zur Beschreibung der Abkühlphase zur Anwendung.

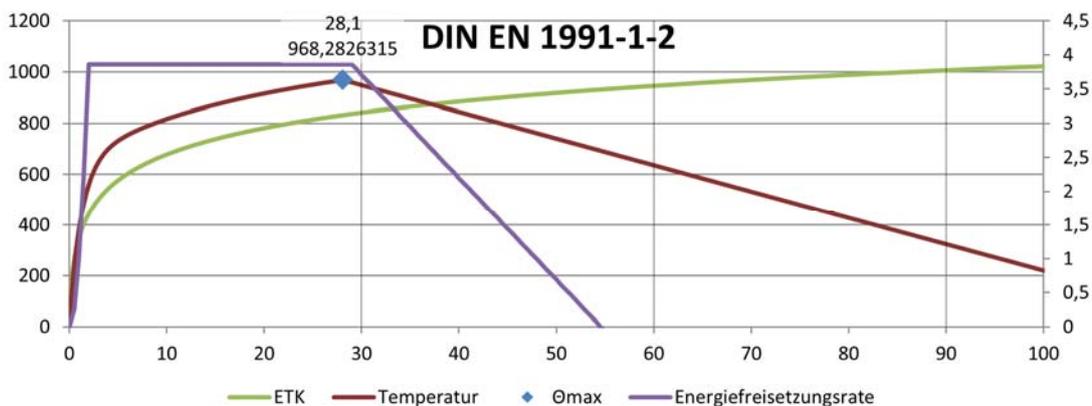


Abbildung 4-3: Beispielhafter Verlauf einer Temperaturzeitkurve nach EC1-1-2 (rot), erstellt mit Tool aus (Mayer, 2012)

Unter dem Titel „Bemessung von Tragsystemen mehrgeschossiger Gebäude in Stahlbauweise für realistische Brandbeanspruchung“ wurde in der Dissertation (Zehfuß, 2004) ein weiteres Verfahren zur Bestimmung von Temperaturzeitkurven für kleine Räume mittels einfacher Handrechenmethoden vorgestellt. Das hier entwickelte Modell wurde 2009 in den Anhang AA des Entwurfs zum Nationalen Anhang des EC1-1-2 aufgenommen. Es ist in unveränderter Form Bestandteil des derzeit aktuellen Standes (DIN EN 1991-1-2/NA:2010-12) und darf als normatives Verfahren angewendet werden. Der Anwendungsbereich erstreckt sich gemäß Norm auf unbeeinflusste Brände in Räumen mit einer maximalen Ausdehnung von 400 m<sup>2</sup> und einer Höhe  $\leq 5,0$  m. Im Verfahren wird der Brandverlauf in drei Abschnitte, in die Brandentwicklungs-, in die Vollbrand- und in die Abklingphase aufgeteilt. Alle drei Phasen sind mit dem Verlauf der Energiefreisetzungsrate verknüpft. Die Abbildung der Temperaturzeitkurve erfolgt durch Bestimmung der jeweiligen Zeitpunkte und Temperaturen an den

Übergängen der einzelnen Phasen. Die Bereiche zwischen den Phasenübergängen werden jeweils durch quadratische Funktionen beschrieben. In Kapitel 7.2 wird dieses Verfahren nochmals aufgegriffen und weiterbehandelt.

Im Paper „A new curve for temperatur-time-relationship in compartment fire“ (Blagojevic, et al., 2011) wird eine Funktion [7] zur Bestimmung von Temperaturzeitkurven vorgestellt, mit der sowohl die Erwärmungs- als auch die Abklingphase abgebildet wurde.

$$y = a \left( \frac{x}{b} \cdot e^{1-\frac{x}{b}} \right)^c \quad [7]$$

Dabei ist  $y$  die Temperatur im Brandraum,  $x$  die Zeit,  $a$  die Maximaltemperatur, abhängig von der Brandlast und den Ventilationsbedingungen,  $b$  der Zeitpunkt des Auftretens der Maximaltemperatur und  $c$  ein Korrekturfaktor, abhängig von der Raumgeometrie, Brandentwicklungs- und Ausbreitungsgeschwindigkeit, etc. Im Artikel wird auf noch notwendige Untersuchungen zur Verifizierung des Modells mittels Raumbrandversuchen mit verschiedenen Brandlastkonfigurationen und Variation der Ventilationsbedingungen hingewiesen.

#### 4.2.3 Zonen-Modelle

*„Bei Zonenmodellen wird grundsätzlich der Ansatz verfolgt, dass im Brandraum eine heiße Rauchgaszone (Überdruckzone) und eine kalte raucharme Schicht (Unterdruckzone) gebildet werden. Zwischen diesen beiden Schichten befindet sich eine neutrale Ebene, in der ein Druckgleichgewicht herrscht. Durch Aufstellung der jeweiligen Massen- und Energiebilanzgleichungen kann z. B. berechnet werden, wie viel Energie durch den Gaswechsel und die Strahlung bei Raumöffnungen entweicht.“*

*Je nach verwendetem Produkt werden in den Programmen zu Zonenmodellen auch folgende Parameter durch die entsprechenden Formelwerke berechnet:*

- *Wärmeströme ins Freie*
- *Strahlung durch Öffnungen*
- *Energieabsorption der Umfassungsbauteile*
- *Wärmespeicherenergie in den Gasen des Brandraumes*
- *Sonstige Wärmesenken z. B. durch Löschanlagen, Einbauten usw.*
- *Berechnung der Flammen und Feuerplume*
- *Heiße Rauchgasströme im Deckenbereich (Ceiling Jet)*
- *Raum-Vollbrandmodell*

*Entsprechende ausgereifte Modelle wie z. B. MRFC (Multi Room Fire Code) sind in der Lage, eine Vielzahl von einzelnen Räumen aneinanderzureihen bzw. miteinander zu kombinieren, sodass auch Brandsimulationen in relativ komplexen Geometrien möglich sind.“ (Schneider, et al., 2014)*

Da die Modelle in der Regel sehr komplex aufgebaut sind und jeweils nur in Form abgeschlossener Softwareprogramme den Nutzern zur Verfügung stehen, ist eine Verwendung für probabilistische Auswertungen nicht möglich. Die Programme lassen überwiegend nur die Eingabe von statischen Eingangswerten zur Simulation einer bestimmten Situation mit definierten Randparametern zu. Eine flexible Eingabe wurde bei keinem der recherchierten Modelle vorgefunden. Einzelne Modelle, wie das von der Firma BRANZ und der University of Canterbury entwickelte Berechnungstool B-RISK – Design Fire Tool (Wade, et al., 2013) bieten die Eingabe von Verteilungen an, waren nach eigener Recherche jedoch ebenfalls für die gestellte Aufgabe nicht ausreichend geeignet.

#### 4.2.4 Feldmodelle

Eine im Vergleich zu den Zonenmodellen in Bezug auf Modellbildung und Rechenaufwand nochmals komplexere und aufwendigere Methode sind die Feldmodelle. Der Berechnungsansatz der Feldmodelle besteht darin, dass das zu betrachtende Volumen (Raum) in einzelne Kontrollvolumina (Gitternetzzenen) unterteilt wird. Die Simulationen werden als Interaktionen zwischen den einzelnen Kontrollvolumina über die Erhaltungsgleichungen für Masse, Energie und Impuls mit Hilfe von Differentialgleichungssystemen berechnet. Da diese Modelle eine sehr hohe Rechenleistung erfordern, die nur über EDV-Lösungen lösbar sind, werden diese Feldmodelle auch "Computational Fluid Dynamics" (CFD) genannt.

Es werden drei Lösungsansätze unterschieden:

- Direct Numerical Simulation (DNS)
- Large Eddy Simulation (LES)
- Reynolds Averaged by Navier-Stokes (RANS)

Da der Rechenaufwand auf Grund der extrem feinen Gitter-Diskretisierung enorm hoch ist, kommt das Direct Numerical Verfahren vornehmlich für die Untersuchung kleiner Volumina in Frage. Großvolumige Brandsimulationen können mit der heute zur Verfügung stehenden Rechnerleistungen noch nicht gelöst werden. Die Large Eddy Simulation verwendet zur Modellierung deutlich weniger Gitterpunkte, jedoch müssen dadurch örtliche Auflösungseinschränkungen in Kauf genommen werden. RANS basiert auf der Reynolds-Mittelung der Navier-Stokes-Gleichungen. Die Variablen werden in ihren Mittelwert und ihre Fluktuation zerlegt und anschließend zeitlich und/oder räumlich gemittelt. Vorteil dieses Verfahrens ist die größere Gitterweite mit dem einhergehenden geringeren Rechenaufwand, der Nachteil besteht dementsprechend in der geringen Auflösung der Strömungsstrukturen.

Bei den gängigen CFD-Brandmodellen werden die Navier-Stokes-Gleichungen überwiegend mit der LES-Methode gelöst. Manche Modelle, wie z. B. der „Fire Dynamics Simulator“ (FDS, [www.nist.gov](http://www.nist.gov)), bieten zusätzlich die Möglichkeit, per vorheriger Einstellungen diese auch mittels der DNS-Methode zu lösen.

in dafür vorhandenen Untermodellen werden vom CFD-Modell weitere physikalische und chemische Effekte modelliert. Diese sind z.B. das Verbrennungsmodell, die Wärmestrahlung und Wärmeleitung oder auch die Wirkung von Löschanlagen.

*„In Verbindung mit den Untermodellen sind einige der aktuellen CFD-Codes bereits in der Lage, in einer vertretbaren Zeit sehr komplexe Brandszenarien zu simulieren, wobei sogar unterschiedliche Brandfallsteuerungen und Löscheinrichtungen berücksichtigt werden können. Manche CFD-Codes wie z.*

*B. FDS verfügen über eigene Verifizierungs- und Validierungshandbücher, in denen das Gesamtmodell und die einzelnen Untermodelle hinsichtlich deren Rechenverfahren bzw. deren Übereinstimmung zu realen Brandversuchen entsprechend analysiert werden. Trotzdem muss berücksichtigt werden, dass ein Brandsimulationsmodell die Realität nie zu 100% korrekt abbilden kann und vor allem bei der Simulation der Verbrennungsvorgänge der Unschärfefaktor relativ groß ist. Demgegenüber ist es Tatsache, dass auch natürliche Brandverläufe unter realen Bedingungen nie zu 100% gleich verlaufen und bei geringsten Abweichungen der Eingangsparameter oder Randbedingungen der Brandverlauf komplett unterschiedlich sein kann.“ (Schneider, et al., 2014)*

Ausführliche Beschreibungen der CFD-Modelle enthält die einschlägige Fachliteratur zu Ingenieurmethoden im Brandschutz bzw. speziell zur Brandsimulation. Als allgemeine Grundlagenwerke sind hier (SFPE, 2002), (Karlsson, et al., 2000) oder (Drysdale, 1999) und in deutscher Sprache (Hosser, 2013) bzw. (Schneider, et al., 2014) zu nennen. Für die spezielle Anwendung einzelner Modelle stehen die jeweiligen Produktdokumentationen und –handbücher der Hersteller, wie z.B. der weit verbreitete FDS-Simulator zur Verfügung.

Wie schon bei den Zonen-Modellen scheiden auch die CFD-Modelle für die Einbindung in probabilistische Rechenmodelle auf Grund ihrer komplexen Rechenvorgänge aus.

### **4.3 Auswahl und Diskussion des geeigneten Ansatzes**

Die vorangegangene Zusammenstellung der verschiedenen Modelle zur Brandsimulation ist selbstverständlich nicht abschließend. Zahlreiche weitere ingenieurmäßige Ansätze stehen zur Verfügung. Die durchgeführte Recherche hat jedoch klar heraus gestellt, dass nur die einfachen, mittels Handrechnung zu lösenden Modelle geeignet sind, probabilistische Betrachtungen auf Basis von Risikotools durchzuführen. Eine Einbindung komplexer Zonen- oder Feldmodelle ist auf Grund der dahinterliegenden aufwendigen Rechenprozesse sowie des Umfangs der Gleichungsapparate und der wenigen Einflussmöglichkeiten in die Prozesse nicht oder nur unter unverhältnismäßig hohem Aufwand möglich.

Als die optimale Kombination für das in dieser Arbeit angestrebte Ziel stellt sich die Verbindung aus der in Kapitel 2.2 diskutierten Methode der quantitativen Brandrisikobewertung mit der Monte-Carlo-Analyse und das im vorhergehenden Kapitel beschriebene deterministische Modell nach (Zehfuß, 2004) bzw. (DIN EN 1991-1-2/NA:2010-12) dar. Untersuchungen im Zuge der vom Verfasser dieser Arbeit betreuten Masterarbeit zu den Möglichkeiten der Beschreibung von Raumbränden (Mayer, 2012) haben ergeben, dass von den dort behandelten Handrechenverfahren im Vergleich mit Daten aus Raumbränden keines eine klare Übereinstimmung zeigt. Das ausgewählte Modell aus Anhang AA zu EC1-1-2/NA lieferte jedoch jeweils auf der sicheren Seite liegende, gute Näherungen. Ein weiterer Vorteil liegt in der Anerkennung dieses Verfahrens in Deutschland, welches als eine notwendige Grundlage für die spätere Verwendung der Ergebnisse dieser Arbeit angesehen wird.

Die Ausarbeitung des probabilistischen Modells und die Durchführung der Simulationsberechnungen für diese Arbeit werden in Kapitel 7 ff. beschrieben.

## 5 Einflussparameter auf ein Brandereignis

### 5.1 Einleitung und Überblick

Parameter, die den Verlauf, das resultierende Ausmaß sowie den entstehenden Schaden eines Brandereignisses bestimmen, sind sehr vielfältig. Eine erste Unterscheidung kann vorgenommen werden in Parameter, welche die Brandentstehung und den unbeeinflussten Verlauf eines Brandes bestimmen und jene Parametern, die durch Maßnahmen von außen den Verlauf eines Brandes verändern bzw. im besten Fall beenden.

Im Folgenden werden die Parameter anhand der Beschreibung eines Brandereignisses in ihrer auftretenden Reihenfolge genannt und deren Einfluss dargestellt. Die Parameter werden im Text jeweils **fett** gedruckt dargestellt.

Bereits vor der Entstehung eines Brandes kommen einzelne Parameter zum Tragen, die überwiegend der Brandverhütung dienen. Hierzu zählen die **Ausführung nach dem Stand der Technik** der baulichen und technischen Einrichtungen, wie z.B. die fachgerechte Installation elektrischer Anlagen oder Einrichtungen zur Wärmegewinnung. Des Weiteren zählt dazu das **Nutzerverhalten** der in Räumlichkeiten befindlichen Personen, vornehmlich der Umgang mit mobilen elektrischen Geräten oder mit offenen Licht und Feuer. Zuletzt tragen hierzu auch **Maßnahmen zur Behinderung von Fremdeinwirkungen**, wie z.B. Blitzschutzanlagen oder Maßnahmen zum Schutz gegen Brandstiftung (Einzäunung bzw. Einfriedung) bei.

Sind die vorgenannten präventiven Maßnahmen nicht ausreichend wirksam gewesen oder fehlgeschlagen kommt es zur Brandentstehung. In der Brandentstehungsphase sind zunächst die **Art der Zündquelle** und die **Art der Materialität** am Ort der Brandentstehung auf den Verlauf beeinflussend. Darauf folgend beginnt die Brandentwicklungsphase mit einer großen Vielfalt an einflussgebenden Parametern. Wiederum abhängig von der Art und Umfang der Materialitäten, jetzt im unmittel- und mittelbaren Umfeld der Brandentstehung, wird die **Brandentwicklungsgeschwindigkeit** beeinflusst. Liegen im Nahbereich leicht entzündbare Materialien in Form **mobiler Brandlasten** (Ausstattung und Verteilung) oder normal entflammbarer **immobiler Brandlasten** (Fläche und Entzündungsverhalten) vor, kommt es innerhalb eines kurzen Zeitraumes zu einer schnelleren und weiträumigeren Brandausbreitung. Gleichzeitig mit den direkt die Brandentwicklung beeinflussenden Parametern sind in dieser frühen Phase aber auch die Maßnahmen zur **Brandentdeckung** (anlagentechnische und ggf. personelle Ausstattung eines Gebäudes) sowie der **Möglichkeiten zur Primärbrandbekämpfung** (Kleinlöschgeräte, wie Feuerlöscher, Löschdecke, etc.) von großer Bedeutung. In besonders genutzten Gebäuden (Sonderbau) werden je nach Art und Nutzung auch automatische Brandbekämpfungsanlagen zur Primärbrandbekämpfung eingesetzt. Ist die vorgenannte manuelle Primärbrandbekämpfungsmaßnahme nicht ausreichend wirksam um die Brandentwicklung zu stoppen, wird eine schnelle Alarmweitergabe, beeinflusst durch die **Art und Weitergabegeschwindigkeit der Meldung** notwendig. Nach Eingang der Alarmmeldung bei der öffentlichen Feuerwehr (zentral bei so genannten „integrierten Leitstellen“) kommt es auf die Vornahmezeit der öffentlichen Feuerwehr (**Hilfsfrist**), vornehmlich beeinflusst durch die personelle und gerätetechnische Ausstattung derselben, Großräumigkeit des Einsatzgebietes und die zum Einsatzzeitpunkt herrschenden verkehrstechnischen Bedingungen (Witterung und Verkehr) an.

Mit dem Eintreffen der Feuerwehr am Einsatzort beginnen die eigentlichen abwehrenden Maßnahmen, zu welchen in erster Linie die Personen- und Tierrettung und in weiterer Folge die Brandbekämpfung gehören. Sind die zuletzt genannten Parameter Branddetektion, Alarmweitergabe und Hilfsfrist effektiv

bzw. liegen diese innerhalb eines kurzen Zeitraumes, gelingt es der Feuerwehr den Brand zu einem frühem Stadium mit geringer Ausbreitung und nur kleinräumigen Brandnebenerscheinungen (thermisch als auch durch Rauch beanspruchte Bereiche) anzutreffen und überwiegend mit geringem Einsatzaufwand zu bekämpfen. Den Umfang der Einsatzmaßnahme beeinflussen im Wesentlichen die Gebäudestruktur und -zugänglichkeit (**Erkundungszeit**) mit der Anordnung und Funktionalität der Rettungswege (Rauchfreiheit, Nutzbarkeit, Fremddrettung) und Angriffswege (Aufbau des Brandbekämpfungsangriffs). In Summe bestimmen die vorgenannten Punkte, abhängig von der Art, Kategorie und Leistungsfähigkeit der regionalen Einsatzkräfte die Länge der **Einsatzzeiten**.

Mit Übergang von der Brandentwicklungsphase zur Vollbrandphase werden vor allem bauliche Parameter maßgebend. Neben der **Größe der Nutzungseinheit** (Raumzelle), der **Qualität des Raumabschlusses** (Raumzelle, Feuerwiderstand) sowie der **Behinderung Brandausbreitung innerhalb Nutzungseinheit** („interner Raumabschluss“) haben die **Ventilationsflächen** sowie die umfassenden Bauteile für die Zuluft und den **Wärmeabfluss** einen erheblichen Einfluss auf den noch nicht durch Löschmaßnahmen begrenzten Brandverlauf. Dabei steuert die zur Verfügung stehende Ventilation die Art des Verbrennungsvorganges. Steht genügend Sauerstoff für die vollständige Brandlast zur Verfügung, verläuft der Brand **brandlastgesteuert**. Ist das Sauerstoffangebot begrenzt, verläuft der Brand **ventilationsgesteuert**, wodurch sich ein Überangebot an nicht verbrannten Pyrolysegasen im Brandraum sammelt und erst unter Zuführung von frischem Sauerstoff an der Fassade verbrennt.

Die **Anzahl der Geschosse** mit Aufenthaltsräumen und die **Anzahl und Größe der Nutzungseinheiten** je Geschoss und Treppenraum werden bei ausgedehnten Brandereignissen mit einer geräumigeren Beeinflussung von Gebäudebereichen für den Feuerwehreinsatz einflussgebend. Kommt es zur Verrauchung von Flucht- und Rettungswegen und können sich Personen nicht mehr aus ihren Bereichen selbst in Sicherheit bringen, werden aufwendige Maßnahmen unter Einsatz mobiler Rettungsmittel (Leiter, Drehleiter) oder sonstiger Hilfsmittel (Ventilator, Fluchthaube, ...) erforderlich. Dies führt zu erheblichen zeitlichen Bindungen von Einsatzkräften, die nicht unmittelbar der Brandbekämpfung zur Verfügung stehen. Um über diese längeren Einsatzzeiten hinweg ausreichende Sicherheit für die einsatzleistenden Kräfte zu haben, ist auf einen ausreichenden **Feuerwiderstand der tragenden Struktur** des Gebäudes zu achten.

Für die letzte Einsatzphase können noch die **Löschbarkeit der Raumzelle** (Bauteilverhalten) sowie das **Verhalten in der Abkühlphase** (Hohlraumbrände, Glimmen, Wärmeabzug) als bewertbare Parameter genannt werden.

Nachdem das Gebäude vollständig gelöscht und abgekühlt ist, erlangen Parameter wie die Schädigung der Bauwerksstruktur und die Sanierbarkeit in Bezug auf die Wiederherstellbarkeit der Nutzung (Kontaminierung der Bauteilschichten) vor allem für versicherungstechnische Aspekte große Bedeutung.

Im folgenden Absatz wird auf die Parameter näher eingegangen, welche für die weitere Arbeit und Simulation hauptsächlich maßgebend werden.

## 5.2 Diskussion der für die weitere Arbeit maßgeblichen Parameter

### 5.2.1 Wahrscheinlichkeit einer Brandentstehung

Die jährlichen Statistiken zu Brandfällen zeigen über die vergangenen Jahre keine signifikanten Steigerungen oder Abfälle. Die zuletzt veröffentlichte World Fire Statistik für das Jahr 2014 (Brushlinsky, et al., 2014) belegt diese Aussage für Deutschland aktuell.

Da im Zuge der Recherchen zu den Eingangsparametern keine anderen Ansätze zur Ermittlung der Wahrscheinlichkeit einer Brandentstehung ermittelt werden konnten, soll für die Simulation der in Kapitel 3.2 bereits beschriebene normative Ansatz aus dem nationalen Anhang zum Eurocode 1, Teil 1-2 (DIN EN 1991-1-2/NA:2010-12) verwendet werden. Die jährliche Brandentstehungswahrscheinlichkeit  $p_1$  (siehe Gleichung [5]) wird hier entweder als Funktion aus der Art der Nutzung und der Größe der Nutzungseinheit ermittelt oder vereinfacht als pauschaler Wert in Abhängigkeit von der Nutzung angenommen. Für die Simulation werden die Werte je nach Größe der betrachteten Nutzungseinheit separat ermittelt.

### 5.2.2 Brandentwicklungsgeschwindigkeit

Auf nationaler Basis existieren normative Vorgaben zur Berücksichtigung der Brandentwicklungsgeschwindigkeit in Räumen in (DIN EN 1991-1-2/NA:2010-12). Diese werden als Zeitspanne  $t_\alpha$  angegeben, die erforderlich ist, bis die Wärmefreisetzung von 1 MW erreicht wird. Je nach Art der Nutzung wird eine langsame ( $t_\alpha = 600$  sec), eine mittlere ( $t_\alpha = 300$  bis 450 sec) und eine schnelle ( $t_\alpha = 150$  sec) Brandausbreitung angesetzt. Für Gebäude mit Wohnnutzung und für Büronutzungen wird  $t_\alpha$  mit 300 sec angesetzt.

In einem an der London South Bank Universität durchgeführten Forschungsvorhaben (Holborn, et al., 2004) wurden Daten aus einer Datenbank realer Einsätze der Londoner Feuerwehr über einen Zeitraum von fünf Jahren zwischen 1996 und 2000 gesammelt und in Bezug auf vielfältige Einflussparameter ausgewertet. Als ein wesentlicher Parameter wurde die Brandentwicklungsgeschwindigkeit  $\alpha$  [kW/s<sup>2</sup>] mittels Abschätzung bzw. Rückrechnung der  $\alpha t^2$ -Kurve auf Basis der Informationen zur Brandausbreitungsfläche zum Zeitpunkt der Brandentdeckung und bei Eintreffen der Feuerwehr in Verbindung mit den Zeitintervallen zwischen Brandausbruch und –entdeckung sowie Brandausbruch und Eintreffen der Feuerwehr für jeden Brandfall einzeln ermittelt. Dem Anstieg der Energiefreisetzung in der Brandentwicklungsphase wurde dabei die  $\alpha t^2$ -Kurve mit einer quadratischen Entwicklung zu Grunde gelegt. Tabelle 5-1 enthält die Zusammenstellung der ausgewerteten Brandfälle in Wohngebäuden.

Tabelle 5-1: Zusammenfassung der Auswertung zu Brandentwicklungsgeschwindigkeiten nach (Holborn, et al., 2004)

Klassen der Brandentwicklungsgeschwindigkeit	Größe von $\alpha$ [kW/s <sup>2</sup> ]	Zeit $t_\alpha$ [sec]	Anzahl [-]	Anteile [%]
sehr langsam	< 0,000412	> 1600	142	30
langsam	0,000412 – 0,006594	400 – 1600	276	57
mittel	0,006594 – 0,026375	200 – 400	49	10
schnell	0,026375 – 0,1055	100 – 200	13	3
sehr schnell	> 0,1055	< 100	1	< 1
Summe der untersuchten Fälle			481	100

Vergleicht man die Werte für die Brandentwicklungsgeschwindigkeit nach (Holborn, et al., 2004) mit dem normativ festgelegten Wert nach (DIN EN 1991-1-2/NA:2010-12) für eine Wohnnutzung, so liegt dieser im Bereich des 90%-Quantils und entspricht somit dem Sicherheitskonzept der Eurocodes.

Eine Rechtfertigung für die Verwendbarkeit der Daten zur Brandentwicklungsgeschwindigkeit in Deutschland bietet der Vergleich der prozentuellen Anteile aus Tabelle 5-1 mit den in Deutschland veröffentlichten Statistiken zu den angetroffenen Brandausmaßen. Das angetroffene Brandausmaß kann dabei in einen engen Zusammenhang mit der vorherrschenden Brandentwicklungsgeschwindigkeit gestellt werden. Es ergeben sich mit annehmbarer Übereinstimmung ähnliche Verteilungen mit den Brandausmaßen Mittelfeuer und Großbrand (vgl. hierzu Kapitel 6.5, Abbildung 6-24) mit Anteilen von rund 10 bis 25%.

Als Parameter für die Verteilung der Brandentwicklungsgeschwindigkeit wurden für die Simulationen in dieser Arbeit (vgl. Ausführungen in Kapitel 7), wie in der Veröffentlichung von Holborn vorgeschlagen, der Mittelwert  $\mu_\alpha = -7,0$  sowie die zugehörige Standardabweichung von  $\sigma_\alpha = 1,98$  als Basis für eine Log-Normal-Verteilung verwendet. Abbildung 5-1 zeigt die grafische Darstellung der zugehörigen Verteilung. Der angegebene, negative Mittelwert ist mit der Abbildung des Verlaufes als Log-Normal-Verteilung zu erklären. Um zu einem Vergleich mit den in Tabelle 5-1 aufgezeigten Werten zu kommen, ist der Exponent davon zu bilden.

Der Mittelwert errechnet sich demnach zu  $\alpha_{mean} = \exp^{-7,0} = 0,0009112 \text{ kW/s}^2$  und entspricht der Klasse „langsam“.

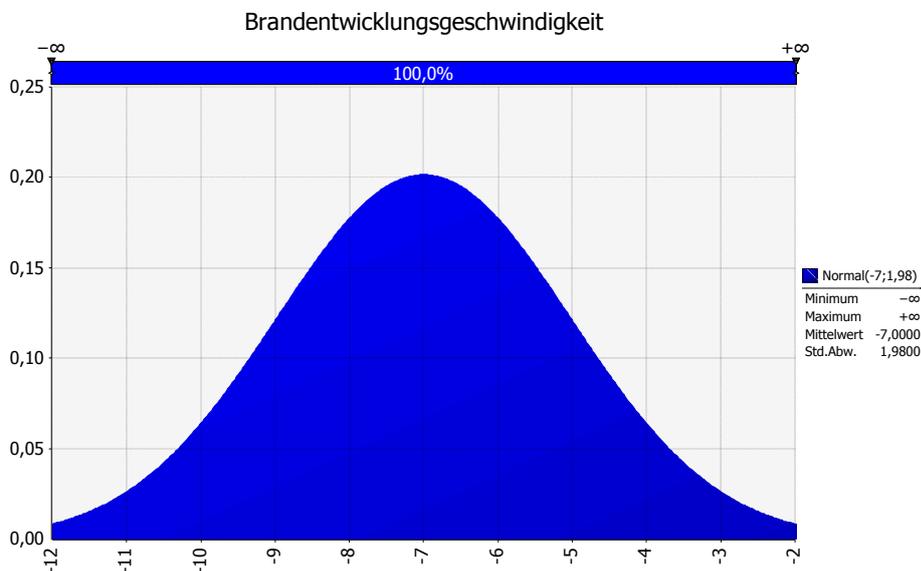


Abbildung 5-1: Darstellung der log-NV zur Brandentwicklungsgeschwindigkeit nach (Holborn, et al., 2004)

### 5.2.3 Brandlasten / Brandlastdichten

Brandlasten werden grundsätzlich aufgeteilt in mobile Brandlasten, bestehend aus sämtlichen beweglichen Gütern innerhalb eines betrachteten Raumes, und in immobile Brandlasten, bestehend im Wesentlichen aus der Konstruktion bzw. den Bauteilen und Baustoffen. Vereinfachend wurde für die vorliegende Arbeit angenommen, dass im Einklang mit den Vorgaben aus der Muster-Richtlinie (M-HFHolzR, 2004) sämtliche Konstruktionen zunächst brandschutztechnisch vom untersuchten Raum durch entsprechende Schutzbekleidungen getrennt sind und sich nicht am Brandgeschehen beteiligen.

Brandlastdichten werden national als Eingang für die Naturbrandmodelle in (DIN EN 1991-1-2/NA:2010-12), Anhang BB vorgegeben. Für die Berechnungen wird hierzu wiederum je nach Art der Nutzung die anzusetzende Brandlastdichte (in  $\text{MJ}/\text{m}^2$ ) als Mittelwert in Verbindung mit der zugehörigen Standardabweichung sowie dem 90%-Quantil angegeben. Letzterer soll als charakteristischer Wert  $q_{f,k}$  für die Brandlastdichte bezogen auf die Grundfläche  $A$  verwendet werden.

Vom Verfasser dieser Arbeit wurde zur eigenen Validierung dieser normativen Vorgaben eine Studienarbeit (Neukam, 2011) betreut, in der Erhebungen zu real vorhandenen Brandbelastungen in Räumen unterschiedlicher Nutzungen (Wohnzimmer, Küche, Schlafzimmer, Büro) durchgeführt wurden. Die Auswertungen ergaben, dass im Wesentlichen die normativen Werte verwendet werden können, jedoch keinen konservativen Ansatz bedeuten. Die in der Studienarbeit ermittelten statistischen Werte lagen in den meisten Fällen jeweils wenig überhalb der normativen Vorgaben.

Als Werte für die Verteilung der Brandlastdichte wurde für die Simulationen in dieser Arbeit der nach (DIN EN 1991-1-2/NA:2010-12) festgelegte Mittelwert für Räume mit Wohnnutzung von  $\mu_q = 780 \text{ MJ}/\text{m}^2$  und der zugehörigen Standardabweichung von  $\sigma_q = 234 \text{ MJ}/\text{m}^2$  für den Ansatz einer logN-Verteilung verwendet. Die beiden Werte wurden vor allem mit Hinblick auf die spätere Vergleichbarkeit bzw. Verwendbarkeit der Simulationsergebnisse gewählt.

### 5.2.4 Brandentdeckung und Brandmeldung

Die Länge des Zeitraumes bis zur Alarmierung hängt von der Schnelligkeit der Entdeckung des Brandes und der Zeit für die Weitergabe der Alarmmeldung an die Feuerwehreinsatzstelle ab. In Deutschland sind dies die integrierten Leitstellen (ILS).

Diese Zeit kann sehr stark variieren und ist wissenschaftlich nur sehr schwer zu quantifizieren. Die wesentlichen Einflussfaktoren sind die Art der Zündquelle und der Brandlast, das Vorhandensein und die Ausbildung von Meldetechnik, die Anwesenheit von Bewohnern bzw. Nutzern und deren Handlungsqualität, usw.

Aus der Literatur lassen sich allgemein nur Ansätze in sehr geringem Umfang zu diesen Zeitintervallen recherchieren. Für die vorliegende Problemstellung hilfreiche Informationen liefert das bereits in Kapitel 5.2.2 vorgestellte, an der London South Bank Universität durchgeführte Forschungsvorhaben (Holborn, et al., 2004) mit den Ergebnissen von Auswertungen zu realen Einsätzen der Londoner Feuerwehr über einen Zeitraum von fünf Jahren. Die Auswertungen lieferten neben den Verteilungen zur Brandausbreitung und Brandentwicklungsgeschwindigkeit unter anderem auch Ansätze für den Zeitraum vom initialen Brandausbruch bis zur Meldung an die Alarmstelle. Sämtliche Daten wurden mit dem Hintergrund einer Verwendung in probabilistischen Risikoanalysen aufbereitet und veröffentlicht.

London ist eine Großstadt mit ca. sieben Millionen Einwohnern und kann mit vielen Charakteristiken mit anderen Großstädten in Europa bzw. den westlichen Industrieländern gleichgesetzt werden. London verfügt wie auch die anderen Großstädte über eine leistungsfähige Berufsfeuerwehr, welche über die Stadt und deren Randbereiche in 32 Einsatzgebiete mit dort angeordneten Feuerwachen aufgeteilt ist. Insgesamt wurden während der fünf Jahre 2044 Brände in Wohnungen und 464 Brände in anderen Gebäuden aufgenommen und für die weiteren Auswertungen verwendet. Folgende Daten wurden in die Analyse einbezogen bzw. aus den vorhandenen Daten zurückgerechnet:

- Zeitpunkte:

- Zurückgerechneter bzw. -geschätzter Zeitpunkt der Brandentstehung
- Zeitpunkt der Brandentdeckung
- Zeitpunkt des ersten Alarmeinganges (Notruf)
- Zeitpunkt der Ankunft der Einsatzkräfte am Einsatzort

- Brandraum:

- Brandausmaß (-fläche) zum Zeitpunkt der Brandentdeckung
- Brandausmaß (-fläche) zum Zeitpunkt der Ankunft der Feuerwehr
- Brandausmaß (Schadensausmaß) nach Ende des Feuerwehreinsatzes
- Nutzungsart der Gebäudeeinheit, in dem der Brand ausgebrochen ist
- Zündquelle
- Art der Brandlast, welche initial an der Brandentstehung beteiligt war
- Eigen- / Selbstlöschmaßnahmen der Nutzer / Bewohner im Vorfeld zum Feuerwehreinsatz

Selbstverständlich waren nicht zu jedem Brand immer alle Daten vollständig zur Verfügung, insgesamt konnte jedoch eine ausreichende Datengrundlage für eine aussagekräftige Auswertung geschaffen werden. Als schwierigste Aufgabe wurde die Zurückrechnung bzw. Abschätzung des Zeitpunktes der Brandentstehung genannt. Hierbei mussten die Brandermittler der Londoner Feuerwehr ihre Ergebnisse auf eine Kombination aus eigenem Urteilsvermögen und Augenzeugenbefragungen stützen. In vielen Fällen war es daher nicht möglich, einen verlässlichen Zeitpunkt für den Brandausbruch zu ermitteln. Tabelle 5-2 zeigt die im Forschungsvorhaben ermittelten Zeiten für Brände in Gebäuden bzw. Räumen mit Wohnnutzung.

Tabelle 5-2: Ereigniszeiten für Brände in Räumen mit Wohnnutzung nach (Holborn, et al., 2004)

Zeitraum zwischen	Anzahl [-]	Min [hh:mm:ss]	Max [hh:mm:ss]	Median [hh:mm:ss]	Mittelwert [hh:mm:ss]	Std.abw. [hh:mm:ss]
Brandausbruch bis Entdeckung	584	00:00:00	07:10:00	00:04:00	00:16:12	00:50:54
Entdeckung und Alarmmeldung	1.651	00:00:00	00:48:00	00:02:00	00:02:12	00:02:36
Alarmeingang und Ankunft FW	1.761	00:01:00	00:21:00	00:04:00	00:04:36	00:02:00
Brandausbruch und Ankunft FW	525	00:02:00	07:18:00	00:11:00	00:24:12	00:52:18

Für die aufgeführten Werte werden in der Veröffentlichung die Arten der Verteilungsformen nicht benannt. Da beim Zeitraum zwischen Ausbruch und Entdeckung des Brandes eine hohe Abweichung zwischen

Median und Mittelwert zu erkennen ist, kann hier keine symmetrische Verteilung, z.B. Normalverteilung, vorliegen. Legt man eine Lognormalverteilung mit entsprechendem Mittelwert und Standardabweichung zu Grunde, ergibt sich für den Median mit 4 Minuten 55 Sekunden zu dem im Forschungsvorhaben angegebenen 4 Minuten 0 Sekunden in Anbetracht der bestehenden Unsicherheit und des hohen Streuungsmaßes eine ausreichend akzeptable Übereinstimmung.

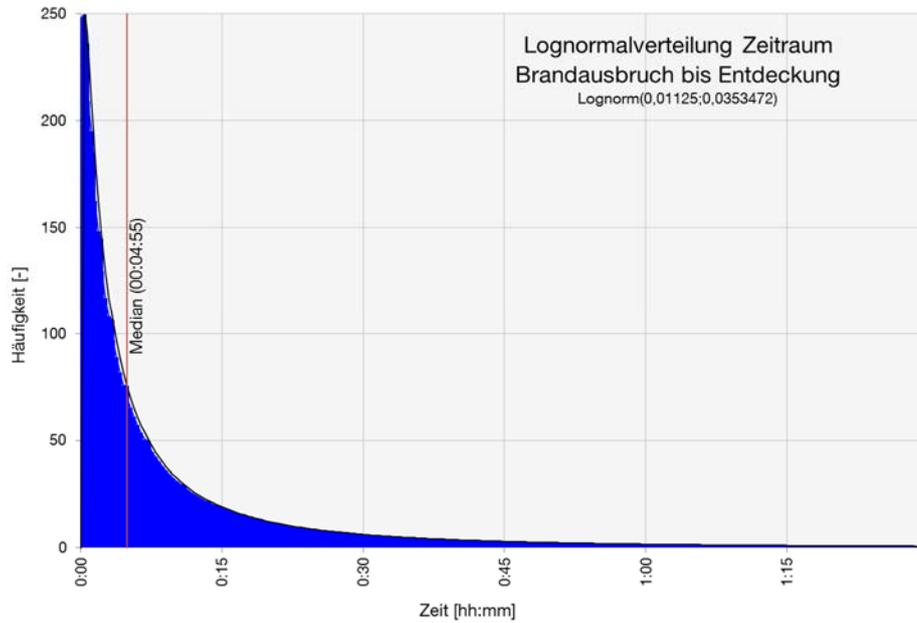


Abbildung 5-2: Darstellung der gewählten Log-Normal-Verteilung zur Abbildung des Zeitraumes zur Brandentdeckung

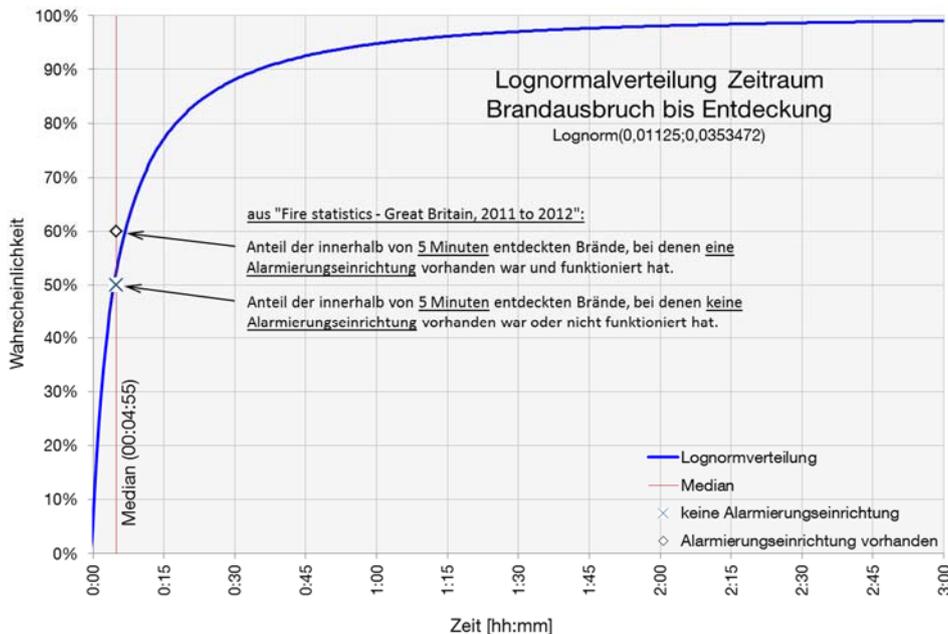


Abbildung 5-3: Kumulative Wahrscheinlichkeitsdarstellung des Zeitraumes bis zur Branddetektion

Eine zusätzliche Plausibilitätsüberprüfung zur gewählten Verteilung wurde anhand eines Vergleichs mit Daten aus der UK Fire statistics (Department for Communities and Local Government, 2013) vorgenommen. Durch Eintrag der beiden veröffentlichten Werte zur Entdeckung von Bränden innerhalb

der ersten fünf Minuten jeweils mit und ohne Vorhandensein einer Alarmierungseinrichtung konnte eine gute Übereinstimmung mit dem abgebildeten Graphen der kumulativen Wahrscheinlichkeit in Abbildung 5-3 festgestellt werden.

Um sicher zu stellen, dass die ermittelten Daten und deren Verteilung auch auf deutsche Randbedingungen übertragbar sind, müsste das Vorhandensein technischer Maßnahmen zur Detektion von Bränden (Rauchwarnmelderpflicht) der beiden Länder verglichen werden. Für die Bundesrepublik Deutschland liegen jedoch nach eigener Recherche nur wenig belastbare Werte aus öffentlichen Statistiken vor. Die in Kapitel 6.5, Tabelle 6-20 dargestellte Recherche zur Rauchwarnmelderpflicht in den Bundesländern zeigt, dass zwar nahezu alle Bundesländer die Verpflichtung für die Ausrüstung von Neubauten und Sanierungsmaßnahmen eingeführt haben, die Frist für die Nachrüstung der Bestandsbauten sich jedoch teilweise noch weit in die kommenden Jahre zieht. In einer Forsa-Studie von 2006 wurde eine Ausstattung der Privathaushalte von 31 % festgestellt, 1999 wurde der Ausstattungsgrad noch mit 5 -7 % beziffert. Bezüglich der Ausfallwahrscheinlichkeiten von installierten Rauchmeldern konnten bislang keine zitierbaren Angaben recherchiert werden.

In Großbritannien besteht seit 1992 die Pflicht zum Einbau von Rauchmeldern in neuen Gebäuden, auch in Privathaushalten (DETR, 1992). Verpflichtend ist dabei mindestens ein Rauchmelder je Etage. Seit Einführung der Ausstattungspflicht ist die Anzahl der Brandtoten dort um 40 % gesunken. Die Entwicklung des Anteils von mit Rauchmeldern ausgestatteten Nutzungseinheiten hatte über die Jahre einen stetigen Anstieg. Bereits 1996, vier Jahr nach Einführung der gesetzlichen Rauchwarnmelderpflicht betrug der Ausstattungsgrad 70%, vier Jahre später, im Jahr 2000 bereits 83%. Zum Zeitpunkt 2011 betrug der Ausstattungsgrad von Wohneinheiten mit Rauchmeldern rund 88 % (Department for Communities and Local Government, 2013).

Schätzungen aus in den Jahren 2004/2005 durchgeführten Untersuchungen englischer Häuser (Survey of English Housing (NCSR, 2008)) haben ergeben, dass nur bei einem Fünftel aller in Haushalten entstandenen Brände die Feuerwehr alarmiert wurde. Dies wird dadurch begründet, dass viele der in der Studie aufgenommenen Brände nur ein sehr geringes Ausmaß erreichten und bereits von einer im Haushalt befindlichen Person gelöscht wurden, ohne dass die Feuerwehr hinzugezogen werden musste.

*Tabelle 5-3: Vergleich der Ausstattung mit Rauchmelder UK - BRD*

	nach UK Fire statistis	BRD
Ausstattungsgrad mit Rauchmeldern	88% (2011)	31% (2006)
Ausfallwahrscheinlichkeit Rauchmelder	27%	k.A.
Ausfallwahrscheinlichkeit der manuellen Brandbekämpfung	20 %	50 %

Vor dem Hintergrund, dass die anzustellenden Simulationen in dieser Arbeit vornehmlich zur Bewertung von Baumaßnahmen herangezogen werden und diese dann bundesweit der Pflicht zur Ausstattung mit Rauchmeldern unterliegen, wird die Verwendung der Daten aus dem Forschungsvorhaben von Holborn für die weitere Arbeit als sinnvoll erachtet. Mit der bestehenden Rauchwarnmelderpflicht ergeben sich

bezüglich der Brandentdeckung vergleichbare Randbedingungen zu den in England untersuchten Brandfällen.

Für die Betrachtung des Zeitraums zwischen der Entdeckung eines Brandes und des Alarmeingangs bei der Leitstelle, als Hilfeinsatzauslösende Stelle, kann nur in sehr geringem Umfang auf wissenschaftliche Literatur zurückgegriffen werden. Die zielführendsten Untersuchungen können auch hier aus der Abhandlung (Holborn, et al., 2004) entnommen werden. Für eine statistische Auswertung des Meldezeitraumes konnten rund 1650 Brandfälle herangezogen werden, bei denen die Zeit ermittelt werden konnte und im Anschluss an die Meldung ein Löscheinsatz erforderlich wurde. Über die Gesamtheit aller erfassten Zeiten gesehen, lag der Median bei zwei Minuten, der Mittelwert bei 2,2 Minuten. Nahezu die Hälfte (44%) aller Notrufeingänge erfolgten jedoch innerhalb der ersten Minute nach der Entdeckung des Brandes. Das 95%-Quantil wurde mit sechs Minuten angegeben.

Da im Bericht keine exakten Angaben zu Art und Form der zu Grunde zu legenden Verteilung vorhanden waren, wurde für die Verwendung in dieser Arbeit eine Best-Fit-Analyse durchgeführt. Als beste Übereinstimmung ergab sich eine Pearson-Verteilung durch die geeignete Wahl der Koeffizienten  $a$ ,  $b_0$ ,  $b_1$ ,  $b_2$ . Abbildung 5-4 zeigt die ermittelte Verteilung, Tabelle 5-4 den Vergleich zwischen den im Vorhaben angegebenen Werten und der für diese Arbeit angenommene Verteilung. Der Vergleich zeigt eine gute und für die Untersuchungen hinreichend genaue Übereinstimmung.

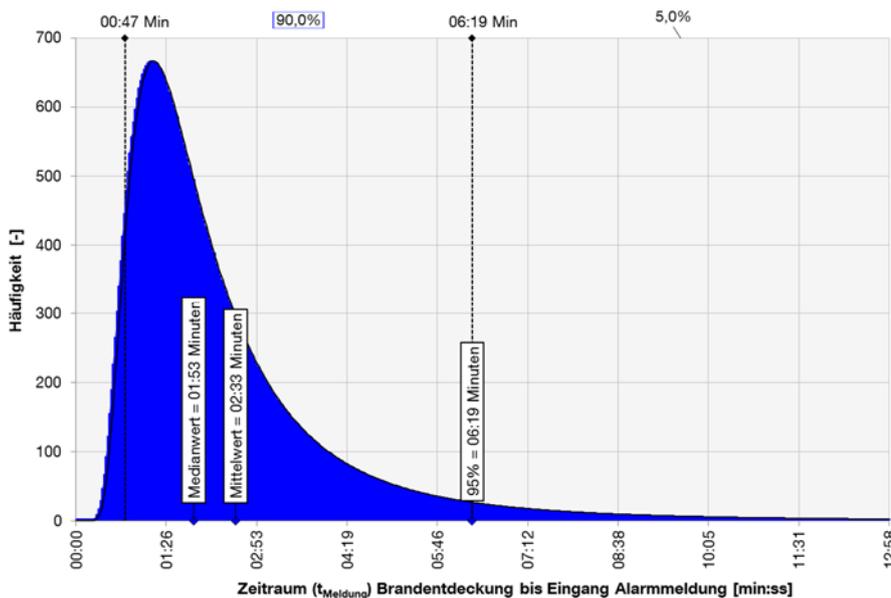


Abbildung 5-4: Ermittelte Häufigkeitsverteilung zu den Daten für den Meldezeitraum nach (Holborn, et al., 2004)

Tabelle 5-4: Vergleich der Kennwerte nach (Holborn, et al., 2004) zu selbst angenommener Pearson-Verteilung

		<b>Median</b>	<b>Mean</b>	<b>Std.dev.</b>	<b>t<sub>95%</sub></b>
Werte aus (Holborn, et al., 2004)	[mm:ss]	02:00	02:12	02:36	06:00
Werte der Pearson-Verteilung	[mm:ss]	01:53	02:23	02:42	06:19

### 5.2.5 Primärbrandbekämpfung

Der Ansatz einer Primärbrandbekämpfung, als Erstangriff durch den Bewohner oder Nutzer der Räumlichkeit nach Entdeckung des Brandes, darf in Deutschland entsprechend der Vorgaben nach (DIN EN 1991-1-2/NA:2010-12) mit einer Ausfallwahrscheinlichkeit von 50% für die Modellierung von Naturbränden angesetzt werden. Dieser Wert regelt direkt die Auftretenswahrscheinlichkeit eines Schadenfeuers in einer Nutzungseinheit.

Englischen Brandstatistiken zufolge, zitiert in (SFPE, 2002), werden durchschnittlich 50 – 70 % der Entstehungsbrände durch die Nutzer gelöscht, sodass die Feuerwehr entweder gar nicht alarmiert wird oder lediglich noch Nachlöscharbeiten durchführen muss. Wie im vorherigen Kapitel 5.2.4 bereits beschrieben, haben die 2004/2005 durchgeführten Untersuchungen sogar eine Ausfallwahrscheinlichkeit der Primärbrandbekämpfung von nur 20% ergeben.

Grundsätzlich besteht ein enger Zusammenhang zwischen der Art und Leistungsfähigkeit der installierten Mittel zur Branddetektion und der Wahrscheinlichkeit, dass ein entstehender Brand noch durch Eigenmittel (Kleinlöschgerät, Löschdecke, ...) wirksam bekämpft werden kann. Je später ein Entstehungsbrand entdeckt wird, umso größer wird dessen Energiefreisetzung sein.

Für die Ermittlung der Auftrittswahrscheinlichkeit eines Schadensfeuers wurden für die in dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen drei Werte als Parameter  $p_{2,1}$  für die Ausfallwahrscheinlichkeit der Primärbrandbekämpfung festgelegt. Tabelle 5-5 zeigt eine Zusammenstellung der angesetzten Werte für  $p_{2,1}$ .

Tabelle 5-5: Ansatz der Ausfallwahrscheinlichkeit ( $p_{2,1}$ ) einer Primärbrandbekämpfung

	<b>Ausfallwahrscheinlichkeit Primärbrandbekämpfung</b>
Mindestausstattung mit Rauchmelder	$p_{2,1} = 0,50$ (50%)
Interner Hausalarm mittels vernetzter Melder o.ä.	$p_{2,1} = 0,45$ (45%)
BMA oder Anlage mit vergleichbarer Zuverlässigkeit	$p_{2,1} = 0,35$ (35%)

Als unterster Wert wurde der in EC1-1-2/NA festgelegte, allgemein gültige Wert von 50% übernommen. Mit steigender Ausstattung zur Brandfrüherkennung wurden die Ausfallwahrscheinlichkeiten auf 45% bzw. 35% für die weiteren Betrachtungen in dieser Arbeit gesenkt. In Anlehnung an die Erfahrungen aus den englischen Brandstatistiken erscheint dieser Ansatz zwar konservativ, auf Grund der fehlenden statistischen Erkenntnisse zu deutschen Verhältnissen sollte jedoch kein übermäßig großer Sprung zu dem normativ vorgegebenen Wert erfolgen. Eine Anpassung dieser Annahmen kann nach ausreichender Erhebung statistischer Daten in diesem Bereich jederzeit vorgenommen werden.

### 5.2.6 Größen von Nutzungseinheiten, Ventilations- bzw. Öffnungsflächen

Für mehrgeschossige Gebäude der Gebäudeklasse 4 ist baurechtlich (MBO, 2002) eine maximale Größe der einzelnen Nutzungseinheiten von 400 m<sup>2</sup> festgelegt. Diese Festlegung sollte auch für Gebäude in

Holzbauweise der Gebäudeklasse 5 bezüglich der Begrenzung der maximal möglichen Brandausbreitungsfläche nicht überschritten werden. In (Hosser, 2013) werden maximal beherrschbare Brandflächen mit 200 m<sup>2</sup> für Freiwillige Feuerwehren und 300 m<sup>2</sup> für Berufsfeuerwehren genannt, die ohnehin unterhalb der baurechtlich festgelegten Grenze liegen. Für die Durchführung der Brandsimulationen in dieser Arbeit wurde ein Bereich von 15 m<sup>2</sup> bis 400 m<sup>2</sup> in Gruppen aufgeteilt untersucht.

Neben der Grundfläche  $A_t$  sind für die Simulation von Raumbränden weitere Eingangsgrößen zur Beschreibung der Nutzungseinheit erforderlich. Diese sind

- die Art der Nutzung Whg / Büro
- die Raumhöhe  $H$  [m]
- die Summe der Öffnungsflächen  $A_w$  [m<sup>2</sup>]
- die mittlere Fensterhöhe  $h_w$  [m]
- sowie die Fläche der Umfassungsbauteile  $A_t$  [m<sup>2</sup>]

Zwischen dem erforderlichen Maß der anzuordnenden Fensterflächen und der Grundfläche von Räumen bzw. Nutzungseinheiten besteht ein mittelbarer Zusammenhang. (MBO, 2002) regelt im §48 die Mindestanforderungen an die Mindestfenstergröße (Rohbauöffnung) von 1/8 der Grundfläche des Raumes. Nach den Ausführungen in (DIN 5034-1:2011-07) dürften die in den Bauordnungen der meisten Länder geforderte Mindestfenstergröße hinsichtlich der Beleuchtung mit Tageslicht eine nicht hinreichende Anforderung darstellen. Eigene Recherchen an im Entstehungszeitraum dieser Arbeit ausgeführten Objekten haben ergeben, dass die im heutigen Wohnungsbau überwiegend angeordneten Öffnungsflächen im Bereich von 1/6 bis 1/4 liegen. In seltenen Fällen, vornehmlich im Bereich des Objektbaus mit Büronutzung erreichen die Öffnungsflächen das Extrem von ca. 1/2 der Grundfläche.

Um die Simulationsergebnisse später für die Praxis auf einer einfachen und üblicherweise verwendbaren Basis bereitstellen zu können, wurde eine Studie zu den sich ergebenden und für die Simulation notwendigen Eingangsparametern, wie den Öffnungsfaktor  $O$  und die mittlere Fensterhöhe  $h_w$  bei Variation

- der möglichen Außenflächen mit Öffnungen (vgl. Abbildung 5-5)
- des Seitenverhältnisses der Grundfläche (2/5, 3/5, 4/5 und 5/5)
- sowie der Raumhöhe  $H$  (2,60 bis 3,40 m)

durchgeführt.

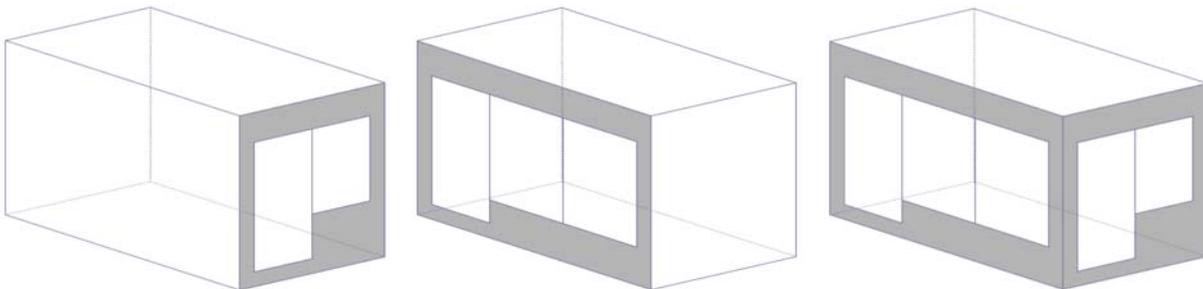


Abbildung 5-5: Ansatz der möglichen Anordnungen von Öffnungsflächen einer Nutzungseinheit / eines Raumes

Der in die Simulation eingehende Öffnungsfaktor  $O$  wurde entsprechend Gleichung [8] auf der Grundlage des Handrechenverfahrens von (Zehfuß, 2004) bzw. (DIN EN 1991-1-2/NA:2010-12) ermittelt.

$$\text{Öffnungsfaktor } O = \frac{A_W \cdot \sqrt{h_w}}{A_t} \quad [8]$$

Insgesamt wurden auf Basis der Studie 140 Varianten für die Untersuchung mittels Simulation ermittelt. Die Varianten teilen sich entsprechend dem Verhältnis der Öffnungsfläche zur Grundfläche auf, wobei beim größten Verhältnis 1/2 nicht alle Öffnungsflächen in den Außenwänden abgebildet werden konnten. Tabelle 5-6 enthält die MIN- und MAX-Werte, die sich aus der Studie ergeben haben.

Tabelle 5-6: Grenzen der aus der Studie zu den Öffnungsflächen abgeleiteten Variationen

		Öffnungsverhältnis (Öffnungsfläche $A_W$ zur Grundfläche $A_f$ )			
		1/8	1/6	1/4	1/2
Anzahl der Variationen	[-]	39	39	39	23
Raumgrößen / NE $A_f$	[m <sup>2</sup> ]	15 bis 400	15 bis 400	15 bis 400	15 bis 150
Raumhöhe $H$	[m]	2,6 / 3,0 / 3,4	2,6 / 3,0 / 3,4	2,6 / 3,0 / 3,4	2,6 / 3,0 / 3,4
Öffnungsfläche $A_W$	[m <sup>2</sup> ]	1,85 bis 50,3	2,4 bis 66,6	3,6 bis 100,3	7,4 bis 88,1
Mittlere Fensterhöhe $h_w$	[m]	1,6 bis 2,0	1,6 bis 2,2	1,8 bis 2,2	2,0 bis 2,2
Fläche Umfassungsbauteile $A_t$	[m <sup>2</sup> ]	72 bis 1082	72 bis 1082	72 bis 1082	72 bis 549
Öffnungsfaktor $O$	[m <sup>1/2</sup> ]	0,031 bis 0,070	0,042 bis 0,095	0,064 bis 0,143	0,130 bis 0,238

Abbildung 5-6 zeigt grafisch den Zusammenhang zwischen den Faktoren Raumgröße  $A_f$ , Raumhöhe  $H$  und Öffnungsfläche  $A_W = 1/X \cdot A_f$  zu dem in der Simulation verwendeten Öffnungsfaktor  $O$ . Beispielhaft wurde eine Zuordnung zu fünf Varianten (1, 17, 84, 97 und 140) im Diagramm dargestellt.

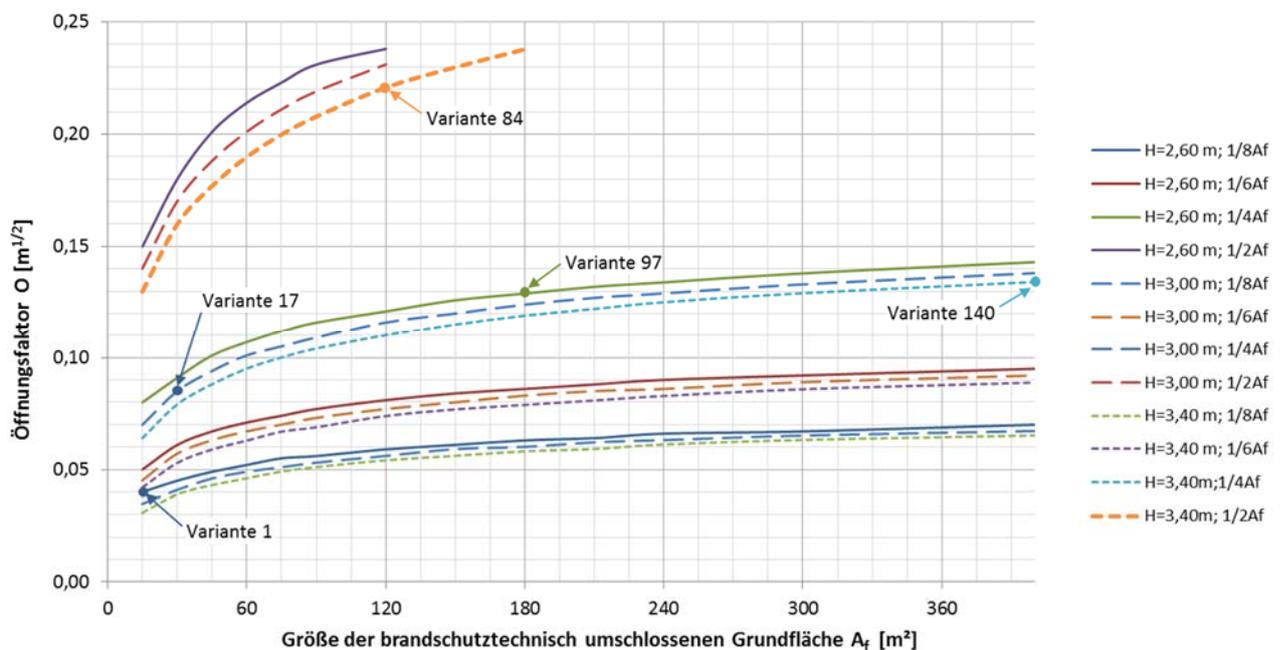


Abbildung 5-6: Darstellung des Zusammenhangs zwischen Grundfläche, Öffnungsverhältnis und Raumhöhe zum zugehörigen Öffnungsfaktor  $O$

Der Öffnungsfaktor  $O$  geht bei der Berechnung ventilationsgesteuerter Brandverläufe entsprechend dem Handrechenverfahren nach (DIN EN 1991-1-2/NA:2010-12) als umgekehrt proportionaler Faktor für die Ermittlung der Brandraumtemperaturen ein. Mit abnehmendem Öffnungsfaktor steigt dementsprechend das Temperaturniveau über den gesamten Brandverlauf. Für die ventilationsgesteuerten Brände ist der Öffnungsfaktor dementsprechend ein sehr wesentlicher Parameter, der maßgeblich die Höhe der Beanspruchung von Bauteilen im Brandraum mitbestimmt. Sämtliche späteren Auswertungen von Simulationen in dieser Arbeit werden auf diesen Faktor bzw. auf das zugehörige Öffnungsverhältnis  $1/X$  bezogen.

Eine Unterscheidung bzw. Berücksichtigung von geschlossenen bzw. teilgeöffneten Fenster- oder Türflächen wurde nicht vorgenommen. Es wurde jeweils angenommen, dass im Verlauf des Brandes die Öffnungsfläche entsprechend ihrem Rechnungsansatz vollständig zur Verfügung steht. Diese Annahme ist aus Sicht des Verfassers möglich, da im Zeitraum der Brandentstehung sich geschlossene Öffnungsfläche durch das Minderangebot an Sauerstoff eher positiv, also den Brandfortschritt dämpfend, auswirken. Im Bereich des Vollbrandes führen geringere Öffnungsflächen zu einer höheren Beanspruchung (vgl. Kellerraumbrände), es kann jedoch angenommen werden, dass die angesetzten bzw. vorhandenen Fensterflächen durchgängig unter Vollbrandbeanspruchung zerstört werden.

#### 5.2.7 Parameter zur Brandintervention (Hilfsfrist, Einsatzzeiten, Löschmaßnahmen)

Alle den Einsatz der Feuerwehr betreffende Parameter werden im nachfolgenden Kapitel 6 auf Basis theoretischer Überlegungen, Literaturrecherche, aus Studienarbeiten und eigenen Untersuchungen hergeleitet und beschrieben. An dieser Stelle wird deswegen vorab nicht näher auf diese Parameter eingegangen.

## 6 Die Brandintervention durch die Feuerwehr

### 6.1 Einleitung

Bereits 1876 schrieb Sir Eyre Massey Shaw, Leiter der London Fire Brigade in seinem Werk „Fire Protection“ (zit. nach (Grimwood, 1992)):

*„Um einen Brand richtig zu löschen, ist es für die Feuerwehrmänner notwendig, sich ihm zu dem Zwecke zu nähern, genau dort Wasser anzuwenden, wo immer es am meisten benötigt wird. Jeder Versuch, einen Brand aus der Ferne zu löschen, wird sich fast ausnahmslos als Fehlschlag erweisen.“*

Auch in der heutigen Zeit behält diese Aussage uneingeschränkt ihre Gültigkeit. Für effektive und sichere Löscheinsätze im Innenangriff sind eine Reihe von Parametern auf Seiten der Feuerwehr als auch auf baulicher Seite erforderlich.

*„Bei der Feuerwehr bedarf es einer adäquaten Führungsstruktur und Taktik, adäquater Löschmittel und – geräte sowie einer konsequenten und effektiven Kommunikationsstruktur als „Rahmen“. Weiterhin müssen die Einsatzkräfte für den Einsatz unter Atemschutz ausreichend vorbereitet und ausgebildet sein, sollten Kenntnisse über taktische Ventilation besitzen und auch in Konzepten für die Abarbeitung eines Atemschutznotfalles ausreichende Kenntnis besitzen.“* (Ridder, et al., 2013)

Auf der Bauwerksseite sind funktionale und damit sicher benutzbare Wege bis zum Brandort sicher zu stellen. Den hierfür notwendigen Rahmen bilden die ortsfesten Rettungswege inklusive aller damit verbundenen Mindestanforderungen, wie zum Beispiel die minimale Breite und maximale Länge der Wege, die einfache Linienführung, die Beschaffenheit der Oberflächen der Umfassungsbauteile, die Art der Verschlüsse von Zugängen und anderen Öffnungen, besondere Maßnahmen zur Rauchfreihaltung bzw. Entrauchung, usw.

Im Folgenden soll das Augenmerk auf eine Erhebung und Auswertung von Daten zur Berücksichtigung der Feuerwehr und deren Leistungsfähigkeit im abwehrenden Brandschutz gelegt werden. Neben den allgemeinen Aufgaben der technischen Hilfeleistung (z.B. Verkehrsunfallhilfe oder Hilfeleistung bei Katastrophen) und Aufgaben im Bereich des vorbeugenden Brandschutzes (Maßnahmen zur Gefahrenabwehr im Vorfeld) hat die Feuerwehr als Hauptaufgabe die Sicherstellung des abwehrenden Brandschutzes zum Schutz von Leben und Gesundheit sowie dem Sach- und Umweltschutz bei Bränden und Explosionen zu erfüllen.

Es liegt in der Natur der Sache, dass wegen unterschiedlichster Faktoren, wie zum Beispiel Umfang und Stand der technischen Ausstattung oder der Größe der personellen Ausstattung inklusive des Standes der Ausbildung oder der Routiniertheit im Einsatz, eine hohe Streuung der zum Zeitpunkt des Brandes abrufbaren Leistungsfähigkeit besteht. Ein grundlegender Unterschied ist deshalb vor Allem im Vergleich von Freiwilligen Feuerwehren zu Berufsfeuerwehren zu erwarten.

Als Maßgrößen für die „Einsatz-Leistungsfähigkeit“ einer Feuerwehr wären Kennzahlen wie „aktive Feuerwehrleute je 1000 Einwohner im Einzugsgebiet“ oder die Anzahl von Hilfs- bzw. Tanklösch- oder Drehleiterfahrzeugen je Quadratkilometer Einzugsgebiet denkbar, zusätzlich müssten dann noch relativierende Größen wie der Ausbildungsstand über die Dienstgrade hinweg, das Erfahrungsniveau oder

auch das physische und psychische Leistungspotential sowie zuletzt der Betriebszustand der Ausrüstungsgegenstände mit einfließen. Gerade diese Faktoren sind qualitativ nur äußerst schwer bzw. nicht mit der notwendigen Genauigkeit zu erfassen. Sie sind vermutlich von der Tagesform abhängig und unterliegen unakzeptabel hohen Streuungen.

Bisher können Löschmaßnahmen durch die Feuerwehr allgemein im Rahmen von Brandschutzkonzepten oder –nachweisen quantitativ nicht angesetzt oder in eine Brandsimulation impliziert werden. Wie die vorhergehenden Absätze bereits erkennen lassen, liegen die Gründe dafür in der Unkenntnis über die Einhaltung der Hilfsfrist sowie des effektiven Zeitpunktes des Beginns der Löschmaßnahme, da dieser nach Eintreffen am Einsatzort durch andere Aufgaben der Feuerwehr (z.B. Menschenrettung, Sicherungsmaßnahmen) erheblich verzögert werden kann (Hosser, 2009). Für wenige Ausnahmefälle existieren Ansätze zur Berücksichtigung der Brandintervention durch Werksfeuerwehren, da diese meist einen sehr genau definierbaren Aktionsradius haben und auch in ihrer Einsatzbereitschaft und Vorgehensweise gut abschätzbar sind.

Um einen allgemeinen Ansatz abwehrender Maßnahmen durch die Feuerwehren für baurechtliche Nachweise zu erhalten, sind auf Basis einer hohen Anzahl von Daten realer Einsätze statistische Auswertungen notwendig, welche die einzelnen Aufgaben der Feuerwehr im abwehrenden Brandschutz quantitativ mit ausreichender Verlässlichkeit darstellen können.

Grundsätzlich können die abwehrenden Maßnahmen und deren Ablauf im Brandfall, wie bereits in Kapitel 3.3 (vgl. Abbildung 3-8) schon in ähnlicher Darstellung verwendet, anhand eines Zeitstrahles (vgl. Abbildung 6-1) gut dargestellt und die wesentlichen, beeinflussenden Faktoren aufgezeigt werden. Je nach Anzahl der verfügbaren Einsatzkräfte am Einsatzort (Trupp-, Staffel-, Zuggröße oder mehr) können die beiden Abschnitte Personenrettung und Löschangriff natürlich ineinander greifen. Grundsätzlich gilt jedoch bei Gebäudebränden mit höchster Priorität immer Personenrettung vor Löschangriff.

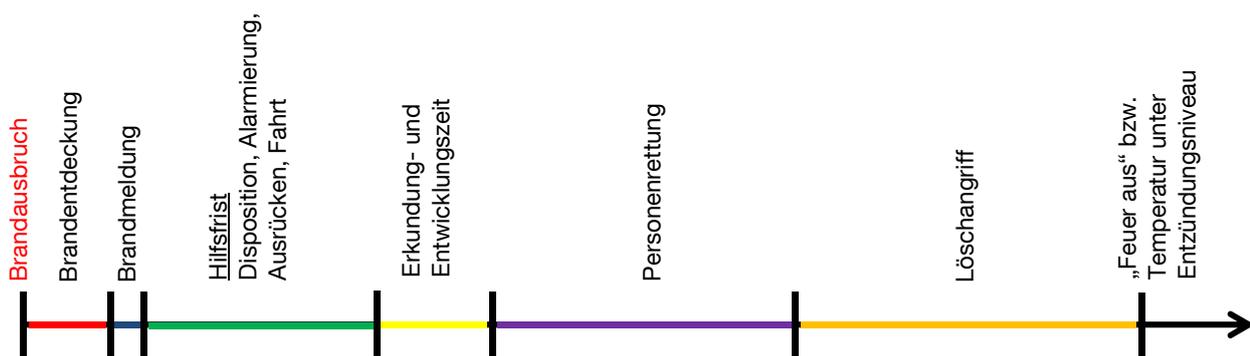


Abbildung 6-1: Zeitachse zum Ablauf eines Brandes mit Intervention durch die Feuerwehr

In Anlehnung an (Hosser, 2013) wird die Alarmierungszeit, als Zeitraum vom Brandausbruch bis zur Brandentdeckung sowie die Eingreifzeit, der anschließende Zeitraum bis zum Beginn der Löscharbeiten, maßgeblich von den nachfolgenden Einflussfaktoren beeinflusst:

- Art des Brandszenarios
- Anwesenheit von Bewohnern/Nutzern bzw. automatische Brandmeldung
- Lage des Objekts (innerstädtisch oder außerbezirklich) in Bezug auf die tageszeitabhängige Verkehrsdichte
- Witterung, Straßenverhältnisse
- Anzahl der verfügbaren Einsatzkräfte
- Anzahl der atemschutztauglichen Einsatzkräfte im Ersteinsatz
- Zufahrtsmöglichkeiten auf das Grundstück und ausreichende Aufstellflächen
- Ausrüstung der Feuerwehr
- Vorhandensein und Qualität von Feuerwehrplänen bzw. ortsspezifischen Informationen zur Orientierung der Einsatzkräfte
- Zugänglichkeit des Objekts (gewaltfreier oder gewaltsamer Zugang)
- Löschwasserversorgung im Abstand vom Objekt
- Vorhandensein von trockenen oder nassen Steigleitungen bei mehrgeschossigen Gebäuden
- Zurückzulegende Entfernungen innerhalb des Gebäudes bis zum Brandraum

In den folgenden Kapiteln sollen die einzelnen Phasen des Interventionsablaufes eingehender untersucht und mit charakteristischen Zeiträumen für die weitere Verwendung in Nachweisen belegt werden.

## 6.2 Hilfsfrist, Funktionsstärke und Erreichungsgrad

Die Hilfsfrist wird nach (AGBF, 1998) als *„Zeitdifferenz zwischen dem Beginn der Notrufabfrage – möglichst ab der ersten Signalisierung des ankommenden Notrufes – in der Notrufabfragestelle und dem Eintreffen des ersten Feuerwehrfahrzeuges an der Einsatzstelle“* definiert.

Damit werden für die Quantifizierung der Hilfsfrist nur Zeitabschnitte herangezogen, die direkt von der Feuerwehr beeinflussbar und dokumentierbar sind. Im Wesentlichen ist das

- die Gesprächs- und Dispositionszeit,
- die Ausrückezeit sowie
- die Anfahrtszeit.

Die Hilfsfristen sind national und international aus Sicht der westlichen Industriestaaten (Europa, USA, Canada, ...) nur mäßigen Streuungen unterworfen und können gut miteinander verglichen werden. Entsprechend (Kerber, 2013) ergeben sich innerstädtisch im Mittel Zeiten vom Alarmeingang bis zum Eintreffen der ersten Einsatzmannschaft zwischen fünf und zehn Minuten. In städtischen Randbereichen werden Zeiten von 10 bis 15 Minuten erforderlich, in dörflichen und ländlichen Gebieten ergeben sich zwischen 15 und 30 Minuten.

Durch den Grundsatzausschuss der Arbeitsgemeinschaft der Leiter der Berufsfeuerwehren in der Bundesrepublik Deutschland – AGBF – wurden Empfehlungen für „Qualitätskriterien“ zur Beurteilung der beiden Haupttätigkeitsbereiche „Brandbekämpfung“ und „Technische Hilfeleistung“ erarbeitet und in einer

Vollversammlung am 16. September 1998 verabschiedet (AGBF, 1998). Als Qualitätskriterien für die Bekämpfung eines kritischen Schadensereignisses wurden benannt:

- Hilfsfrist
- Funktionsstärke
- Erreichungsgrad

Als kritisches Schadensereignis wird allgemein ein Brand definiert, der regelmäßig zu den häufigsten Personenschäden führt. In Deutschland ist dieses der „kritische Wohnungsbrand“ in einem mehrgeschossigen Gebäude mit verrauchten Rettungswegen. Den jährlichen Statistiken zur Folge ist Rauchvergiftung bei Bränden die häufigste Todesursache.

Als Rauchvergiftung wird die Schädigung der Atemwege durch eingeatmete giftige Rauchinhalstoffe bezeichnet. Die Schädigung erfolgt im Allgemeinen durch Sauerstoffmangel in verrauchten Bereichen und das Einatmen von Kohlenmonoxid und Zyanid. Entsprechend den jährlichen Veröffentlichungen des statistischen Bundesamtes (DESTATIS) sterben ca. 95 Prozent der Brandopfer an den Folgen einer Rauchgasvergiftung. Entsprechend wissenschaftlichen Erhebungen in einer in den siebziger Jahren durchgeführten ORBIT-Studie (AGBF, 1998) liegt die Erträglichkeitsgrenze bei einer Belastung durch Brandrauch bei dreizehn Minuten, die Reanimationsgrenze bei siebzehn Minuten. Bis zu diesem Zeitpunkt muss die Rettung von Personen und Tieren, welche den direkten Auswirkungen von Brandereignissen ausgesetzt sind, spätestens abgeschlossen sein.

Aus zahlreichen Versuchen nationaler und internationaler Forschungseinrichtungen zeigt sich jedoch auch, dass bei Raumbränden schon innerhalb weniger Minuten, weit unter den in der ORBIT-Studie ermittelten Zeiten, eine hinsichtlich thermischer und toxischer Exposition äußerst kritische Situation (meist durch einen Flash-Over) entwickeln kann und die Überlebenschancen von im Brandraum befindlichen Personen drastisch sinken lässt.

Trotzdem stellt nach wie vor die AGBF-Empfehlung für viele Kommunen die Planungsgrundlage zur Beschreibung der Leistungsfähigkeit der Feuerwehr dar.

Die Aufgaben der Feuerwehr werden deutschlandweit von

- über **23.000** Freiwilligen Feuerwehren (FFW) im ländlichen sowie im kleinstädtischen Bereich und
  - zur Zeit von **107** Berufsfeuerwehren (BF) in den Großstädten
- gemeinsam wahrgenommen (Quelle: <http://www.agbf.de>).

Hinzu kommen nichtöffentliche Feuerwehren (Werksfeuerwehren), die privatwirtschaftlich agieren und bei großen Industrieunternehmen und Produktionswerken, durch die Industriebau-Richtlinie quantitativ als kompensierende Maßnahme eingesetzt, den abwehrenden Brandschutz und sonstige Gefahrenabwehr sicherstellen.

Per Gesetzesvorgabe sind die Städte und Gemeinden dazu verpflichtet, entsprechend den lokalen Randbedingungen ausreichend leistungsfähige Feuerwehren aufzustellen und zu unterhalten. Öffentliche Feuerwehren werden als Einrichtungen der Kommunen gesehen und auch deren Finanzierung ist die Aufgabe derselben. Die konkreten Vorgaben liefern dazu die Feuerwehrgesetze der einzelnen Bundesländer. In diesen regeln die Innenminister der Länder das Handeln der Feuerwehr. Obwohl über die 16 Gesetze die Begriffsdefinitionen bezüglich der Vorgaben sehr unterschiedlich ausfallen, können diese

aber durchaus miteinander verglichen werden. Nachfolgende Auflistung zeigt für die Bundesländer die festgelegten Zeiträume für den Beginn der Maßnahmen am Einsatzort. Die detaillierte Auflistung der jeweiligen Feuerwehrgesetze und die genauen Hilfsfristdefinitionen sind Anhang 1 zu entnehmen.

In der Übersicht stellen sich die Anforderungen der einzelnen Bundesländer nach eigener Recherche wie folgt dar:

- Baden-Württemberg: zu 95% in 15 Minuten
- Bayern: in 10 Minuten möglich; i.d.R. 12 Minuten und 15 Minuten in dünn besiedelten Gebieten
- Berlin: bedarfsgerecht
- Brandenburg: zu 95% in 15 Minuten
- Bremen: zu 95% in 10 Minuten
- Hamburg: flächendeckend und bedarfsgerecht
- Hessen: zu 90% in 10 Minuten
- Mecklenburg-Vorpommern: 10 Minuten im Jahresdurchschnitt aller Einsätze
- Niedersachsen: zu 95% in 15 Minuten
- Nordrhein-Westfalen: 5 - 8 Minuten; 12 Minuten im ländlichen Raum
- Rheinland-Pfalz: in der Regel maximal 15 Minuten
- Saarland: zu 95% in 12 Minuten
- Sachsen: zu 95% in 12 Minuten
- Sachsen-Anhalt: zu 90% in 12 Minuten
- Schleswig-Holstein: zu 90% in 12 Minuten
- Thüringen: zu 95 % in 12 Minuten und maximal 14 Minuten in dicht besiedelten und zu 95 % in 15 Minuten und maximal 17 Minuten in dünn besiedelten Gebieten

Aus der Auflistung ist zu erkennen, dass von den Gesetzen überwiegend ein Erreichungsgrad von 90 bis 95% gefordert wird.

Das Bundesland Bayern regelt hierzu in der Verordnung zur Ausführung des Bayerischen Feuerwehrgesetzes (AVBayFwG, 2014) die Gliederung, Stärke und Mindestausstattung seiner Freiwilligen Feuerwehren und Pflichtfeuerwehren. Des Weiteren erfolgen Vorgaben zur Ausbildung von besonderen Feuerwehrführungsdienstgraden, Führungskräften und Disponenten Integrierter Leitstellen. Grundsätzlich wird die Verpflichtung zur Hilfeleistung und Alarmplanung als auch die Notwendigkeit der Erstellung eines Einsatzberichtes geregelt.

Im Vollzug des Bayerischen Feuerwehrgesetzes (VollzBekBayFwG, 2013) werden die sich aus dem Feuerwehrgesetz und der zugehörigen Ausführungsverordnung ergebenden Anforderungen quantitativ festgelegt. Für die sogenannte Hilfsfrist wird bayernweit ein Zeitraum von 10 Minuten vorgegeben, in der die jeweilige Feuerwehr in ihrem zuständigen Einsatzbereich nach Eingang einer Hilfeanforderung (Notruf) den an einer öffentlichen Straße liegenden Einsatzort mit einer Mindesteinsatzstärke erreichen soll. Da davon ausgegangen werden muss, dass viele Faktoren, wie beispielsweise der vorherrschende Verkehr oder die vorliegenden Witterungsverhältnisse, diese Zeitspanne von den Einsatzkräften größtenteils unbeeinflussbar variieren lassen, ist diese Anforderung als SOLL-Vorgabe formuliert. Jedoch wird bei der

Aufstellung des jeweiligen regionalen Feuerwehrbedarfsplanes ein Mindesterreichungsgrad (z.B. 95% in Bayern) für die Auslegung zugrunde gelegt.

Unter dem Erreichungsgrad wird der prozentuale Anteil der Einsätze verstanden, bei dem die Zielgrößen „Hilfsfrist“ und „Funktionsstärke“ gleichzeitig erfüllt werden können. Der Erreichungsgrad ist nach (AGBF, 1998) im Wesentlichen abhängig von

- der Gleichzeitigkeit von Einsätzen, die die zuständige Feuerwache teilweise oder ganz binden,
- der strukturellen Betrachtung des Stadtgebietes,
- der Optimierung des Personaleinsatzes,
- den Verkehrs- und Witterungseinflüssen.

Bezüglich der Vorgabe der Mindestfunktionsstärke existiert in der Literatur eine Vielzahl unterschiedlicher Auffassungen. In (AGBF, 1998) wird angesetzt, dass für eine erfolgreiche Menschenrettung und zur Brandbekämpfung beim „Kritischen Wohnungsbrand“ mindestens 16 Einsatzfunktionen (Feuerwehrleute) zur Verfügung stehen müssen. Diese setzen sich zusammen aus einem innerhalb der ersten acht Minuten (~ Hilfsfrist) eintreffenden Löschzug, bestehend aus einem Drehleiterfahrzeug (DL), einem Löschgruppenfahrzeug (LF) und einem Tanklöschfahrzeug (TLF) mit insgesamt zehn Funktionseinheiten. Nach weiteren fünf Minuten ist vorgesehen, dass mit dem Unterstützungs-Löschgruppenfahrzeug (LF) zusätzliche sechs Funktionseinheiten zur Unterstützung der Menschenrettung, zur Brandbekämpfung, zur Entrauchung sowie zur Eigensicherung der Einsatzkräfte eintreffen.

Es kann angenommen werden, dass diese Mindestvorgabe von 16 Einsatzfunktionen für das Ereignis eines „kritischen Wohnungsbrandes“ im Wirkungsbereich von Berufsfeuerwehren regelmäßig erfüllt bzw. übertroffen werden kann. Für den außerstädtischen Wirkungsbereich der Freiwilligen Feuerwehren muss jedoch damit gerechnet werden, dass die volle Anzahl der Einsatzfunktionen nicht immer innerhalb der Hilfsfrist zur Verfügung steht. Es ist also ein wesentlicher Unterschied im Erreichungsgrad zwischen Stadt und Land anzunehmen.

In (Lindemann, 2011) wird aufgeführt, dass in weiten Teilen Deutschlands für die Feuerwehrbedarfsplanung auf die Empfehlungen der Arbeitsgemeinschaft der Leiter der Berufsfeuerwehren (AGBF) sowie auf die Empfehlungen des Landesfeuerwehrverbandes und des Innenministeriums Baden-Württemberg zurück gegriffen wird. Abbildung 6-2 zeigt die vorgesehenen Funktionsstärken für den Erstangriff und der nachrückenden Kräfte.

Die Stärke und Gliederung der Feuerwehreinheiten sind in Deutschland einheitlich in der Feuerwehrdienstvorschrift 3 „Einheiten im Lösch- und Hilfeleistungseinsatz“ (FwDV 3, 2008) festgelegt. Die Mannschaftsstärke wird dort in der Form Einheitsführer/Unterführer/Mannschaft/Gesamtstärke angegeben. Darin sind taktische Einheiten, bestehend aus Mannschaft und Einsatzmitteln, nach ihrer Größe definiert in:

- Trupp / Selbständiger Trupp
- Staffel
- Gruppe
- Zug

Die Gruppe soll hierbei die kleinste Taktische Einheit, bestehend aus einem Gruppenführer, einem Maschinisten, einem Melder sowie einem Angriffs-, einem Wasser- und einem Schlauchtrupp darstellen.

Die zuletzt genannten drei Trupps bestehen aus je zwei Einsatzkräften, sodass sich in Summe eine Mannschaftsstärke von (1/8/9) neun Personen ergibt.

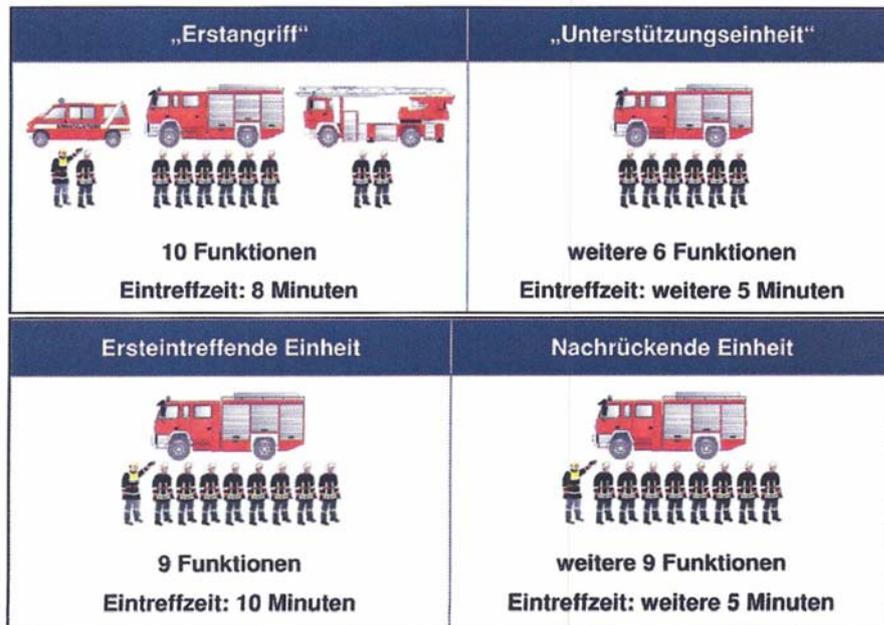


Abbildung 6-2: Hinweise zur Feuerbedarfsplanung, oben: Schutzzieldefinition der AGBF, unten: Bemessungswerte in den Hinweisen zur Leistungsfähigkeit der Feuerwehr in Baden-Württemberg; entnommen aus (Lindemann, 2011)

Gerade in ländlichen Gebieten reduziert sich die Verfügbarkeit von Einsatzkräften innerhalb der Hilfsfrist auf Staffelgröße. Diese besteht aus einem Staffelführer, einem Maschinisten sowie einem Angriffs- und einem Wassertrupp, also aus einer Mannschaftsstärke von (1/5/6) sechs Personen. Weitere Kräfte rücken im Verlauf selbstständig nach.

Ein Zug besteht aus dem Zugführer, dem Zugtrupp als Führungseinheit und aus Gruppen, Staffeln und/oder selbstständigen Trupps. Ein Zug besteht in der Regel aus 22 Einsatzkräften, kann aber je nach Bedarf und Umfang des Einsatzauftrages durch Trupps, Staffeln oder Gruppen erweitert werden.

Um neben den gesetzlichen Vorgaben für die Hilfsfrist einen eigenen Eindruck zu real existierenden Zeiten zu bekommen, wurden in der vorliegenden Arbeit gesammelte Daten aus einer vom Verfasser betreuten Masterarbeit ((Dautermann, 2013), bisher unveröffentlicht) für die weitere Bearbeitung aufbereitet sowie statistisch ausgewertet. Die Daten stammen aus zugehörigen Berichten und Protokollen für rund 300 erfasste Einsätze (Zeitraum ~ 32 Monate) der Berufsfeuerwehr einer bundesdeutschen Großstadt. Als Kriterium für die Auswahl der Einsätze wurde ein „kritisches Brandereignis“ (Wohnungsbrand), definiert als Brandeinsatz mit Personenrettung, zu Grunde gelegt. Die Datenpakete wurden jeweils im Zuge der Einsatzabwicklung von Brandfällen elektronisch durch die integrierte Leitstelle (ILS) generiert. Da diese Daten auch in den folgenden Kapiteln als Grundlage für weitere Auswertungen dienen erfolgt die nähere Beschreibung der verwendeten Datengrundlage an den jeweiligen Stellen.

Je nach angenommener Grundverteilung liefert die Auswertung der gesammelten Daten für die Hilfsfrist einen Mittelwert von rund sechs Minuten und ein 95%-Quantil von neun Minuten bei einer Normalverteilung und rund zehn Minuten bei einer angenommenen Gamma-Verteilung. Tabelle 6-1 zeigt die händische Auswertung mit angesetztem Minimum, Maximum sowie den errechneten Werten zum Mittelwert, Median, Standardverteilung, Variationskoeffizient und 95%-Quantilwert für die drei angenommenen Verteilungen.

Tabelle 6-1 Zusammenfassung der berechneten Verteilungswerte zur Hilfsfrist unter Verwendung der Daten aus (Dautermann, 2013)

	Einheit	Normalverteilung	log NV	Gamma-Verteilung
Anzahl	[ - ]	272	272	$\infty$
Minimum	[hh:mm:ss]	00:03:00		0
Maximum	[hh:mm:ss]	00:14:00		$\infty$
Median	[hh:mm:ss]	00:06:00		00:06:23
Mittelwert	[hh:mm:ss]	00:06:34	-5,432	00:06:34
Stabw	[hh:mm:ss]	00:01:52	0,290	00:01:52
VAR	[ - ]	28,3%		28,3%
95%-Fraktile	[hh:mm:ss]	00:09:00		00:09:54

In einem weiteren Schritt wurden die Daten mit einer „BestFit-Analyse“ unter Verwendung eines auf Microsoft-Excel basierenden Risikotools @RISK (vgl. Kapitel 7.1) zur exakten Verteilungsfindung ausgewertet. Die Analyse ergab eine größtmögliche Übereinstimmung der Daten mit einer Gamma-Verteilung.

„Die Gammaverteilung ist eine kontinuierliche Wahrscheinlichkeitsverteilung über der Menge der positiven reellen Zahlen.“ Sie wird unter anderem in der Warteschlangentheorie, zur Beschreibung von Bedien- oder Reparaturzeiten verwendet, also Bereichen, in denen funktionale Vorgänge zeitlich analysiert werden. (Quelle <http://de.wikipedia.org/wiki/Gammaverteilung>)

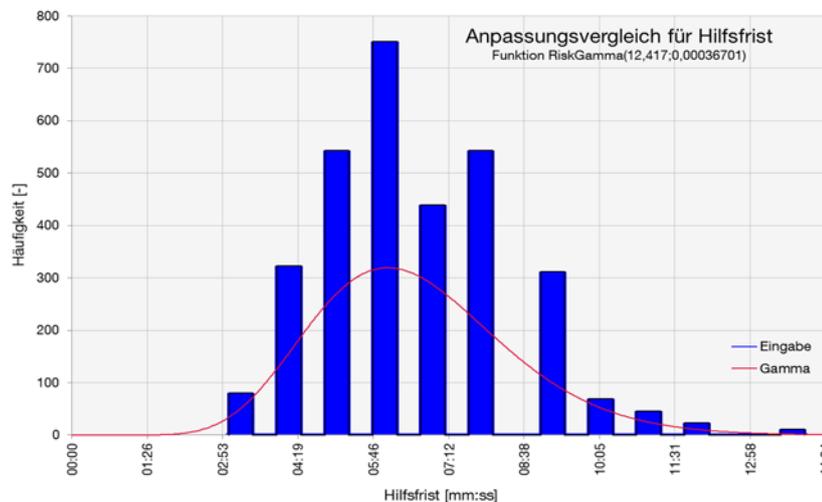


Abbildung 6-3: Grafische Darstellung der Best-Fit-Verteilung für die Hilfsfrist unter Verwendung der Daten aus (Dautermann, 2013)

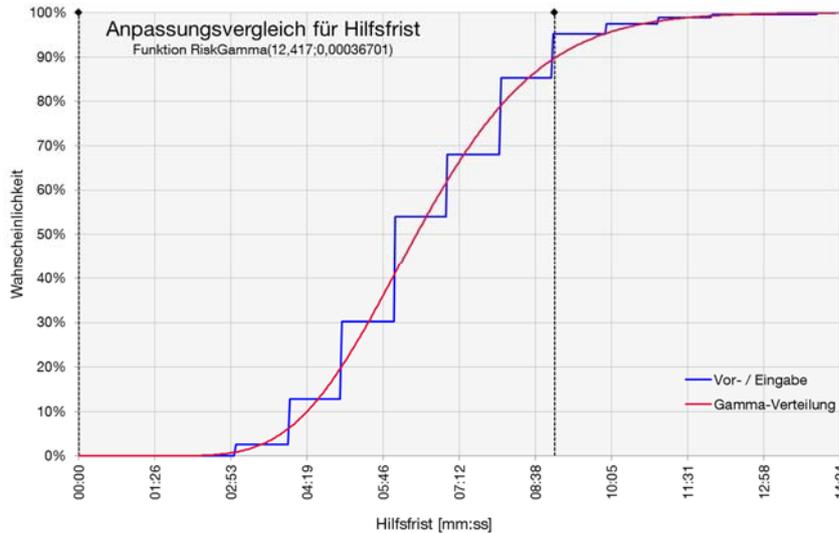


Abbildung 6-4: Darstellung Hilfsfrist kumulativ aufsteigend unter Verwendung der Daten aus (Dautermann, 2013)

Abbildung 6-3 und Abbildung 6-4 zeigen grafisch die erhaltene Häufigkeitsverteilungen (Wahrscheinlichkeitsdichte und kumulativ aufsteigend), welche für die weiteren Untersuchungen bzw. die Simulationen nachfolgend als Grundlage verwendet werden.

Die Gamma-Verteilung wurde als Basisverteilung für die Berücksichtigung der Hilfsfrist in oben dargestellter Form für die in dieser Arbeit durchgeführten Simulationen zu Grunde gelegt.

### 6.3 Beschreibung der Einzelschritte des Feuerwehreinsatzes ab der Ankunft am Einsatzort

#### 6.3.1 Einleitung

Um die einzelnen Zeitspannen für die Abläufe bzw. Einsatzschritte am Einsatzort nach Ankunft der Feuerwehrkräfte ermitteln und auf deren Plausibilität beurteilen zu können, ist es erforderlich, die Vorgänge zu kennen und in ihren wesentlichen Prinzipien verstanden zu haben. In den nachfolgenden Kapiteln werden die Einzelschritte beschrieben und mit Zeitansätzen belegt.

#### 6.3.2 Erkundungs- und Entwicklungszeit

Auf dem Weg der Einsatzkräfte zum Brandort stehen, mit Ausnahme von Sonderbauobjekten, für welche der Feuerwehr auf Grund baurechtlicher Vorschriften Einsatzpläne (Feuerwehrpläne) und spezielle Hinweise auf besondere Gefahrensituationen (z.B. bei Laboren durch chemische oder atomare Giftstoffe) zur Verfügung zu stellen sind, nur Informationen aus der Alarmmeldung der integrierten Leitstelle (ILS) zur Verfügung. Diese beschränken sich im Allgemeinen auf die Informationsquelle des an die ILS

abgegebenen Notrufes, auf Basis dessen der Feuerwehreinsatz unter Angabe entsprechender Einsatzstichpunkte, der Einsatzadresse, dem Meldebild und Einsatzstichwort ausgelöst wird. Das Meldebild und Einsatzstichwort liefern der ausrückenden Rettungsmannschaft einen ersten, wenn auch nur wagen Eindruck von der Art und dem Ausmaß des Geschehens vor Ort. Weitere Einzelheiten erhalten die Einsatzkräfte im Idealfall während der Anfahrt über die Kommunikation (Alarm-Fax und Wachdurchsagen) mit dem Disponenten der ILS, welcher wiederum in Verbindung mit der notrufabgebenden Person oder weiteren zum vorliegenden Notfall anrufenden Personen steht.

Nach Eintreffen am Einsatzort hat sich der Einsatzleiter als erste Maßnahme ein soweit wie möglich umfassendes Bild über das vorherrschende Szenario zu machen. Hierbei versucht er zu erkennen, welche Gefahren für gegebenenfalls noch im Gebäude befindliche Personen sowie für die beginnenden Einsatzmaßnahmen vorliegen und mit welcher Taktik und Prioritäten die folgenden Maßnahmen einzuleiten sind.

Nach (FwDV100, 1999) ist die Erkundung die erste Phase des Führungsvorganges am Einsatzort. Sie ist die Grundlage für die Entscheidungsfindung und umfasst das Sammeln und Aufbereiten der erreichbaren Informationen über Art und Umfang der Gefahrenlage beziehungsweise des Schadenereignisses sowie über die Dringlichkeit und die Möglichkeit einer Abwehr und Beseitigung vorhandener Gefahren und Schäden.

Die Informationsgewinnung erfolgt für den Einsatzleiter dann vor Ort durch die Einbeziehung eigener Wahrnehmungen, Meldungen nachgeordneter Führungs- und Einsatzkräfte sowie sonstigen fachkundigen Personen oder der Bevölkerung.

Entsprechend den Ausführungen nach (Dautermann, 2013) werden zur genauen Lagefeststellung vier Phasen in nachfolgender Reihenfolge abgehandelt:

- Frontalansicht des Schadensobjektes
- Befragung (Mitteiler, Augenzeugen, Betroffene)
- Innenansicht (Zugänglichkeit zum Gebäude muss vorhanden sein)
- Gesamtübersicht (Erkundung aller Seiten des Schadobjektes, Vorder-, Hinter- und Seitenbereiche)

Bezüglich der auftretenden Gefahren an der Einsatzstelle werden Atemgifte, Angstreaktionen, Ausbreitung von Feuer und Rauch, atomare Strahlung, chemische Stoffe, Erkrankungen/Verletzungen, Explosion, Elektrizität und Einsturz bzw. Absturz aufgezählt. Je nach Ereignis werden diese in unterschiedlicher Intensität angetroffen und müssen dementsprechend in priorisierter Reihenfolge bekämpft werden.

Neben dem obersten Ziel des Eigenschutzes der Einsatzkräfte gilt als allgemeine Grundregel Menschenrettung vor Brandbekämpfung. Von dieser Grundregel wird nur in zwei Ausnahmefällen, dem U-Bahn und dem Tunnelbrand, abgewichen, da es hier durch eine wegen vorgezogener Rettung einzelner Personen verzögerten Löschmaßnahme zu einer schnellen Brandausbreitung in weitere Bereiche und daraus resultierendem weitaus höherem Gefährdungspotential kommen kann.

Befinden sich Personen in Gefahrenbereichen und wurde vom Einsatzleiter der Auftrag bzw. Befehl zur Personenrettung oder der unmittelbaren Brandbekämpfung abgegeben, beginnt der sofortige Aufbau der Gerätschaften für den folgenden Einsatz.

Zur Sicherung gegen die bei einem Brand entstehenden, gesundheitsschädlichen Stoffe und Einwirkungen, welche über den Mund, die Schleimhäute und Atemwege, aber auch über die Haut in den Körper aufgenommen werden können, rüsten sich die Rettungskräfte grundsätzlich vor Betreten des Brandobjektes mit Atemschutzmasken bzw. -geräten und geeigneten Schutzbekleidung aus. Nach heutigem Stand der Technik wird diese Ausrüstung durch die Rettungskräfte bereits während der Anfahrt zum Objekt aufgenommen.

Zur Eigensicherung wird vor jeglichem Vorstoß in das Gebäude zunächst eine Rückzugssicherung aufgebaut. Diese muss sicherstellen, dass im Gebäude auch unter „Nullsicht“ eine Orientierung für den Rückweg möglich ist. In den meisten Fällen verwendet der vorstoßende Trupp hierzu das mitgeführte Löschrohr bzw. die Schläuche. Im Bereich der Feuerwehren der Stadt München wird bei diesem Vorgehen nach (Neulinger, et al., 2012) für einen ausreichend großen Aktionsradius des Angriffstrupps, außerhalb des Gefahrenbereichs eine Schlauchreserve (vgl. Abbildung 6-5) ausgelegt. Diese wird nach der Anzahl der zu überbrückenden Stockwerke gewählt (im Regelfall zwischen einer und sechs C-Längen à 15 m). In anderen Lehrunterlagen (z.B. der Feuerweherschule Würzburg oder der Landesfeuerweherschule Schleswig-Holstein) erfolgt die Entnahme der C-Schläuche aus den Tragekörben am Fuß des Treppenraumes platziert, erst im Zuge des Vorstoßes.

Als Alternative kann der Vorstoß ohne Mitführung von Löschrohren mittels Sicherung durch eine Feuerwehrleine oder Führungsleine (vgl. Abbildung 6-6) durchgeführt werden.



*Abbildung 6-5: Schlauchreserve  
beide Abbildungen entnommen aus (Dautermann, 2013).*

*Abbildung 6-6: Feuerwehrleine,*

Bezüglich des anzusetzenden Zeitbedarfs für die Erkundung und Entwicklung bestehen äußerst kontroverse Meinungen in der Literatur, da die diskutierten Zeitangaben jeweils auf reinen Schätzungen beruhen. So ergibt sich zum Beispiel eine verfügbare Erkundungs- und Entwicklungszeit entsprechend den Vorgaben der AGBF aus der Subtraktion des maximalen Zeitraumes, in der eine Reanimation von Personen (Annahme von 17 Minuten aus ORBIT-Studie: Kohlenmonoxid-Erträglichkeit) noch möglich ist, von den einzelnen Zeitabschnitten der Hilfsfrist (9,5 Minuten) sowie der Entdeckung und Meldung (3,5 Minuten). Nach AGBF wird dementsprechend eine Erkundungs- und Entwicklungszeit von vier Minuten angesetzt.

Den vorgenannten Schätzungen stehen die in (Lindemann, 2011) beschriebenen Untersuchungen auf Basis durchgeführter Versuchsreihen unter Beteiligung verschiedenen Berufs- und Freiwilliger Feuerwehren entgegen, in denen kumuliert ein Zeitraum für die Erkundungs- und Entwicklungszeit für ein „kritisches Brandereignis“ = „kritischer Wohnungsbrand“ von 13 ± 3 Minuten ermittelt wird.

Tabelle 6-2: Vergleich der veröffentlichten Werte zu „kritischen Wohnungsbränden“ nach AGBF und (Lindemann, 2011)

	<b>AGBF [min]</b>	(Lindemann, 2011) <b>[min]</b>
Reanimationsgrenze ORBIT Studie	17,0	17,0
Entdeckung und Meldung	- 3,5	- 3,5
Gesprächs- und Dispositionszeit	-	- 1,5
Erkundung und Entwicklung	- 4,0	- 13,0
<b>Summe</b> (verbleibender Zeitraum für die Hilfsfrist)	<b>9,5 Min</b>	<b>- 1,0 Min</b>

Eigene Untersuchungen in einer vom Verfasser betreuten Studienarbeit (Dautermann, 2012) zu Einsatzübungen einer Berufsfeuerwehr am Übungsstandort Wildflecken haben im Vergleich zur AGBF geringfügig höhere Werte ergeben. Aus neun durchgeführten Übungen ergab sich ein Mittelwert für die Erkundungs- und Entwicklungszeit von rund 4 Minuten und 50 Sekunden. Tabelle 6-3 enthält eine Zusammenfassung der Mittel-, Min- und Max-Werte aus den Übungsbeobachtungen zu neun durchgeführten Übungen.

Tabelle 6-3: Werte für die Erkundungs- und Entwicklungszeit bei neun Übungen (Dautermann, 2012)

	<b>Mittelwert [mm:ss]</b>	<b>Median [mm:ss]</b>	<b>MIN [mm:ss]</b>	<b>MAX [mm:ss]</b>
Erkundungsphase	02:38	02:33	01:21	04:25
Entwicklungsphase	02:11	02:11	01:02	03:32
<b>Summe</b>	<b>04:49</b>	<b>04:44</b>	<b>02:23</b>	<b>07:57</b>

### 6.3.3 Der Vorgang der Personenrettung

Stehen alle notwendigen Einsatzmittel zur Verfügung, beginnt der Angriffstrupp mit dem Vorrücken zur vermuteten Stelle der in Gefahr befindlichen Person bzw. Personen. Abbildung 6-7 zeigt schematisch die notwendigen Einzelschritte bis zum erfolgreichen Abschluss dieses Vorganges.

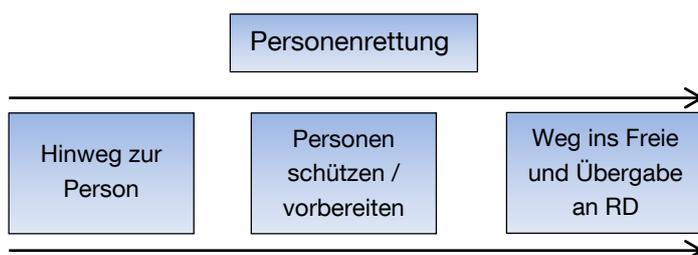


Abbildung 6-7: Einzelschritte der Personenrettung

Grundsätzlich erfolgt als erste Wahl jeglicher Vorstoß in ein Gebäude im sogenannten Innenangriff über den ersten und ortsfesten Rettungsweg, den notwendigen Treppenraum. Für sämtliche Maßnahmen bietet der Angriff über ortsfeste Rettungswege zahlreiche Vorteile, die zu einem erheblich geringeren zeitlichen Aufwand und einer damit deutlich höheren Effektivität gegenüber nicht ortsfesten Rettungswegen führen. Je nach Fortschritt und Ausmaß des Brandereignisses kann im Verlauf die gefahrlose Benutzung des Treppenraumes durch direkte (thermisch) oder indirekte (Rauch) Brandbeeinflussung eingeschränkt oder sogar unmöglich werden. Durch geeignete, zusätzliche Hilfsmittel der Feuerwehr, wie der Fluchthaube zum direkten Schutz der zu rettenden Person oder eines leistungsstarken Gebläses (meist am Drehleiterfahrzeug mitgeführt), wird dieser Rettungsweg so lange wie möglich aufrecht erhalten. Das Gebläse wird im Erdgeschoss am Zugang zum Treppenraum installiert und durch Erzeugung von Überdruck kann eindringender Rauch zurückgehalten oder durch geöffnete Fenster bzw. der im Dach angeordneten Entrauchungsklappe abgeführt werden.

Mit Betreten des Gebäudes, findet der unmittelbare Vorstoß zur in Gefahr befindlichen Person(en) statt. Führt der Weg dorthin durch rauchfreie Bereiche, kann mit einem zügigen Vorankommen gerechnet werden. In Versuchen der Feuerwehr Aachen im Jahr 1999 konnte für ein siebengeschossiges Gebäude unter Sicht eine Zeit von 4 Minuten bis zum Erreichen des siebten Obergeschosses unter Verwendung von Schlauchtragekörben ermittelt werden (Cimolino, et al., 2004). Ähnliche Versuche der Frankfurter Feuerwehr aus dem Jahr 2001 bestätigen dieses Ergebnis. In verrauchten Angriffswegen verlängert sich diese Zeit mit zunehmender Rauchintensität bzw. Verrauchungsgrad erheblich.

Mit dem Abstand zum Boden steigt im Allgemeinen die Stärke der Sichtbehinderung als auch die Temperatur an. Aus diesem Grund muss sich der Angriffstrupp bei Sichtbeeinträchtigung in der Hocke oder im Seitkriechgang (vgl. Abbildung 6-8) fortbewegen. Er tastet sich mit Händen und Füßen Stück für Stück vorwärts, woraus ein wesentlich zeitaufwendigeres und unfallträchtigeres Vorwärtskommen resultiert.



Abbildung 6-8: Trupp im Seitkriechgang, entnommen aus (Dautermann, 2013)

Befinden sich die zu rettenden Personen in verrauchten Bereichen, beginnt der Angriffstrupp mit Erreichen dieses Ortes das Absuchen. In (Dautermann, 2013) wurden hierfür aus der Literatur drei, von der Feuerwehr verwendete Verfahren vorgestellt:

- Rechte- / Linke-Hand-Suche / Wandtechnik (für kleinere Räume)
- Tauchertechnik (für größere Räume)
- Baumtechnik (für größere Räume und Säle)

Aus den drei Verfahren ist bevorzugt das Absuchen von Räumen in Wohn- und Büroeinheiten mittels der Rechte-/Linke-Hand-Suchtechnik zu nennen. Hier wird der betreffende Raum entlang der Umfassungswände im oder gegen den Uhrzeigersinn abgesucht, wobei zwischen den Truppmitgliedern ständiger Handkontakt (ähnlich einer Menschenkette) besteht und ein Truppmitglied mit der Hand an der Umfassungswand bleibt. Abbildung 6-9 zeigt anschaulich die Vorgehensweise bei diesem Verfahren. Zur Erweiterung des Suchradius verwendet der absuchende Feuerwehrmann dabei die Feuerwehraxt.

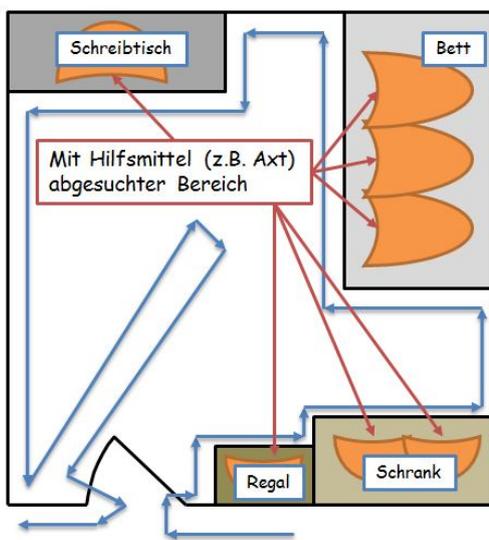


Abbildung 6-9: Rechte-Hand-Suche, entnommen aus (Dautermann, 2013)

Als wesentliches Hilfsmittel bei der Suche nach Personen steht der Feuerwehr seit geraumer Zeit die Verwendung von Wärmebildkameras zur Verfügung. Hierbei können Personen auch bei „Nullsicht“ im Raum anhand ihrer Infrarotstrahlung erkannt und geortet werden. Da der Einsatz dieser Kameras aber auch Grenzen durch Absorption und Reflexion (z.B. Reflektierung auf Glasoberflächen, o.ä.) hat, ist dies nur als zusätzliche digitale Hilfestellung zu werten und ersetzt nicht das analoge Absuchen durch den Feuerwehrmann im Raum.

Als zeitlicher Rahmen für diese Absuchtechnik wurde in den in (Dautermann, 2012) und (Dautermann, 2013) beschriebenen, eigenen Versuchsreihen ein Suchfortschritt von rund 20 Sekunden je m<sup>2</sup> Grundrissfläche des Raumes ermittelt.

Wurden die zu rettenden Personen gefunden, müssen diese vor weiteren Brand- bzw. Raucheinwirkungen geschützt und für den Rückweg ins Freie oder in einen anderen sicheren Bereich (benachbarter Brandabschnitt) vorbereitet werden. Der Schutz von Personen vor gefährlichem Brandrauch bzw. -gasen wird durch Überziehen von s.g. Fluchtauben vorgenommen. Abhängig von dem Zustand der angetroffenen Person(en) erfolgt der Rückweg durch Führen selbst gefähiger Personen entlang der Sicherung (Schlauch oder Leine) bis in den sicheren Bereich. Werden nicht gefähige oder bewusstlose Personen aufgefunden, müssen diese entweder durch einfaches Tragen (Rautek-Rettungsgriff), bei dem

ein Feuerwehrmann dem Verunglückten unter den Achseln durchgreift und den quer vor die Brust gelegten Unterarm umfasst oder durch technische Hilfsmittel wie Rettungstuch, Tragestuhl, Spineboard oder Schleifkorbtrage in gefahrlose Bereiche verbracht werden. Die für den Rückweg von gehfähigen und nicht gehfähigen Personen unterschiedlich groß ausfallenden Zeitspannen sind hohen Streuungen unterworfen und bisher nicht durch Zahlen belegbar.

Mit Verlassen des Gefahrenbereiches werden die geretteten Personen an den Rettungsdienst übergeben. Ist kein oder noch kein Rettungsdienst vor Ort, übernehmen die Einsatzkräfte der Feuerwehr die Erstversorgung der verletzten Personen.

Ist der ortsfeste Rettungsweg durch thermische (Brand-)Einwirkung oder durch sonstige Gefahrensituationen (z.B. Einsturzgefährdung) für den Innenangriff versperrt, muss ein Angriff über die Rettungsmittel der Feuerwehr von außen erfolgen.

Für den Außenangriff stehen der Feuerwehr grundsätzlich tragbare Leitern sowie Hubrettungsfahrzeuge mit weit ausladenden Drehleitern zur Verfügung. In sehr seltenen Fällen kommt noch der Einsatz von sogenannten Sprungpolstern als reine Selbstrettungsmöglichkeit unmittelbar gefährdeter Personen durch den Sprung aus einem Fenster vor. Auch wenn die Hilfslöschfahrzeuge (HLF) damit noch durchgehend ausgerüstet sind, ist diese Rettungsart kein Teil der standardisierten Vorgehensweise.

Da bei allen diesen Rettungsmitteln der Feuerwehr die Bewegungsfreiheit zur Rettung von Personen im Einsatz sehr eingeschränkt ist, können damit nur geringe Rettungsraten (Personen pro Minute) erreicht werden. Als zusätzliches Manko steht vor allem die Drehleiter während des Zeitraumes der Personenrettung nicht für einen Löschangriff von außen zur Verfügung. Während über ortsfeste Rettungswege zu rettende Personen praktisch in unbegrenzter Anzahl hintereinander geführt werden können, haben der Einsatz von tragbaren Leitern und Drehleitern ein sehr eingeschränktes Kontingent.

Auf Anfrage beim Institut der Feuerwehr NRW im Zuge der Masterarbeit (Dautermann, 2013) wurden für tragbare Leitern und Hubrettungsfahrzeuge (nur Drehleiter) folgende Rüstzeiten und Rettungsraten mitgeteilt:

*Tabelle 6-4: Angabe IdF NRW zu Rüst- und Rettungszeiten, aus (Dautermann, 2013)*

<b>Art des Rettungsmittels</b>	<b>Geschoss</b>	<b>Rüstzeit</b>	<b>Rettungsrate bei einer Person</b>	<b>Rettungsrate bei drei Personen</b>
Steckleiter	2. OG	1,5 min	3,0 min	6,0 min
Schiebleiter	3. OG	3,0 min	6,0 min	12,0 min
DLK	3. OG	3,0 min	4,5 min	7,5 min
DLK	5. OG	3,0 min	5,5 min	10,5 min

In einer Veröffentlichung der Deutschen Feuerwehrzeitung zum Thema des zweiten Rettungsweges werden nachfolgende Zeiten, ebenfalls geschossabhängig, genannt:

Tabelle 6-5: Rettungsraten für anleiterbare Stellen nach (Hageböling, et al., 1990)

Art der Feuerwehrleiter	Rettungshöhe	Spezifische Rettungsrate in Personen/Minute
Vierteilige Steckleiter (ungesichert)	2. Obergeschoss	1,40 Pers./min
Vierteilige Steckleiter (gesichert)	2. Obergeschoss	0,73 Pers./min
Dreiteilige Schiebeleiter (gesichert)	3. Obergeschoss	0,54 Pers./min

Tabelle 6-6: Rettungskennwerte taktischer Einheiten nach (Hageböling, et al., 1990)

Taktische Einheit	Spezifische Rettungsrate [Pers./min]	Rettungsdauer [min]		
		3 Pers.	12 Pers.	30 Pers.
Drehleiter mit Korb, max. Rettungshöhe 7. OG	0,38	10,9	34,6	82,0
Drehleiter ohne Korb, max. Rettungshöhe 7. OG	0,61	7,9	22,7	52,2
LF 8, max. Rettungshöhe 2. OG	0,73	7,1	19,4	44,1
Löschzug red. (1/12/13), max. Rettungshöhe 7. OG	0,93	6,2	15,9	35,3

Die Arbeitsgemeinschaft der Leiter der Berufsfeuerwehren (AGBF) in Deutschland haben die Einsatzgrenzen von Drehleitern und tragbaren Leitern in Abhängigkeit der zu rettenden Personenzahl wie folgt definiert:

Tabelle 6-7: Einsatzgrenzen tragbare Leitern und Hubrettungsfahrzeuge nach (AGBF, 2000)

Anzahl der Personen	Rettungsdauer je nach Höhenlage für Standard-Löschzug (16 Einsatzkräfte)
3	4 bis 6 Minuten
12	10 bis 14 Minuten
30	15 bis 30 Minuten

Der Arbeitskreis empfiehlt ab 30 Personen einen zweiten baulichen Rettungsweg auszubilden.

Tabelle 6-8: Zeiten für die Dauer bis zum Abschluss der Personenrettung nach (Köstler, et al., 2011)

	Alarmierungs- und Anfahrtszeit <sup>a</sup>	Entwicklungszeit bis zur Rettungsmeldung <sup>b</sup>	Gesamtzeit bis zur Rettungsmeldung
Mittelwert	09:30	08:28	17:58
Median	09:30	08:00	17:30
Modalwert	09:30	10:00	19:30
Anteil Zeiten bis zur Rettung > 17 Minuten			43,07 %

<sup>a</sup> Alarmierungs- und Anfahrtszeit nach AGBF-Schutzziel  
<sup>b</sup> Einwirkzeit; gerechnet ab dem Eintreffen des ersten wasserführenden Löschfahrzeugs

### 6.3.4 Der Löschangriff / Die Brandbekämpfung

Der reine Löschangriff spielt zeitlich, ausgehend von einem Brandausmaß, welches sich noch innerhalb der Grenzen einer Nutzungseinheit befindet und eine kritische Ausbreitungsfläche nicht überschritten hat, nur eine untergeordnete Rolle.

Steht die erforderliche Mannschaftsstärke für einen Löscheinsatz zur Verfügung und ist der Zugang zum Brandort problemfrei, d.h. ohne thermische oder Raucheinwirkung gewährleistet bzw. bereits vollzogen, liegt die Löschdauer selbst bei ausgedehnten Wohnungsbränden überwiegend in Bereichen unter vier bis fünf Minuten.

Die für den Löschangriff eines Wohnungsbrandes erforderliche Löschwassermenge kann durch Verwendung der „rate-of-flow“-Gleichung, auch bekannt als „Iowa-Formel“ (K. Royer: water for fire fighting. IOWA State University, 1959) ermittelt werden. Entsprechend den Annahmen zur O.R.B.I.T-Studie (Beyerle, et al., 1978) ergaben die Berechnungen für eine angenommene, im Vollbrand stehende Wohnungsgröße vom 180 m<sup>2</sup> einen Löschwasserbedarf von 360 Liter/Minute. Nach Grimwood (Ridder, 2013) werden auf Basis dieses Löschwasservolumens der Einsatz von 4 C-Rohren als notwendig erachtet, mittels derer die volle Löschwasserabgabe „etwa eine halbe Minute erbracht werden muss“, um diesen vordefinierten Brand unter Kontrolle bringen zu können.

Entsprechend den Ausführungen im aktuellen Ingenieurleitfaden (Hosser, 2013) ist für die Beantwortung der Frage, ob bei einer bestimmten Größenordnung eines Brandes überhaupt noch ein Einfluss der Feuerwehr auf die Wärmefreisetzungsraten angenommen werden kann, die Brandfläche zum Zeitpunkt des Beginns der Löscharbeiten in Abhängigkeit von der Brandentwicklung entscheidend. Nach Feuerwehrerfahrung gibt es Grenzwerte für Brandflächen, die von Einzelpersonen als auch von Feuerwehren noch gelöscht werden können. Als Orientierungshilfe werden im Leitfaden Werte basierend auf Expertenbefragungen angegeben. Tabelle 6-9 enthält die dem Leitfaden entnommenen Werte.

Tabelle 6-9: Orientierungswerte für die maximal beherrschbare Brandfläche, entnommen aus (Hosser, 2013)

Brandbekämpfungs- maßnahme durch	maximal beherrschbare Brandfläche $A_{F,max}$ [m <sup>2</sup> ]
Freiwillige Feuerwehr	100
Freiwillige Feuerwehr mit hauptamtlichen Kräften	200
Berufsfeuerwehr	300
Werkfeuerwehr	400
Sprinkleranlage	350

Der zeitliche Wert von vier bis sechs Minuten für den reinen Löschangriff von Vollbränden wurde ebenfalls in persönlichen Gesprächen mit gehobenen Dienstgraden einer großstädtischen Berufsfeuerwehr bestätigt.

### 6.3.5 Zusammenfassung der theoretisch ermittelten Zeitwerte für die Brandintervention

In den Kapiteln 6.3.2 bis 6.3.4 wurden Zeitintervalle für einzelne Maßnahmen der Rettungskräfte aus verschiedenen einschlägigen Literaturquellen zusammengetragen. Für die Erkundungs- und Entwicklungszeit nach Ankunft der Einsatzkräfte am Einsatzort konnte ein Mittelwert von rund fünf Minuten ermittelt werden. Die weiteren Maßnahmen im Innenangriff setzen sich aus dem Hinweg, geschätzt mit ca. vier Minuten für ohne Einschränkung nutzbare ortsfeste Rettungswege, einer Absuche der betroffenen Einheit nach Personen, abhängig von deren Größe mit ca. 20 sec je m<sup>2</sup> und schließlich des Zeitraumes für die Rettung der Person(en) zusammen. Für den Außenangriff bei nicht nutzbaren ortsfesten Rettungswegen wurden in mehreren Quellen Zeiten für die reine Rettung im Bereich von vier bis dreißig Minuten, abhängig von der Anzahl der zu rettenden Personen sowie des eingesetzten Rettungsmittels angegeben.

Zwar können diese Zahlen in definierten Einzelfällen grob zu einem vollständigen Einsatzablauf aufsummiert werden, für die Verwendung als Grundlage zu probabilistischen Betrachtungen fehlen jedoch Angaben zur Grundgesamtheit, d.h. die Arten der Verteilungen und Angaben zu deren Streuverhalten. Im folgenden Kapitel 6.4 erfolgt eine Ermittlung dieser noch fehlenden Informationen auf Basis der Auswertung einer ausreichenden Anzahl an realer Einsatzdaten zu „kritischen Wohnungsbränden“ in mehrgeschossigen Gebäuden.

## 6.4 Erhebungen aus realen Daten zu Feuerwehreinsätzen einer ausgewählten Großstadt

In der vom Verfasser betreuten Masterarbeit (Dautermann, 2013) wurden für insgesamt 303 Einsätze im Zeitraum vom 01.01.2010 bis 26.08.2012 Daten aus zugehörigen Berichten und Protokollen einer integrierten Leitstelle erfasst und für eine weitere Bearbeitung aufbereitet und statistisch ausgewertet. Als Kriterium für die Auswahl der Einsätze wurden „kritische Brandereignisse“, definiert als Brandeinsätze mit Personenrettung, zu Grunde gelegt. Die Datenpakete wurden jeweils im Zuge der Einsatzabwicklung von Brandfällen elektronisch durch die integrierte Leitstelle (ILS) generiert.

Bei der für die Untersuchungen ausgewählten Großstadt handelt es sich um eine der dicht besiedeltesten Städte Deutschlands mit rund 4.500 Einwohner je Quadratkilometer. Für die Sicherheit in der nichtpolizeilichen Gefahrenabwehr stehen in dieser Stadt eine Berufsfeuerwehr mit ständig besetzten Wachen und Freiwillige Feuerwehren in den Randbezirken zur Verfügung. Gemäß einer bestehenden Alarm- und Ausrückeordnung (AAO) werden in ihrem jeweiligen Zuständigkeitsbereich die Freiwilligen Feuerwehren zeitgleich mit den Kräften der Berufsfeuerwehr alarmiert. Hierdurch entsteht eine sehr kleinräumige Verteilung mit kurzen Anfahrtswegen für den Erstzugriff, welche sich positiv auf die Hilfsfrist auswirkt.

Aus der Gesamtheit der zur Verfügung stehenden Daten zu den Einsätzen im Betrachtungszeitraum wurden in der Masterarbeit zunächst nur Brandeinsätze herausgefiltert, bei denen per Notrufmeldung eine notwendige Personenrettung erwartet wurde. Entsprechend ergaben sich für den vorgenannten Zeitraum zur weiteren Erfassung 303 Datenpakete, bestehend aus je einem Protokoll und einem Bericht zum Einsatzverlauf. Im Schnitt war über die drei untersuchten Jahre hinweg ein Einsatzaufkommen von einem Brandeinsatz mit Personenrettung alle 3,6 Tage zu verzeichnen.

Nachfolgend aufgeführte Tabelle 6-10 zeigt die Anzahl und Verteilung der aus den Einsätzen ausgewählten Datenpakete für die weitere Bearbeitung. Im Zuge der Aufbereitung der Protokolle und Berichte wurden nachträglich 31 Fälle ausgesondert, welche das zu Beginn gestellte Auswahlkriterium zwar erfüllten, jedoch nachträglich wegen nicht passender Einsatzcharakteristik nicht weiter verwendet werden sollten.

Tabelle 6-10: Verteilung der ausgewählten Datenpakete zur weiteren Analyse

Zuordnung	Anzahl	1 kritisches Brandereignis alle X Tage
Nachträglich ausgefiltert	31	
2010	102	3,6
2011	98	3,7
2012	72	3,3
Gesamtanzahl	303	
Statistisch erfasst	272	3,6

In den Einsatzprotokollen werden in chronologischer Reihenfolge die Statusmeldungen aus der Kommunikation zwischen der Leitstelle und den ausgerückten Einsatzkräften aufgelistet. Die Datenerfassung erfolgt bereits während des Einsatzes in der Leitstelle. Im Anschluss an den Einsatz wird ein Einsatzbericht mit detaillierten Informationen zum Verlauf des Einsatzes durch den Einsatzleiter erstellt. Da im Einsatzbericht die Ablaufbeschreibung in Textform erstellt wird, war eine problemlose Datenübernahme wie beim Einsatzprotokoll nicht ohne weiteres möglich. Hier wurde in (Dautermann, 2013) eine detaillierte Einzelaufbereitung der enthaltenen Informationen händisch durchgeführt.

Aus den Einsatzprotokollen und -berichten standen folgende Informationen bzw. Daten je ausgewähltem Einsatz zur Verfügung:

- F-Nummer
- Datum und Uhrzeit des eingehenden Notrufs
- Einsatzadresse und Brandgeschoss
- Meldebild
- Ausrück-Zeit, Ankunft-Zeit erstes Fahrzeug, Ankunft-Zeit 1.HLF (Hilfsfrist)
- Anzahl der geretteten Personen, Rückmeldung Personen gerettet
- Anzahl der verstorbenen Personen
- Art der Rettung bzw. eingesetzte Rettungs- und Angriffsmittel
- Ausmaß des Brandes nach Eintreffen der Feuerwehr
- Zeit „Feuer aus!“

Diese bereits vorhandenen Informationen wurden im Zuge der vorliegenden Arbeit, soweit möglich, durch Internetrecherche in zugehörigen Presseartikeln (Pressestelle der BF, Tageszeitung, sonstige Medienberichte) um nachfolgend aufgezählte Punkte (wenn zum Brandfall angegeben) ergänzt:

- Alter Nutzer / Brandbetroffener
- Ausfall ortsfester Rettungswege (Treppenraum, Flure) wegen offen stehender oder durchgebrannter Verschlüsse bzw. Türen
- Anwesenheit Nutzer bei Brandausbruch
- Art der Branderkennung bzw. -detektion
- Eindringen des Brandes in brennbare Konstruktionsteile wie Wände oder Decken

Mittels einer Recherche zu zugehörigen Presseartikeln wurden im Nachgang zur Masterarbeit noch weitere, für die zu erstellende Statistik interessante Brandereignisse identifiziert, diese konnten aber wegen des fehlenden erneuten Zugriffs auf die Daten der ILS nicht mehr bzw. nur noch bedingt in die nachfolgenden Auswertungen mit aufgenommen werden.

In Summe wurden für die vorliegende Arbeit für den Zeitraum von 01.01.2010 bis 26.08.2013 (968 Tage) 442 Brände erfasst. Aus den Daten der Masterarbeit (Dautermann, 2013) wurden 272 Brände übernommen, 5 Brände wurden wegen abweichender Einsatzcharakteristik nachträglich herausgefiltert.

Tabelle 6-11: Übersicht der erfassten Brandereignisse

Brandereignis	Anzahl
von Masterarbeit erfasst mit Presseartikel nachträglich ergänzt	106
von Masterarbeit erfasst jedoch kein Presseartikel verfügbar	166
nachträglich wegen abweichender Einsatzcharakteristik herausgefiltert	- 5
nachträglich ergänzt, jedoch ohne detaillierten Infos aus Einsatzdaten	175
<b>Summe</b>	<b>442</b>

Tabelle 6-12 zeigt eine Übersicht zu den Meldebildern der jeweiligen Brandeinsätze. Zu beachten ist hierbei der nahezu gleich große Anteil an Küchen- und Zimmerbränden. Unterstellt man, dass die Brandentstehung größtenteils von der Anwesenheit der Nutzer abhängig ist, deutet das gleich große Verhältnis der beiden Kategorien Küchen- und Zimmerbrand auf eine wesentlich höhere Brandentstehungswahrscheinlichkeit im Bereich der Nutzung von Küchen bzw. beim Kochen hin. Diese Aussage basiert auf der einfachen Annahme, dass die Dauer des Aufenthalts von Personen / Nutzern in Wohnräumen (Wohn-, Arbeits- und Schlafzimmer) in Summe die des Aufenthalts in Küchen wesentlich übersteigt.

Tabelle 6-12: Übersicht der Meldebilder zu den Brandeinsätzen

Meldebild Brandeinsatz	Brandereignisse								Summe	
	angebr. Essen	Kleinfeuer	Zimmerbrand	ausged. Zimmerbrand	Wohnungsbrand	Wohnhausbrand	Dachstuhlbrand	Brand Außenbereich		sonstiges
Zimmerbrand		65	79	35	15	4			1	199
Küchenbrand	95	25	41	10						171
Kellerbrand		11	18	3					1	33
Treppenraumbrand		2	2						1	5
Balkonbrand		1	1					1		3
Rauchentwicklung im Gebäude		9	1							10
Nachsicht	2	4								6
Brandgeruch		3	1							4
Alarmstufen Feuerwehr			2			1		1		4
Feuer		2								2
Brennt Dachstuhl							4			4
Brennt Gartenhaus								1		1
<b>Summe</b>	<b>97</b>	<b>122</b>	<b>145</b>	<b>48</b>	<b>15</b>	<b>5</b>	<b>4</b>	<b>3</b>	<b>3</b>	<b>442</b>

zu wenig Informationen für detaillierte Analyse vorhanden

wurden nicht verwendet

Um für die statistischen Auswertungen der Einsatzdaten über die Presseinformationen hinausgehende Daten zum jeweiligen Schadobjekt sowie einen Bezug zur Grundgesamtheit des Gebäudebestandes zu bekommen, wurden der Analyse Informationen aus Datenpaketen einer digitalen Gebäudedatei des Stadtplanung-Referates der Großstadt beigelegt und miteinander verknüpft. Die digitale Gebäudedatei umfasst zu den gelisteten, städtischen Gebäuden im Wesentlichen Angaben zu den Gauß-Krüger-Koordinaten, der Adresse, Zeitpunkt der Baufertigstellung, der Bruttogeschossfläche (BGF), der Nutzung nach BGF aufgeschlüsselt, der Anzahl der Wohneinheiten sowie der Anzahl der Stockwerke. Die Gebäudedatei wurde dem Verfasser durch das Referat zur Verwendung in dieser Arbeit am 06.05.2013 zur Verfügung gestellt.

Die digitale Gebäudedatei enthält je Bauwerk Daten zu:

- Gauß-Krüger Koordinaten
- Adresse
- Baufertigstellung, Erstellungsjahr
- Summe Bruttogeschossfläche (BGF)
- Nutzungen nach BGF aufgeschlüsselt:
  - BGF insgesamt, ohne Tiefgaragen
  - insgesamt ohne Garagen
  - Garagen
  - Wohnen
  - Gemeinbedarf
  - öffentliche Verwaltung
  - private Verwaltung
  - freie Berufe, Einzelhandel, Großhandel, Verkaufslager
  - Gastgewerbe
  - Handwerk, Gewerbe und Industrie
  - sonstige Nutzungen
- Anzahl der Wohneinheiten
- Anzahl der Stockwerke

Aus den beiden letzten Informationen, Anzahl der Wohneinheiten und Stockwerke, wurde im Rückschluss eine Klassifizierung der Gebäude in die jeweilige Gebäudeklasse (1 bis 5 und HH) nach Baurecht vorgenommen.

Nach dem Stand der Gebäudedatei hatte die Stadt im Jahr 2007 einen Bestand von rund 178.500 Gebäuden mit in Summe 771.000 Wohneinheiten. Zwar ist die die Gebäudedatei mit dem Stand 2007 nicht ganz aktuell, es wurde jedoch ein für die geplanten Auswertungen ausreichender Informationsstand festgestellt. Sämtliche gesammelten Brandereignisse konnten per Adresse bereits in der Datei vorhandenen Gebäuden zugewiesen werden.

Betrachtet man die Gebäude nach heutiger baurechtlicher Klassifizierung in Gebäudeklassen 1 bis 5, also alle Gebäude mit maximal acht Geschossen, so bilden den größten Anteil am gesamten Gebäudebestand mit 45% jene Gebäude, die in den Nachkriegsjahren bis 1970 erbaut wurden. Entsprechend des

Datensatzes haben nur rund 20.700 Gebäude die zerstörenden Einwirkungen der Kriegsangriffe auf die Stadt überstanden. Der Anteil der in den darauffolgenden 70', 80' und 90'er Jahren errichteten Gebäuden kann mit 10%, 11% und 7% beziffert werden. Die zuletzt ab dem Jahr 2001 bis 2007 aufgeführten Gebäude haben einen Anteil von 5%. Für rund 15.400 Gebäude, also rund 9% konnten der Gebäudedatei keine ausreichenden Informationen für eine Einteilung bzw. Bewertung entsprechend der vorgenannten Kriterien entnommen werden.

Für die Gebäude ohne Information zum Erstellungsjahr zeigte eine detailliertere Analyse, dass ca. 78% dieser Gebäude der Gebäudeklasse 1 bzw. 2 und 5%, 9% bzw. 4% den Gebäudeklassen 3, 4 bzw. 5 zuzuordnen sind. Für die weitere Betrachtung der Mehrgeschosser (Gebäudeklasse 3 bis 5) ist diese fehlende Information dementsprechend nur von untergeordneter Bedeutung.

Das nachfolgend dargestellte Diagramm in Abbildung 6-10 zeigt den grafisch entsprechend den Informationen aus der Gebäudedatei 2007 aufbereiteten Bestand an Gebäuden der Gebäudeklasse 1 bis 5, inklusive aller darin enthaltenen Sonderbauten und den dazu über den Betrachtungszeitraum zugewiesenen Bränden mit Personenrettung, welcher zur weiteren Bearbeitung herangezogen wurde. Darin deutlich erkennbar ist zunächst der hohe Bestand an nachkriegszeitlich erstellten Gebäuden und des daraus resultierenden, zahlenmäßig größten Brandaufkommens in diesen Gebäuden.

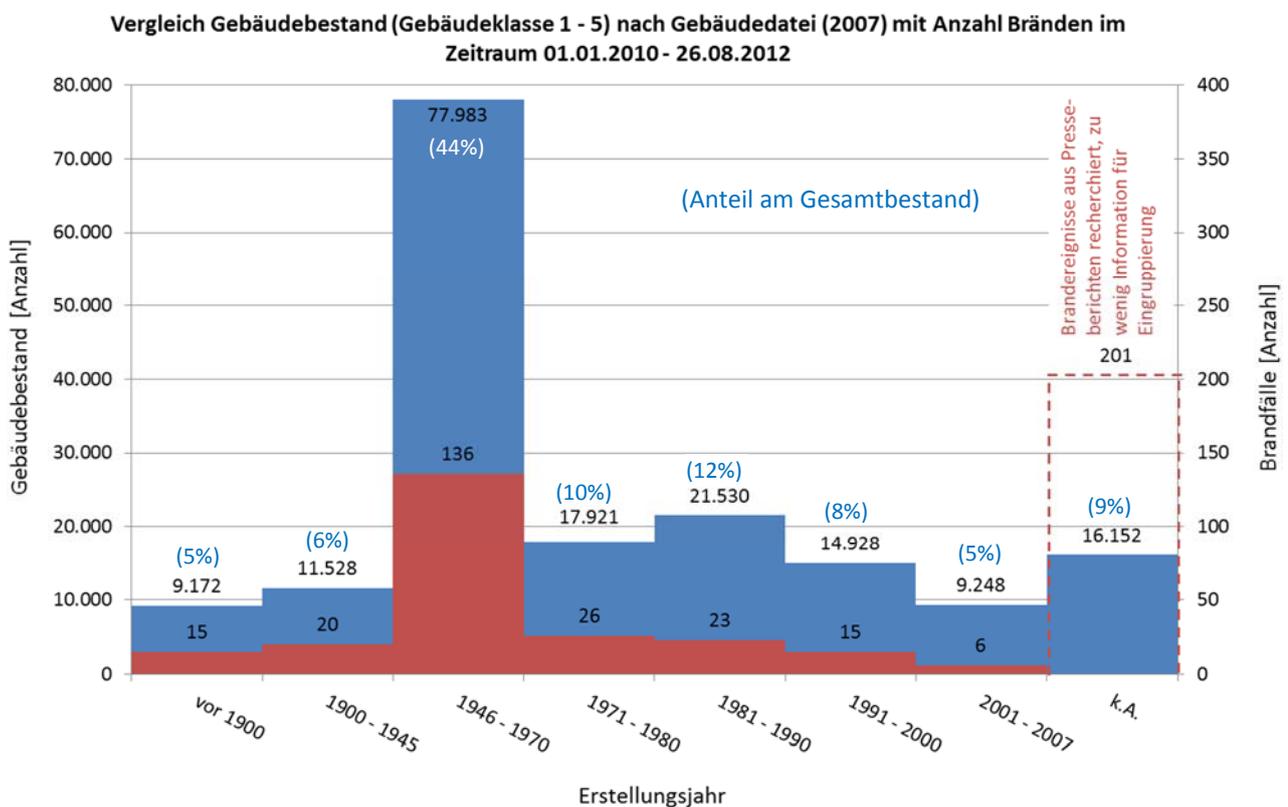


Abbildung 6-10: Darstellung des Gebäudebestandes zum Stand Gebäudedatei 2007 mit Überlagerung Brandereignisse

Neben der zeitlichen Entwicklung des Gebäudebestandes wurde die Entwicklung der Größen der in den Wohngebäuden vorhandenen Nutzungseinheiten analysiert. Abbildung 6-11 zeigt über Trendlinien dargestellt die Entwicklung der Größen in fünf Gruppen zusammengefasst. Es ist zu erkennen, dass sowohl die kleinen Nutzungseinheiten bis 60 m<sup>2</sup> als auch die großen Nutzungseinheiten mit 120 m<sup>2</sup> und mehr über die vergangenen zwanzig Jahre einen absteigenden Trend aufweisen. Die beiden Gruppen mit Nutzungseinheiten mit durchschnittlichen Größen von 60 bis 90 m<sup>2</sup> und von 90 bis 120 m<sup>2</sup> weisen eine ansteigende Tendenz auf, wobei erstere Gruppe den höchsten Anstieg verzeichnet.

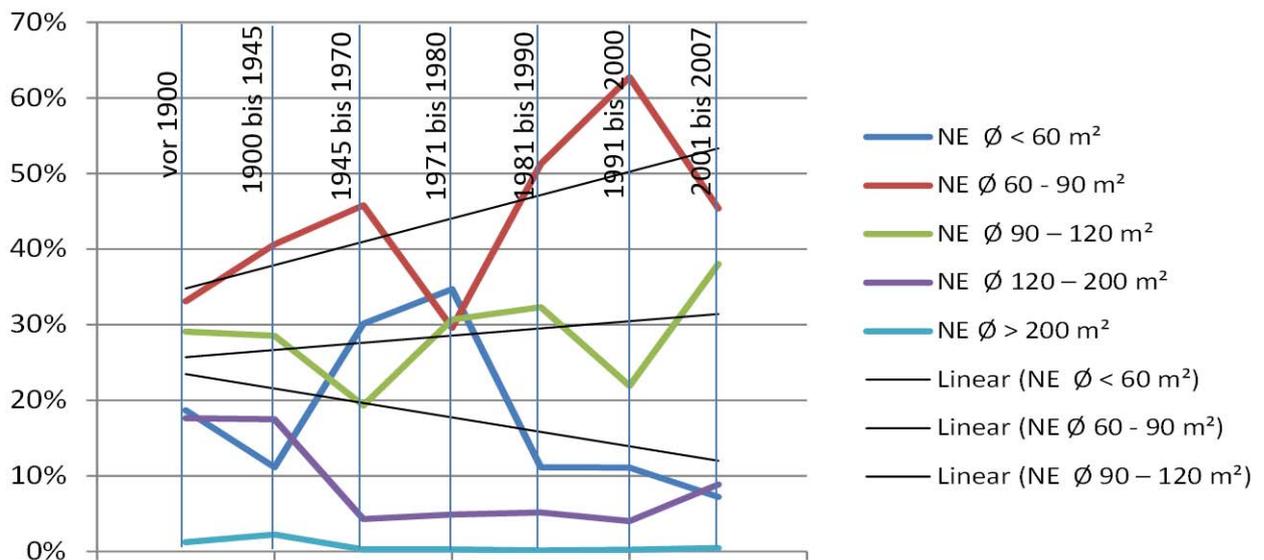


Abbildung 6-11: Entwicklung von Nutzungseinheiten in den Gebäudeklassen 3, 4 und 5

Da seit Beginn der Festschreibung von bauordnungsrechtlichen Regelungen fortlaufend eine stetige Weiterentwicklung der technischen Standards sowohl im baulichen als auch im anlagentechnischen Bereich stattgefunden hat, kann allgemein unterstellt werden, dass sich daraus grundsätzlich auch eine Reduzierung der Brandentstehungshäufigkeiten, vornehmlich auf Basis technischen Versagens, ergibt. Das Gebäudealter und der damit verbundene Zeitpunkt der baurechtlichen Genehmigung lassen in der Regel einen direkten Schluss auf den zugehörigen Stand der angewandten Bauvorschriften zu. Die jeweiligen Gebäude genießen dann solange einen Bestandsschutz gegenüber zwingender Modernisierungsmaßnahmen auf aktuellen baurechtlichen Stand, bis entweder eine genehmigungspflichtige Abänderung (Umbau oder Nutzungsänderung) am Gebäude vorgenommen wird oder im Zuge einer Objektbeschau (Feuerbeschau im gemeindlichen Verantwortungsbereich oder auf Veranlassung der unteren Bauaufsichtsbehörde) eine unmittelbare Gefahr für Leib und Leben festgestellt wurde. In letzterem Fall kommt es jedoch meist nur zur Beseitigung von Mängeln, welche in direktem Zusammenhang mit der festgestellten Problemstellung stehen.

Abbildung 6-12 zeigt eine Auswertung zur Verteilung der Anzahl aufgetretener Brände mit Bezug auf die Gesamtheit der vorhandenen Gebäude aus den jeweiligen Erstellungszeiträumen. Anhand der dargestellten linearen Trendlinie lässt sich über das vorliegende Gebäudealter ein klarer Rückgang der

Brandentstehungshäufigkeit zeigen. Durch die heute immer schneller fortschreitende Entwicklung in der Anlagen- bzw. Elektrotechnik ist anzunehmen, dass der Verlauf künftig nicht linear sondern unterproportional also geringfügig steiler als linear abfallen wird.

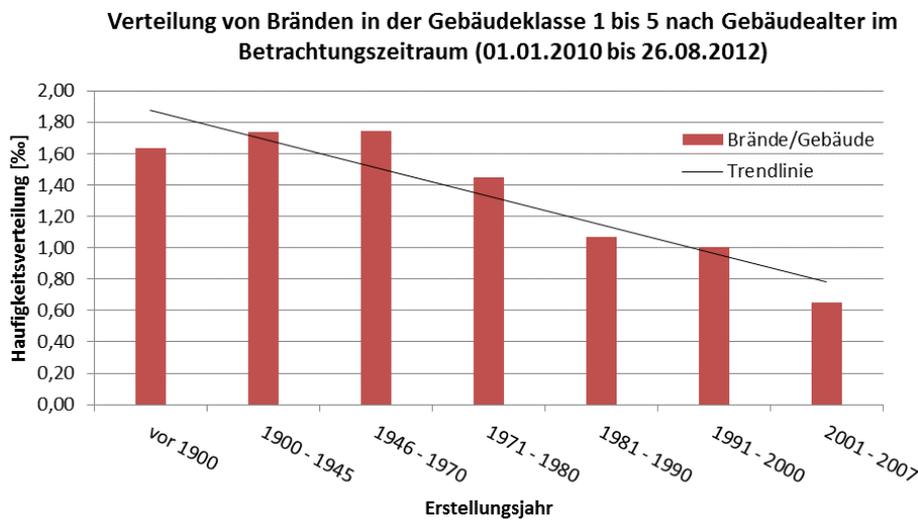


Abbildung 6-12: Darstellung der Häufigkeitsverteilung von Bränden über die Bauepochen

Eine Berücksichtigung von Modernisierungsmaßnahmen konnte auf Grund der dazu für die jeweiligen Gebäude explizit fehlenden Informationen nicht einfließen. Zu einer wesentlichen Beeinflussung des dargestellten Trends würden jedoch auch nur solche Maßnahmen beitragen, bei denen eine Gebäudegrundsanierung bzw. –modernisierung, inklusive aller technischen Einrichtungen (vornehmlich der elektrischen Installationen bzw. der Reduzierung der offenen Feuerstellen wie Kohleheizungen) durchgeführt wurde. Kleinere Umbaumaßnahmen, wie z.B. die Umnutzung einzelner Bereiche oder Einheiten eines Gebäudes führen aus Sicht des Verfassers in der Gebäudegesamtheit noch zu keiner wesentlichen Änderung und können dementsprechend ohnehin vernachlässigt werden.

Für die weitere Betrachtung und zielgerichtete Auswertung der Einsatzdaten wurden die erfassten Brände wie schon in (Dautermann, 2013) nach ihrem Ausmaß bei Eintreffen der Feuerwehr in fünf Kategorien eingeteilt. Die Kategorien werden nachfolgend anhand ihrer Charakteristik dargestellt und definiert:

- **Angebranntes Essen:** mittlere bis starke Rauchentwicklung durch angebranntes Essen. Es sind in der Nutzungseinheit jedoch keine weiteren Gegenstände in Brand geraten.
- **Kleinfeuer:** kleinere Gegenstände in Brand. Ein Übergreifen des Brandes auf weite Teile des Zimmers hat noch nicht stattgefunden. Der Lösch-einsatz ist mit Feuerlöscher oder einem Löschrohr erfolgreich.

- **Zimmerbrand:** Zimmer steht ganz oder in großen Teilen in Brand, ein Flashover ist im Raum noch nicht eingetreten.
- **Ausgedehnter Zimmerbrand:** Zimmer steht im Vollbrand (Post Flashover). Der Brand droht auf benachbarte Räume überzugreifen oder hat sich bereits begrenzt ausgebreitet.
- **Wohnungsbrand:** Mehrere Zimmer einer Nutzungseinheit (NE überwiegend in Brand) bzw. die komplette Nutzungseinheit steht im Vollbrand (Post Flashover)

Für die statistische Erfassung von Bränden existieren normative Vorgaben in (DIN 14010:2005-10). Dort wird der Brandumfang auf Basis der eingesetzten Löschgeräte beurteilt. Die dortige Einteilung ist wie folgt definiert:

- **Kleinbrand a:** Einsetzen von nicht mehr als einem kleinem Löschgerät
- **Kleinbrand b:** Einsetzen von nicht mehr als einem C-Rohr
- **Mittelbrand:** Gleichzeitiges Einsetzen von zwei bis drei C-Rohren
- **Großbrand:** Gleichzeitiges Einsetzen von mehr als drei C-Rohren

Bei der Angabe des Brandumfanges ist folgender Größenvergleich zu beachten:

- **kl. Löschgerät entspricht** Feuerpatsche, Eimer mit Sand, Kübel- oder Einstellspritze, Feuerlöscher, 1 DM-Strahlrohr, 1 Sprinkler
- **C-Rohr entspricht** 1 Hohlstrahlrohr mit Abgabe von bis zu 200 l/min, 1 Fog Nail, 1 Schwertschaumstrahlrohr S 2, 1 Mittelschaumstrahlrohr M 2, 1 Leichtschaumgenerator bis 200 l/min, 1 Pulverlöschgerät mit einem Löschmittelvorrat bis zu 250 kg, 1 Kohlenstoffdioxidgerät mit einem Löschmittelvorrat bis zu 200 kg, 2 bis 3 Sprinklern
- **2 C-Rohre entsprechen** 1 BM-Strahlrohr, 1 Hohlstrahlrohr mit Abgabe von mehr als 200 l/min, 1 C-Rohr mit Abgabe von CAFS-Schaum, 1 Schwertschaumstrahlrohr S 4, 1 Mittelschaumstrahlrohr M 4, 1 Leichtschaumgenerator mit mehr als 200 l/min, 1 Löschgerät mit 250 kg bis 750 kg Löschmittelvorrat
- **4 C-Rohre entsprechen** 1 Schwertschaumstrahlrohr S 8, 1 Pulverlöschgerät mit über 1500 kg Löschmittelvorrat

Beide Einteilungen sind deshalb miteinander vergleichbar. Eine entsprechende Gegenüberstellung ist in Tabelle 6-13 dargestellt.

Tabelle 6-13: Vergleich der Einteilung zum Brandausmaß nach DIN 14010 und eigener Einteilung

Einteilung nach DIN 14010	Eigene Einteilung für die statistischen Auswertungen der Einsatzdaten
Kleinbrand a	angebranntes Essen und Kleinf Feuer
Kleinbrand b	Zimmerbrand
Mittelbrand	ausgedehnter Zimmerbrand
Großbrand	Wohnungsbrand

Die weiteren aus den Einsatzdaten erfassten Brandereignisse mit größerem Brandausmaß wie ein Wohnhausbrand, ein Dachstuhlbrand, zwei Brände im Außenbereich als auch drei sonstige, nicht näher definierte Brände wurden in den nachfolgenden Ergebnissen der Auswertung mit Ausnahme zur Ermittlung der in Kapitel 6.2 bestimmten Hilfsfrist nicht verwendet. Der Grund dafür liegt in der sehr geringen Anzahl dieser Ereignisse sowie der eigentlichen Zielstellung dieser Arbeit, die Einsatzzeiten in mehrgeschossigen Gebäuden zu beurteilen, wodurch z.B. der Wohnhausbrand auf Grund seiner abweichenden Charakteristik unbeachtet bleiben kann.

Nach Einordnung der erfassten Daten aus den Einsatzprotokollen in die vorgenannten Kategorien ergibt sich entsprechend der Auflistung in Tabelle 6-14 eine Menge der für die weitere Betrachtung anzusetzenden Einsätze von  $288 + 8 = 296$  Brandfällen.

Tabelle 6-14: Aufteilung der erfassten Brände nach Ausmaß des Brandes bei Eintreffen der Feuerwehr

Brandart bzw. -ausmaß	Anzahl	davon in		
		GKL 1 bis 5	HH	Rest *)
angebranntes Essen	97	86	7	4
Kleinf Feuer bis Wohnungsbrand	330	202	17	111
Wohnhausbrand	5	1	0	4
Dachstuhlbrand	1	3	0	1
Brand im Außenbereich	3	1	1	1
Sonstige (nicht näher definiert)	3	3	0	0
Gesamtanzahl	442	296	25	121

\*) wegen fehlender Daten aus ILS nicht zu den Gebäudeklassen zuweisbarer Anteil

Um einen detaillierten Eindruck über die Häufigkeit und Verteilung der entstandenen Brände zur jeweiligen Kategorie über die Gebäudeklassen hinweg zu bekommen, wurden diese betreffend ihrer absoluten und relativen Häufigkeit ausgewertet und in den beiden nachfolgenden Diagrammen Abbildung 6-13 und Abbildung 6-14 grafisch dargestellt.

Wie aus der Darstellung in Abbildung 6-13 ersichtlich, wurde in den Gebäuden mit mehreren Nutzungseinheiten, also Gebäuden der Gebäudeklassen 3 bis 5, das Brandausmaß „angebranntes Essen“ am häufigsten bei Eintreffen der Feuerwehr vorgefunden. Dies verdeutlichen auch die über die Gebäudeklassen kumuliert dargestellten Verteilungen in Abbildung 6-14. In beiden Abbildungen ist gut der erfreulicherweise geringe Anteil an Bränden mit größerem Ausmaß bzw. Bränden, bei denen ein Flash-Over bereits stattgefunden hat, zu erkennen.

Über die Gesamtheit aller fünf Gebäudeklassen gerechnet ergibt sich der Anteil an Bränden mit geringem Ausmaß (aus Eigendefinition: angebranntes Essen und Kleinbrand) zu 68%. Wird der Auswertungsbereich auf das Ausmaß des einfachen Zimmerbrandes erweitert, kann bereits eine Häufigkeit von 91% aller Brände abgedeckt werden. Nur in den verbleibenden ca. 9% der erfassten Einsätze ergab sich bei Ankunft ein großes Brandausmaß in Form eines ausgedehnten Zimmer- bzw. eines Wohnungsbrandes (Vollbrand nach Flashover).

Abbildung 6-14 zeigt grafisch die kumulierten Verteilungen der angetroffenen Brandausmaße für die beiden in Gruppen zusammengefassten Gebäudeklassen 3 bis 5 und 4 bis 5.

### Häufigkeitsverhältnis der Brandereignisse nach angetroffenem Ausmaß

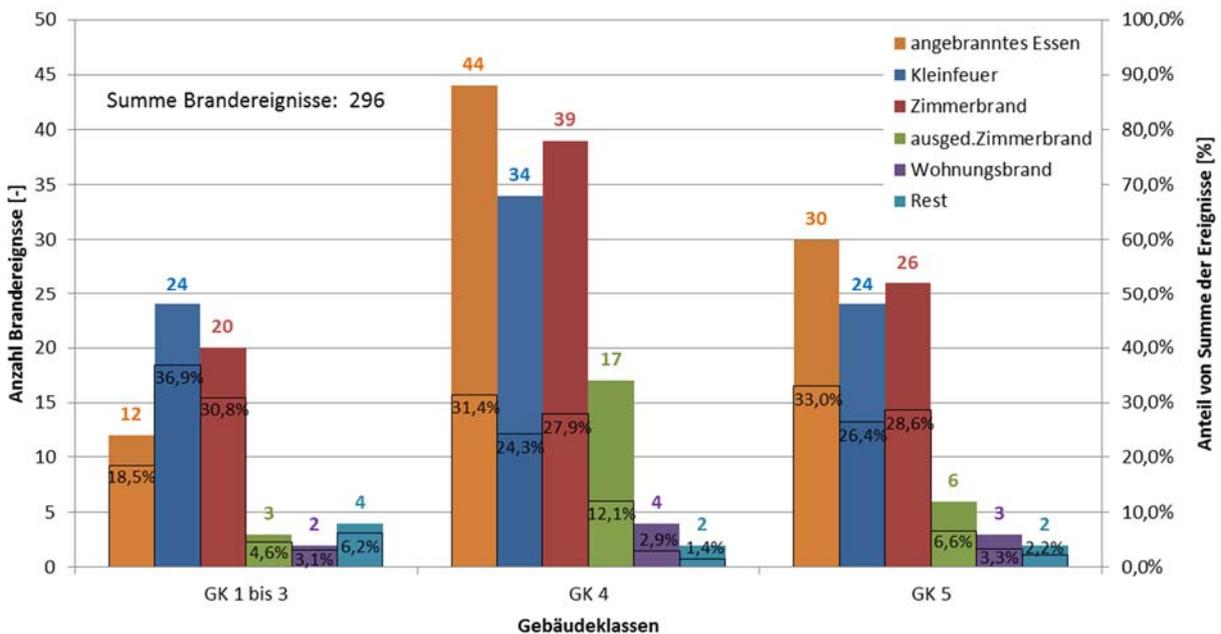


Abbildung 6-13: Brandereignisse nach angetroffenem Ausmaß, bezogen auf die Gebäudeklassen

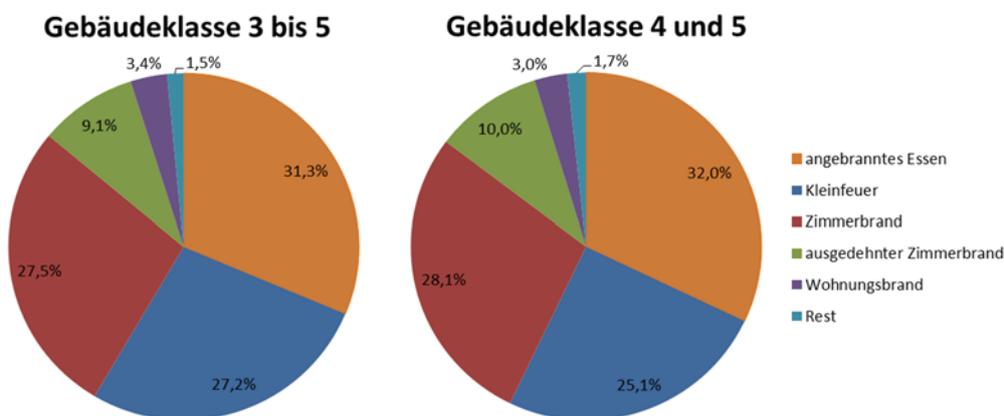


Abbildung 6-14: über die Gebäudeklassen kumulierte Darstellung von Verteilungen der angetroffenen Brandausmaße

Bei ausschließlicher Betrachtung der höheren Gebäudeklassen 3 bis 5 (bzw. 4 und 5) ergibt sich für die geringen Brandausmaße ein Anteil von 58,5% (57,1%) und mit der Erweiterung auf den einfachen Zimmerbrand ein Anteil von 86% (85,2%). Für die großen Einsätze zu ausgedehnten Zimmer- bzw. Wohnungsbränden ergibt sich ein Anteil von rund 13% (14%).

Auf Basis der Erkenntnis zur Verteilung der angetroffenen Brandausmaße über die Gebäudeklassen, wurden in einem nächsten Schritt die Einsätze entsprechend ihres tageszeitlichen Einganges des Notrufes ausgewertet. Da für die Auswertung bezüglich der tageszeitlichen Verteilung der Gebäudeklasse keine Bedeutung zugewiesen wird, konnte die Datenmenge zusätzlich auf die Brandfälle aus dem Bereich der Hochhäuser sowie den wegen fehlender Detailinformationen als „Rest“ ausgederter Gebäude erweitert werden. Insgesamt standen für die Auswertung damit 427 Einsätze zur Verfügung. Die Datenmenge ergibt sich aus 288 Brandfällen in den Gebäudeklassen 1 bis 5, 24 Brandfällen in Hochhäusern und 115 Fälle für die keine Gebäudeklassen zuzuordnen waren.

Abbildung 6-15 zeigt die grafische Verteilung der Notrufeingänge zu Brandereignissen mit Personenrettung. Dabei wurde auf der vertikalen Primärachse (linke Seite) die absolute Anzahl an Ereignissen aufgeführt, die Sekundärachse zeigt den jeweiligen tageszeitlichen Anteil bezogen auf die Gesamtanzahl der Brände in der jeweiligen Kategorie.

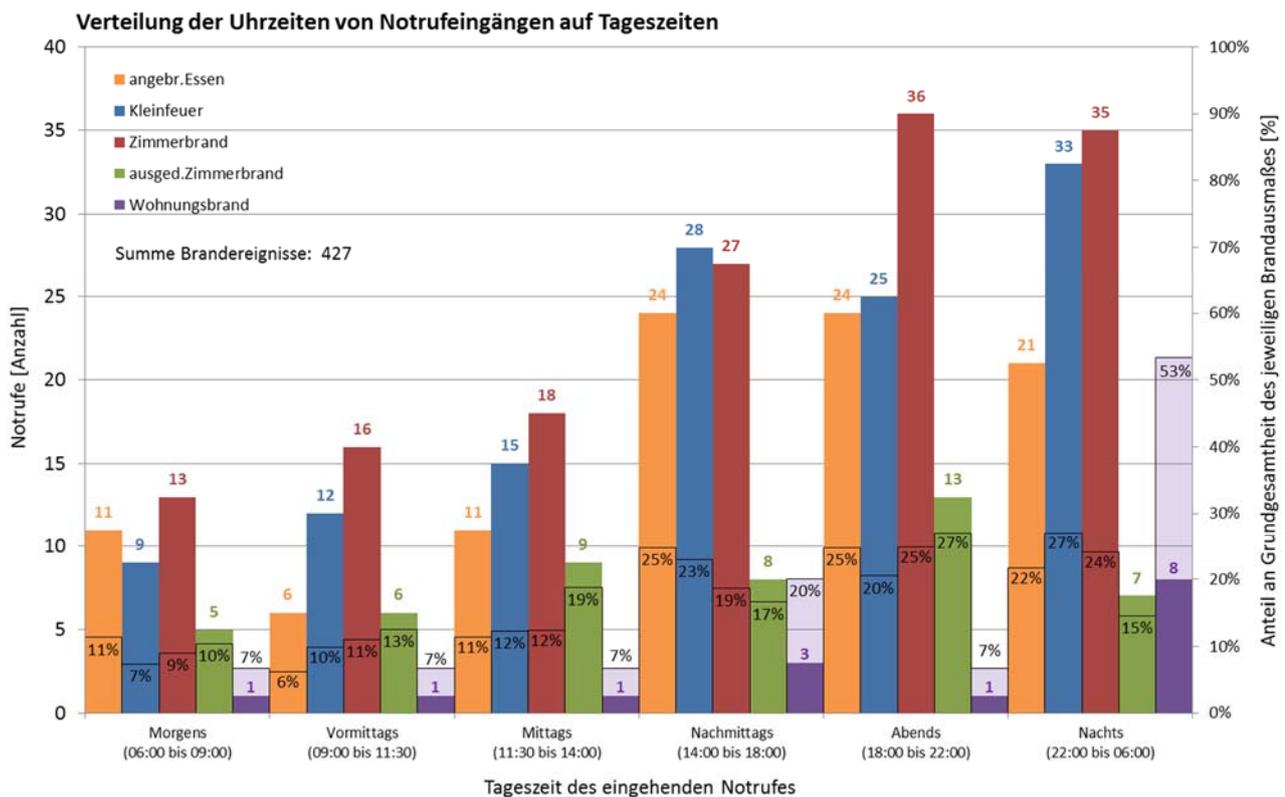


Abbildung 6-15: Darstellung der tageszeitlichen Verteilung von Notrufeingängen zu kritischen Brandereignissen

Allgemein kann der Grafik, mit in Summe 56% aller erfassten Brandereignisse, eine ausgeprägte Tendenz hin zu den Abend- und Nachtstunden entnommen werden. Auf die Tageszeiten „Morgens“, „Mittags“ und „Nachmittags“ fallen im Gegensatz dazu jeweils nur 11%, 16% und 17%. Dies unterstreicht die allgemeine Annahme, dass die Brandentstehung zum größten Teil nutzerspezifisch beeinflusst sein muss und führt

damit verbunden aber auch zur Erkenntnis, dass bei den häufigsten Bränden durch die Anwesenheit der Nutzer und bei unmittelbarer Detektion eine frühestmögliche Primärbrandbekämpfung und/oder Notrufmeldung erfolgen kann. In der Folge kann bei geeignetem Einsatz anlagentechnischer Maßnahmen (Rauchwarnmelder, Hausalarm) die Häufigkeit der erfolgreichen Primärbekämpfung durch den Nutzer wesentlich erhöht bzw. eine frühzeitige Brandbekämpfung durch die Feuerwehr in der Brandentwicklungsphase erreicht werden.

Deutlich erkennbar ist auch der hohe Anteil an Wohnungsbränden während der Nachtzeit. Dabei ist für viele Fälle zu vermuten, dass die ursächliche Brandentstehung bereits in die Abendstunden zurückreicht und wegen fehlender Detektions- bzw. Rauch- und Brandmeldeeinrichtungen eine ungehinderte Ausbreitung bis zum Wohnungsbrand stattfinden konnte. In der vorliegenden Auswertung liegt der mit Abstand höchste Anteil der Wohnungsbrände während der Nachtstunden bei 54%. Diese Annahme unterstreicht auch die parallele Auswertung hinsichtlich Ereignisse mit Brandtoten, bei denen jeweils der Notruf in den frühen Morgenstunden (03:27 Uhr und 05:28 Uhr) eingegangen war und sich bei Eintreffen der Einsatzkräfte das Ausmaß des Brandes bereits auf das größte kategorisierte Niveau des Wohnungsbrandes entwickelt hatte.

Vergleicht man weiter die Anzahl der jeweils in den Einsätzen geretteten Personen (vgl. Abbildung 6-16), kann die im vorhergehenden Absatz aufgestellte Theorie ebenfalls bestätigt werden. Von den 15 erfassten Brandfällen, bei denen eine Rettung von mehr als vier Personen während des Einsatzes erfolgte, wurde in sechs Fällen (40%) ein Wohnungsbrand, in vier Fällen (27%) ein ausgedehnter Zimmerbrand und lediglich in fünf Fällen (33%) ein Zimmerbrand angetroffen. Des Weiteren erfolgte in rund 66% der Fälle der Eingang des Notrufes in den Abend- und Nachtstunden bzw. in über 50% der Fälle nach Mitternacht.

Eine Analyse der Einsatzfälle mit hoher Anzahl an zu rettenden Personen zeigt zudem, dass unter den ersten sechs ranghöchsten Ereignissen sich vier Brände in Kellergeschossen befinden. Eine Erklärung hierfür ist sicherlich in der erfahrungsgemäß häufig durch Aushängen des Türschließers oder Aufkeilen der Tür außer Funktion gesetzte Verbindungstür zwischen Kellerräumen und Treppenraum zu suchen. Durch die fehlende Funktionalität ist in diesen Fällen kein wirksamer und baulich erforderlicher Raumabschluss vorhanden, weshalb innerhalb eines sehr kurzen Zeitraumes der angeschlossene notwendige Treppenraum als erster Rettungsweg und Mittel zur Selbstrettung der Bewohner verraucht ist und damit nicht mehr zur Verfügung steht. Eine genaue Belegung dieser Theorie zu den letztgenannten Fällen konnte aber auf Grund der dazu fehlenden Informationen nicht weiter vorgenommen werden. Hierzu müssten die Ergebnisse der kriminaltechnischen Untersuchungen im Anschluss an solche Brandereignisse zur Auswertung hinzugezogen werden.

Abbildung 6-16 zeigt aber auch, wie bedeutend die Aufrechterhaltung des ersten Rettungsweges für den größtmöglichen Einsatzerfolg der Feuerwehr ist. Entsprechend dem geltenden Grundsatz „Personenrettung vor Löschmaßnahmen“ wächst mit jeder zusätzlich notwendigen Rettungsmaßnahme die zeitliche Bindung von Einsatzkräften, welche nicht für den unmittelbaren Löscheinsatz zur Verfügung stehen. Die Ausweitung des zunächst bei Eintreffen der Einsatzkräfte am Brandort angetroffenen Brandausmaßes und des daraus folgenden, immer größer werdenden, zeitlichen, materiellen und personellen Aufwandes für die erfolgreiche Löschmaßnahme ist die Folge.

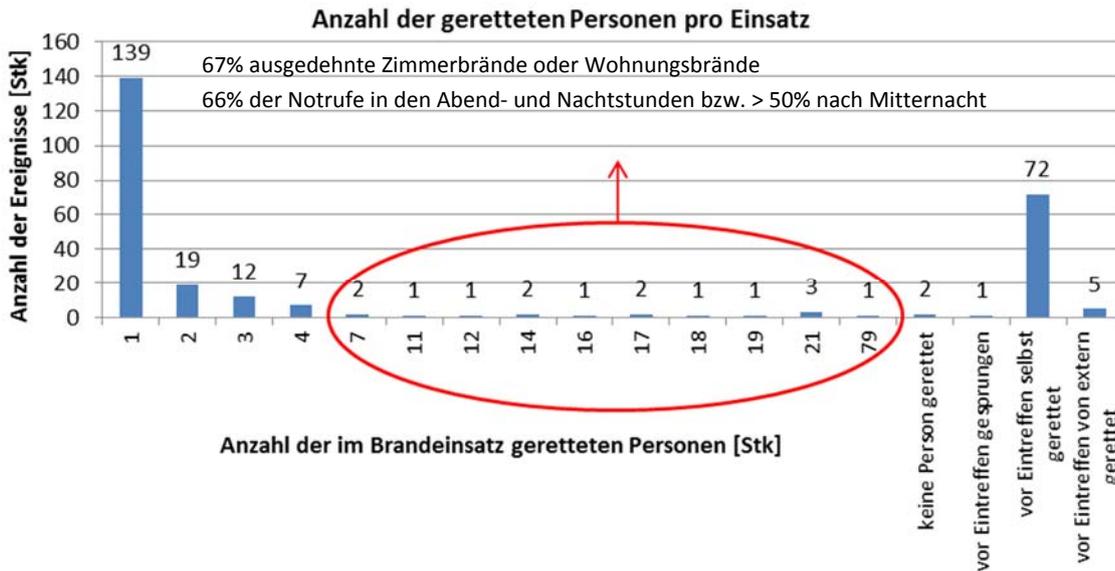


Abbildung 6-16: Darstellung der Verteilung von geretteten Personenanzahlen je Brandeinsatz

Für die folgende Betrachtung der Rettungs- und Angriffswege wurden aus den 263 zur Verfügung stehenden Datensätzen 223 ausgewählt, die der Gebäudeklasse 1 bis 5 sowie einem Brandausmaß bis maximal dem Wohnungsbrand zu zuordnen waren. 20 Fälle zu Bränden in Hochhäusern und 7 Fälle in Sonderbauten (Wohnheim, Pflegeeinrichtungen, Krankenhaus und Diskothek) sowie die restlichen 13 Fälle, die keiner Kategorie zugeordnet werden konnten, blieben für die nachfolgenden statistischen Auswertungen unberücksichtigt. Tabelle 6-15 zeigt die detaillierte Aufstellung zu den ausgewählten Fällen.

Eine Auswertung der Rettungs- bzw. Angriffswege in Verbindung mit dem bei Eintreffen der Einsatzkräfte vorherrschenden Brandausmaß zeigt, dass in 91,3% der Brandfälle ausschließlich der bauliche (erste) Rettungsweg zur Selbstrettung der Personen, der Evakuierung in Gefahr befindlicher Personen durch Rettungskräfte als auch zur Durchführung der abschließenden Löschmaßnahme ausreichend war. In 4,35% waren eine Kombination aus baulichem Rettungsweg und Rettungsgeräten der Feuerwehr notwendig und in ebenso 4,35% der Fälle mussten die Rettung und der Angriff ausschließlich über Rettungsgeräte der Feuerwehr erfolgen.

Tabelle 6-15: Darstellung der herangezogenen Einsatzfälle für die Bewertung der Rettungsmittel

	angebranntes Essen	Kleinfeuer	Zimmerbrand	ausgedehnter Zimmerbrand	Wohnungsbrand	Wohnhausbrand	Dachstuhlbrand	Brand im Außenbereich	sonstiges
<b>GKL</b>									
1 / 2	3	9	5			1	1	1	1
3	9	11	5	1	2				
4	44	24	25	8	4				1
5	29	22	17	3	2				1
HH	7	5	3	2	3			1	
Sonderbau	1	4	1	1					
<b>Summe</b>	93	75	56	15	11	1	1	2	3
<b>Rest</b>	4	2	4	3				2	

Betrachtet man rein die Brandfälle, bei denen der Einsatz unter Zuhilfenahme von Rettungsgeräten der Feuerwehr erfolgte, so kann mit zwei Ausnahmen (angebranntes Essen, 1x tragb. Leiter und 1x Drehleiter) festgestellt werden, dass diese grundsätzlich erst ab dem Brandausmaß eines Zimmerbrandes notwendig wurden und in Richtung des Wohnungsbrandes eine klar steigende Tendenz aufweisen. Abbildung 6-17 zeigt grafisch mit Trendlinien dargestellt die vorgenannten Tendenzen.

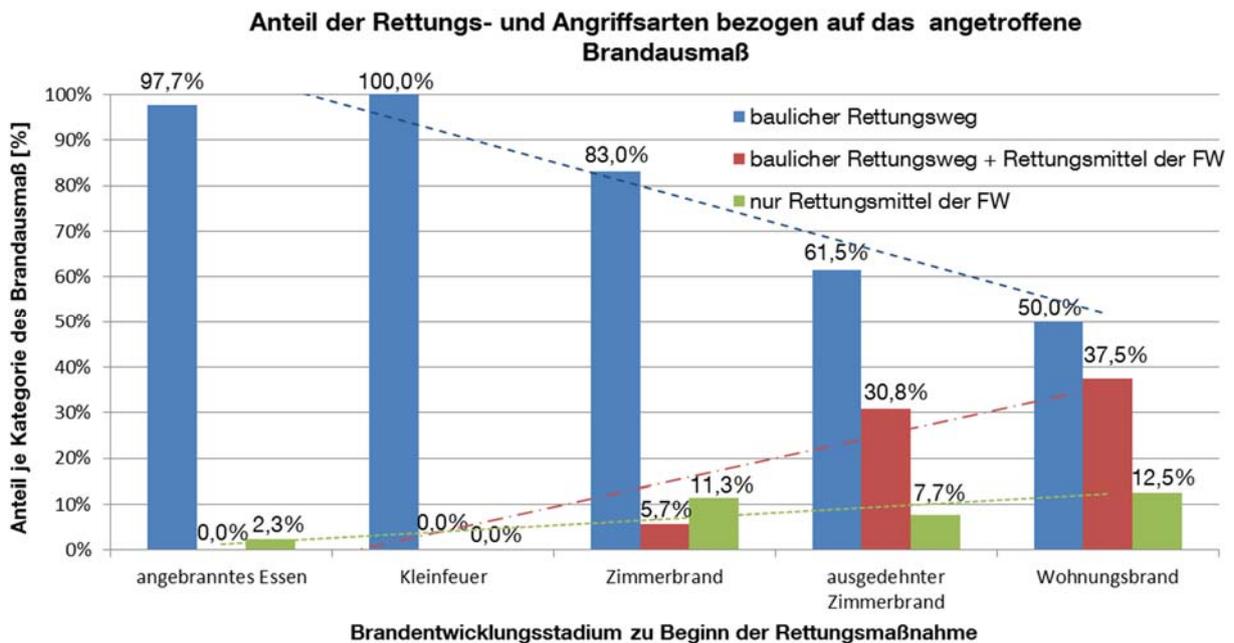


Abbildung 6-17: Anteil der Rettungs- und Angriffsarten bezogen auf das Brandausmaß bei Ankunft

Die dargestellte Auswertung in Abbildung 6-17 zeigt, dass bei dem Brandentwicklungsstadium „Zimmerbrand“ in 17% bzw. insgesamt 9 Fällen der bauliche Rettungsweg durch den Einfluss des Brandereignisses in seiner Funktion eingeschränkt bzw. nicht mehr benutzbar war. Hierzu konnte mittels der Internetrecherche aus den zugehörigen Presseberichten ermittelt werden, dass

- durch offen stehende Türen zum Treppenraum bzw.
- in einem Fall durch direkt im Treppenraum befindliche Brandlast (abgestellte Polstermöbel)

jeweils eine massive Beeinflussung des notwendigen Treppenraumes durch eindringenden bzw. entstandenen Rauch vorhanden war. Entsprechend dürfte hier bei strikterer Einhaltung der baurechtlichen Regelungen, wie der Ausführung der Kellertüren als feuerhemmende, dicht- und selbstschließend, ggf. in Verbindung mit einer Feststellanlage, oder der Wohnungstüren zum Treppenraum als vollwandig, dicht- und selbstschließend sowie nicht durch etwaige Manipulation (Keil) außer Funktion gesetzt, eine weitere Steigerung des Anteils des rein baulichen Angriffsweges möglich sein.

Abbildung 6-18 zeigt eine erste übergeordnete Auswertung der aus den Einsatzdaten erfassten Zeiträume für den Abschluss der Personenrettung nach Ankunft am Einsatzort. Leicht erkennbar ist dabei der große

zeitliche Unterschied zwischen der Rettung über die baulichen Rettungswege (Mittelwert 8 Minuten 20 Sekunden) und der notwendigen Zeitspannen bei Einsatz von Rettungsmitteln der Feuerwehr (14 Minuten 47 Sekunden).

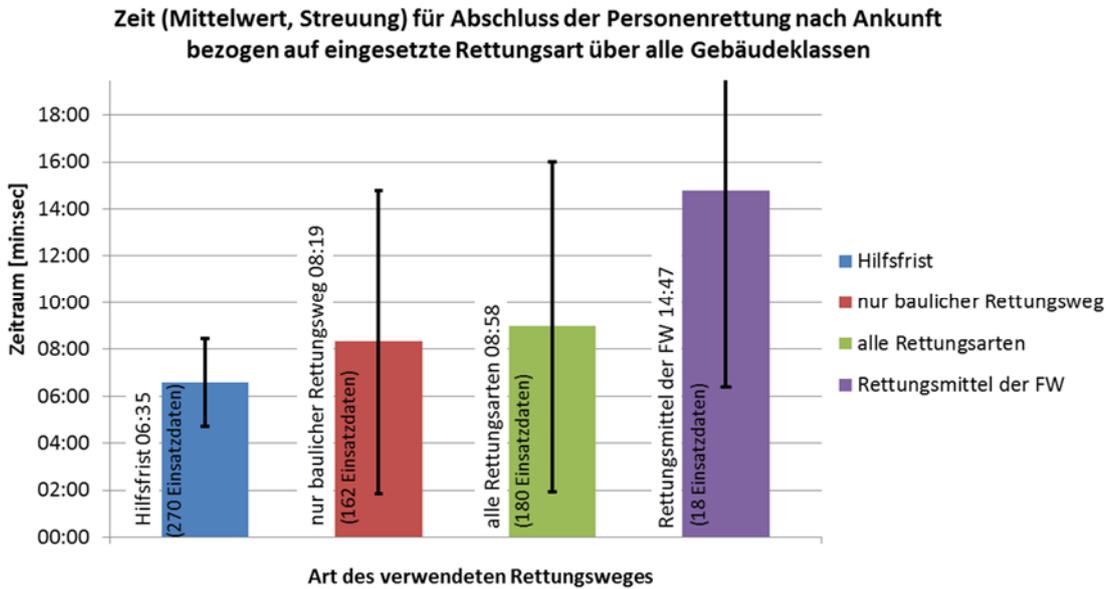


Abbildung 6-18: Grafische Darstellung der Mittelwerte und Streuungen zur Hilfsfrist sowie Zeiten der Personenrettung

Eine weitere Auswertung Abbildung 6-19 zu den notwendigen Rettungszeiten, aufgeschlüsselt unter Berücksichtigung der Gebäudeklassen sowie der eingesetzten Rettungsmittel verdeutlicht die weitaus größeren Einsatzzeiten für eine Personenrettung bei Ausfall des ersten ortsfesten Rettungsweges und der notwendigen Rettung über Einsatzmittel der Feuerwehr.

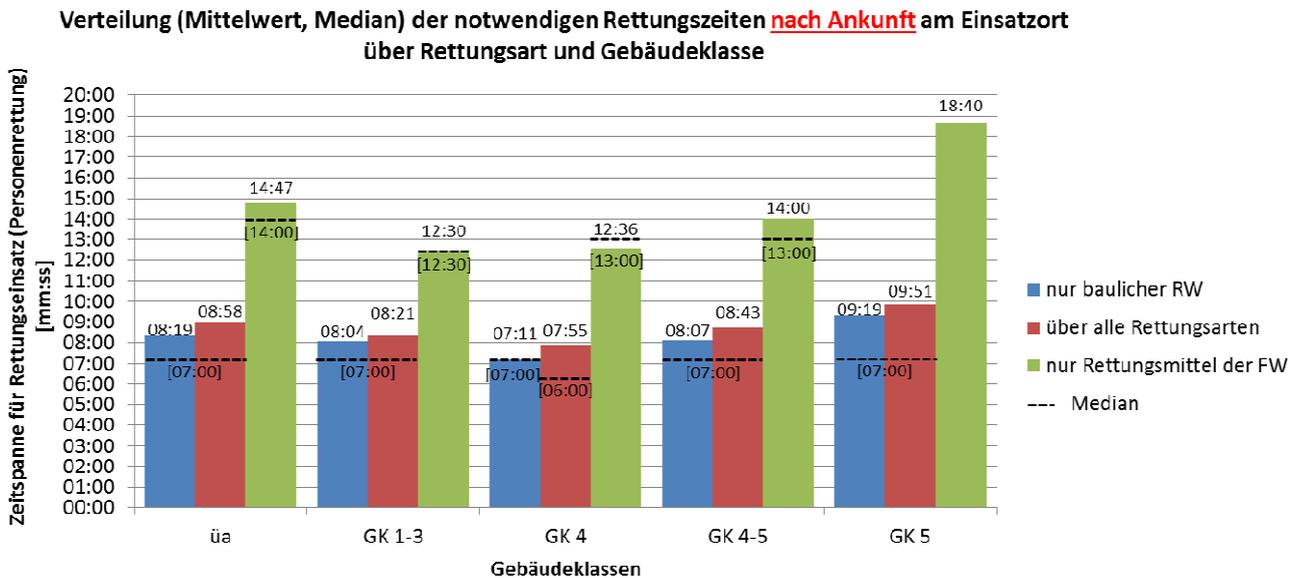


Abbildung 6-19: Darstellung der Rettungszeiten aufgeschlüsselt über Gebäudeklassen und eingesetzte Rettungsmittel

Da für den Zeitraum der Personenrettung sowohl Einsatzkräfte als auch Einsatzmittel (z.B. Drehleiter) gebunden sind und damit für einen schnellen bzw. frühzeitigen Löscheinsatz nicht zur Verfügung stehen, ist für alle möglichen Maßnahmen zur Sicherstellung benutzbarer ortsfester Rettungswege eine hohe Priorität zu setzen.

Um für die spätere Simulation verwendbare Verteilungen über den gesamten Einsatzverlauf zu erhalten, wurden neben den reinen Zeiträumen für die Rettung von Personen für alle Einsätze die Zeiten vom Einsatzbeginn, also dem Zeitpunkt der Ankunft der Kräfte am Einsatzort bis zur Meldung „Feuer aus!“ nach dem erfolgreichem Löschgriff ermittelt.

In einem ersten Schritt wurden die Zeiträume für die Einsatzdauer, aufgeschlüsselt nach dem jeweils angetroffenen Brandausmaß, ermittelt. Abbildung 6-20 zeigt die grafische Darstellung der Zeiten, bestehend aus Mittelwert, Median und 90%-Quantile mit den zugehörigen linearen Trendlinien sowie den Anteilen an der Grundgesamtheit aller erfassten Brände. Wie zu erwarten, zeigt das Diagramm einen deutlichen Anstieg der Einsatzzeiten mit zunehmendem Brandausmaß. Die Gründe hierfür wurden in den vorherigen Ausführungen bereits mehrfach beschrieben. Neben den allgemein wesentlich aufwendigeren Maßnahmen zur Eigensicherung werden durch größere Brandausmaße weiträumigere Bereiche beeinflusst bzw. beansprucht, wodurch bei sämtlichen durchzuführenden Maßnahmen sich der Rahmen zeitlich und im Umfang deutlich vergrößert. Zuletzt wird die Löschmaßnahme mit steigendem Brandausmaß immer aufwendiger und mehr Löschgeräte, inklusive deren Aufbau und Führung, werden erforderlich.

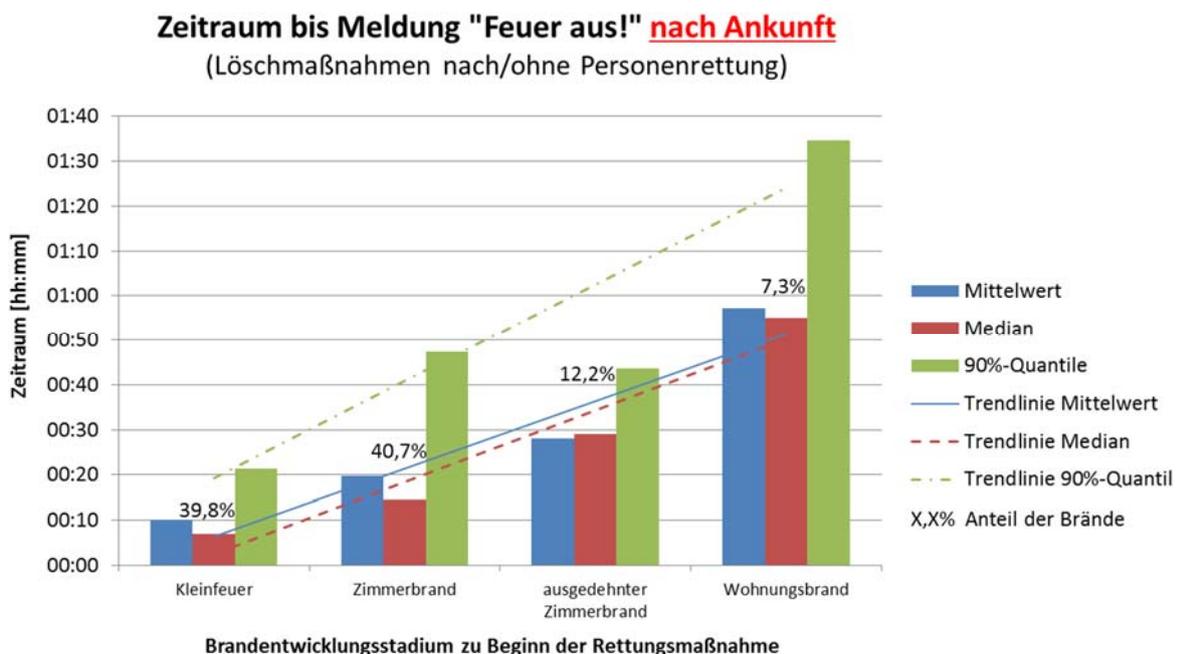


Abbildung 6-20: Zeiträume bis zur abgeschlossenen Löschmaßnahme nach Ankunft am Einsatzort mit Bezug auf das angetroffene Brandausmaß

Auf Basis der Erkenntnisse aus Abbildung 6-20 wurde die statistische Auswertung der Daten in drei Gruppen mit einem jeweils gesetzten maximalen Brandausmaß vorgenommen. Tabelle 6-16 zeigt die Zuordnung der in den Auswertegruppen enthaltenen Brandausmaße. Die Gruppierung wurde auch vor dem Hintergrund vorgenommen, dass durch eine Steigerung der Anlagentechnik bezüglich der Detektion und Meldung von Bränden der derzeit ohnehin bereits geringe Anteil an Bränden größeren Ausmaßes noch weiter reduziert werden kann. Die Ansätze hierzu wurden bereits in Kapitel 5.2.4 zur Brandentdeckung und Brandmeldung anhand der in England durchgeführten Untersuchungen mit der zu erwartenden Tendenz beschrieben.

Tabelle 6-16: Darstellung der berücksichtigten Brandausmaße für die jeweilige Auswertegruppe

Auswertungsgruppe	in der Auswertung aufgenommene Zeiten für bei Ankunft am Einsatzort jeweils angetroffene Brandausmaße
angebranntes Essen bis Zimmerbrand	angebranntes Essen + Kleinfeuer + Zimmerbrand
angebranntes Essen bis ausgedehnter Zimmerbrand	angebranntes Essen + Kleinfeuer + Zimmerbrand + ausgedehnter Zimmerbrand
angebranntes Essen bis Wohnungsbrand	angebranntes Essen + Kleinfeuer + Zimmerbrand + ausgedehnter Zimmerbrand + Wohnungsbrand

Die vorgenannten drei Auswertegruppen werden im Folgenden für alle weiteren Auswertungen und Simulationen beibehalten.

Um einen Eindruck für den Einfluss von Gebäudehöhen (Anzahl der Geschosse) auf den Brandeinsatz zu bekommen, erfolgte eine weitere Auswertung der Einsatzzeiten getrennt über die Gebäudeklassen. Auch hier konnte wie bereits bei der Auswertung zu den Zeiten der Personenrettung (vgl. Abbildung 6-19) kein wesentlicher Unterschied zwischen den Gebäudeklassen festgestellt werden. Einzig bei Gebäudeklasse 5 ergab sich ein höherer Zeitaufwand in den Fällen, bei denen der Einsatz ausschließlich über Rettungsmittel der Feuerwehr, also nicht ortsfeste Rettungswege, erfolgen musste. Da jedoch die Menge der vorhandenen Daten zur Gebäudeklasse 5 wesentlich geringer ist, könnte sich auch hier mit einem größeren Datensatz die vorgenannte Tendenz zu im Prinzip höhenunabhängigen Zeiten bestätigen.

Tabelle 6-17 bis Tabelle 6-19 zeigen die Auswertungen zu den Einsatzzeiten von der Ankunft der Feuerwehr am Einsatzort bis zur Meldung „Feuer aus!“ mit Bezug auf die jeweilige Auswertungsgruppe (vgl. Tabelle 6-16) und die Gebäudeklassen 3 bis 5 bzw. 4 sowie 4 und 5. Zusätzlich wurde jeweils eine Auswertung für den Zeitraum vom Alarmeingang bei der Leitstelle bis zur Meldung „Feuer aus!“ als gesamte Einsatzzeit inklusive der benötigten Hilfsfrist vorgenommen. Für die Vergleichbarkeit untereinander wurden jeweils die minimale und maximale Zeit sowie der Median, Mittelwert und Standardabweichung auf Basis einer Normalverteilung ermittelt. Die Auswertungen bezüglich des Mittelwertes und des Medianes zeigen für alle drei Tabellen keine signifikanten Unterschiede. Sämtliche Differenzen zwischen den einzelnen Gruppen bewegen sich im Rahmen von  $\pm 1$  Minute und können dementsprechend vernachlässigt werden.

Für die Generierung der Verteilungen als Eingangsparameter zur späteren Simulation wurden deshalb als Datengrundlage die Gesamtheit der Einsätze aus den Gebäudeklassen 3 bis 5 verwendet.

Tabelle 6-17: Auswertung der Einsatzzeiten von Ankunft bis „Feuer aus!“ zusammengefasst für Gebäudeklasse 3 bis 5

		Gebäudeklasse 3 - 5					
		angebranntes Essen bis Zimmerbrand		angebranntes Essen bis ausgedehnter Zimmerbrand		angebranntes Essen bis Wohnungsbrand	
		Ankunft bis "Feuer aus"	Alarmeingang bis "Feuer aus"	Ankunft bis "Feuer aus"	Alarmeingang bis "Feuer aus"	Ankunft bis "Feuer aus"	Alarmeingang bis "Feuer aus"
Anzahl		173	174	191	193	199	200
Minimum		0:02:00	0:06:00	0:02:00	0:06:00	0:02:00	0:06:00
Maximum		1:08:00	1:14:00	2:06:00	2:12:00	2:06:00	2:12:00
Medianwert		0:08:00	0:14:00	0:09:00	0:15:00	0:09:00	0:15:00
Mittelwert		0:12:01	0:18:31	0:14:19	0:20:48	0:15:54	0:22:24
Standardabw		0:11:39	0:11:26	0:15:35	0:15:19	0:17:38	0:17:32
VAR		97%	62%	109%	74%	111%	78%

Tabelle 6-18: Auswertung der Einsatzzeiten von Ankunft bis „Feuer aus!“ zusammengefasst für Gebäudeklasse 4

		Gebäudeklasse 4					
		angebranntes Essen bis Zimmerbrand		angebranntes Essen bis		angebranntes Essen bis Wohnungs-	
		Ankunft bis "Feuer aus"	Alarmeingang bis "Feuer aus"	Ankunft bis "Feuer aus"	Alarmeingang bis "Feuer aus"	Ankunft bis "Feuer aus"	Alarmeingang bis "Feuer aus"
Anzahl		87	87	101	101	104	103
Minimum		0:02:00	0:07:00	0:02:00	0:07:00	0:02:00	0:07:00
Maximum		0:58:00	1:04:00	2:06:00	2:12:00	2:06:00	2:12:00
Medianwert		0:08:00	0:14:00	0:08:00	0:15:00	0:09:00	0:15:00
Mittelwert		0:11:25	0:17:55	0:15:29	0:21:59	0:16:28	0:22:58
Standardabw		0:11:41	0:11:28	0:18:20	0:18:08	0:19:46	0:19:38
VAR		102%	64%	118%	83%	120%	85%

Tabelle 6-19: Auswertung der Einsatzzeiten von Ankunft bis „Feuer aus!“ zusammengefasst für Gebäudeklasse 4 bis 5

		Gebäudeklasse 4 - 5					
		angebranntes Essen bis Zimmerbrand		angebranntes Essen bis ausgedehnter Zimmerbrand		angebranntes Essen bis Wohnungsbrand	
		Ankunft bis "Feuer aus"	Alarmeingang bis "Feuer aus"	Ankunft bis "Feuer aus"	Alarmeingang bis "Feuer aus"	Ankunft bis "Feuer aus"	Alarmeingang bis "Feuer aus"
Anzahl		151	152	168	170	174	175
Minimum		0:02:00	0:06:00	0:02:00	0:06:00	0:02:00	0:06:00
Maximum		1:08:00	1:14:00	2:06:00	2:12:00	2:06:00	2:12:00
Medianwert		0:08:00	0:14:00	0:09:00	0:15:00	0:09:00	0:16:00
Mittelwert		0:12:15	0:18:39	0:14:50	0:21:13	0:16:08	0:22:31
Standardabw		0:12:03	0:11:53	0:16:16	0:16:03	0:17:59	0:17:50
VAR		98%	64%	110%	76%	111%	79%

Vergleicht man die Minimum-, Mittel- und Maximum-Werte je Auswertegruppe ist erkennbar, dass die Verteilungen unsymmetrisch sein müssen und keiner üblicherweise im Bauwesen verwendeten Normalverteilung entsprechen. Wie bereits bei der Ermittlung der Verteilung zur Hilfsfrist (vgl. Kapitel 6.2) wurden die Daten mittels einer „BestFit-Analyse“ unter Verwendung eines auf Microsoft-Excel basierenden Risikotools @RISK (vgl. Kapitel 7.1) zur exakten Verteilungsfindung analysiert. Für alle Auswertegruppen ergab sich auf Basis der Analyse eine beste Übereinstimmung mit der inversen Gauß-Verteilung (auch inverse Normalverteilung genannt).

Abbildung 6-21 enthält beispielhaft die Darstellung der invGauß-Verteilung für die Auswertegruppe „angebranntes Essen bis Wohnungsbrand“. Abbildung 6-22 enthält die zugehörige, kumulativ aufsteigende Wahrscheinlichkeitsdarstellung für die vorgenannte Verteilung. Die ermittelten invGauß-Verteilungen wurden in dieser dargestellten Form als Eingang für die Monte-Carlo-Simulation eingepflegt.

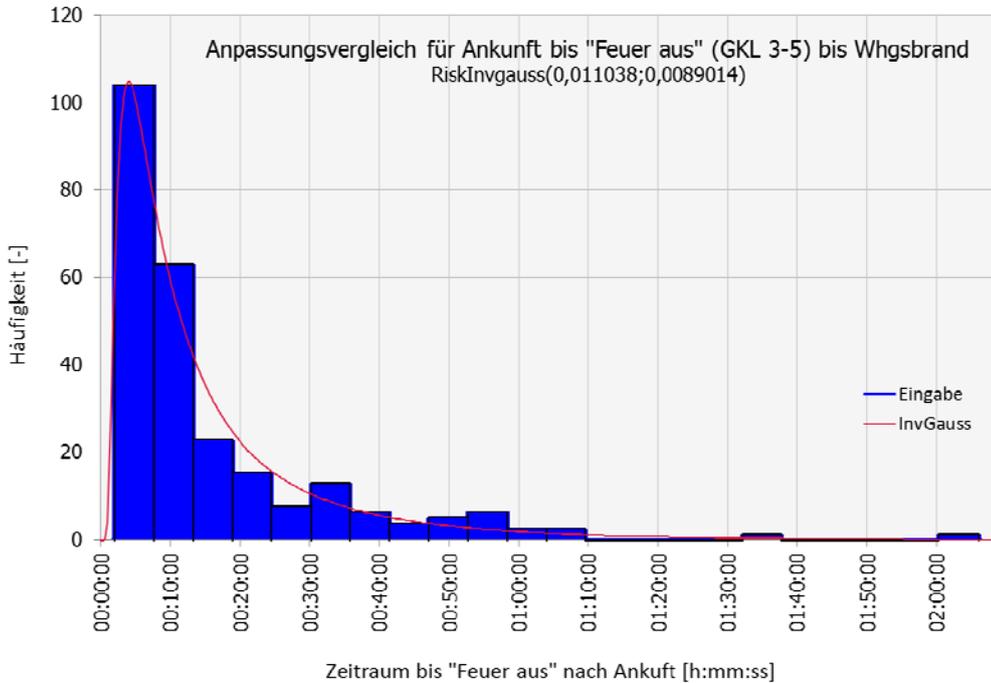


Abbildung 6-21: Häufigkeitsverteilung der Einsatzzeiten bis „Feuer aus“ nach Ankuft bei kumulativer Betrachtung der Brandausmaße angebranntes Essen bis Wohnungsbrand in der Gebäudeklasse 3 bis 5

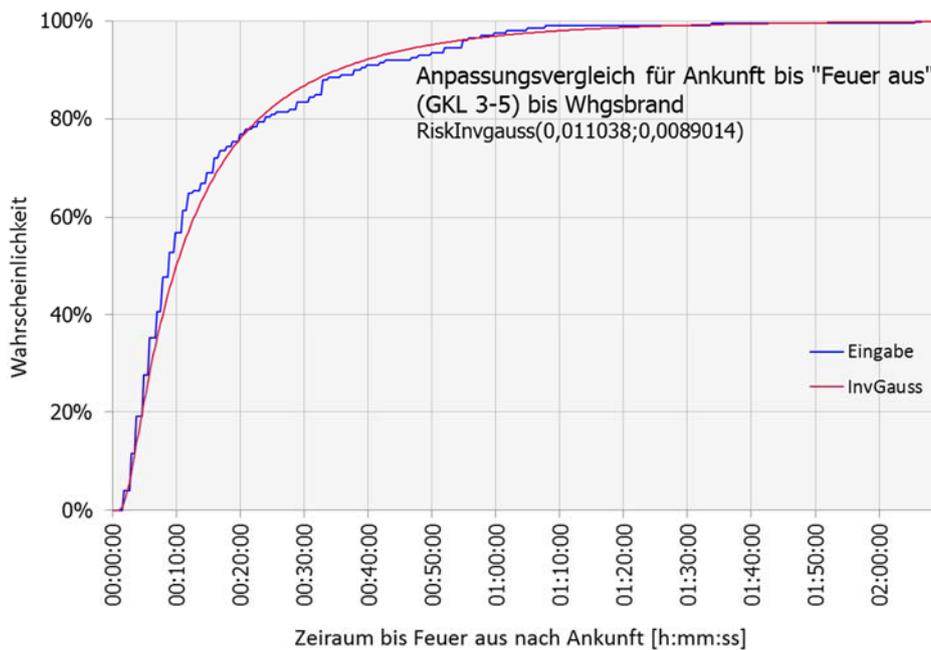


Abbildung 6-22: Kumulativ aufsteigende Darstellung der Einsatzzeiten bis „Feuer aus“ nach Ankuft bei kumulativer Betrachtung der Brandausmaße angebranntes Essen bis Wohnungsbrand in der Gebäudeklasse 3 bis 5

## 6.5 Auswertung national veröffentlichter Einsatzstatistiken der Bundesländern

Jährlich werden von den zuständigen Ministerien der Bundesländer die Statistiken zu den erbrachten Hilfeleistungen veröffentlicht. Um die eigenen Erhebungen zu verifizieren wurden die Jahresstatistiken der Bundesländer, soweit digital veröffentlicht bzw. erhältlich, für den Zeitraum 2010 bis 2012 aufbereitet. Abbildung 6-23 enthält die grafische Darstellung der aufbereiteten Daten auf Basis der Zusammenstellung in Anhang 1, Tabelle A1.c-4. Aus den Bundesländern Bremen, Berlin, Baden-Württemberg und Mecklenburg-Vorpommern liegen keine veröffentlichten Zahlen vor, dementsprechend sind diese in den Auswertungen nicht enthalten. Die Kategorisierung der Brände in den jährlichen Veröffentlichungen folgt den in (DIN 14010:2005-10) und Kapitel 6.4 beschriebenen Klassen.

In der Abbildung bedeutet:

- blau, die Anteile an Kleinbränden a
- rot, die Anteile an Kleinbränden b
- grün, die Anteile an Mittelbränden und
- lila, die Anteile an Großbränden

für das jeweilige Bundesland.

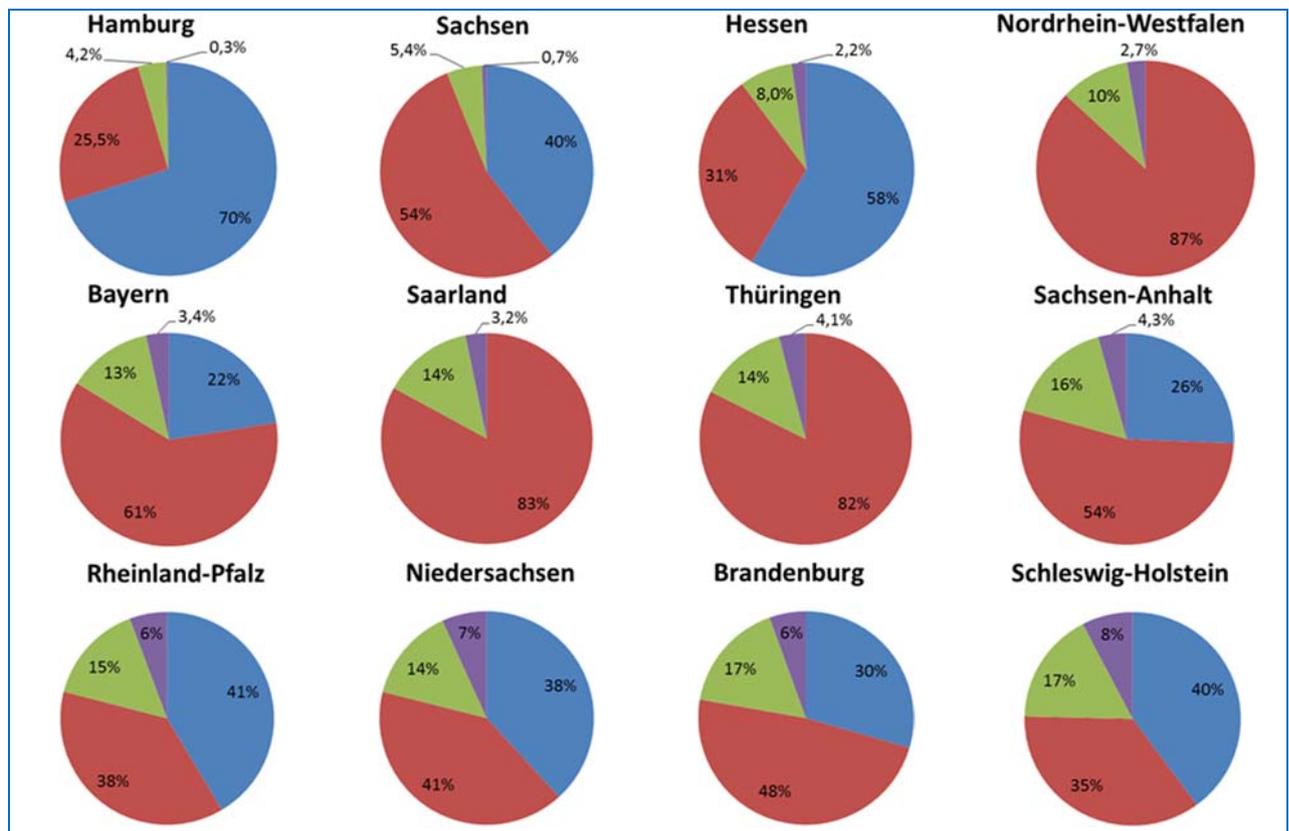


Abbildung 6-23: Grafische Aufbereitung von Daten der jährlichen Statistiken aus den Bundesländern (2010 – 2012)

Der Vergleich mit den eigenen Erhebungen gibt für das Bundesland Bayern eine ausgezeichnete Übereinstimmung. Es kann somit die Menge der selbst erhobenen Daten als repräsentativ angesehen werden. Gleichzeitig zeigen die Auswertungen im Vergleich zwischen den Bundesländern auch einen nicht unerheblichen Unterschied im Bereich der Brandausmaße Mittelfeuer und Großbrände. Allen gemein ist

jedoch, dass der überwiegende Anteil der angetroffenen Brände (75% bis 95%) das Ausmaß Kleinf Feuer hatte. Abbildung 6-24 zeigt den Vergleich zwischen den Bundesländern bei Zusammenfassung von Mittelfeuer und Großbränden.

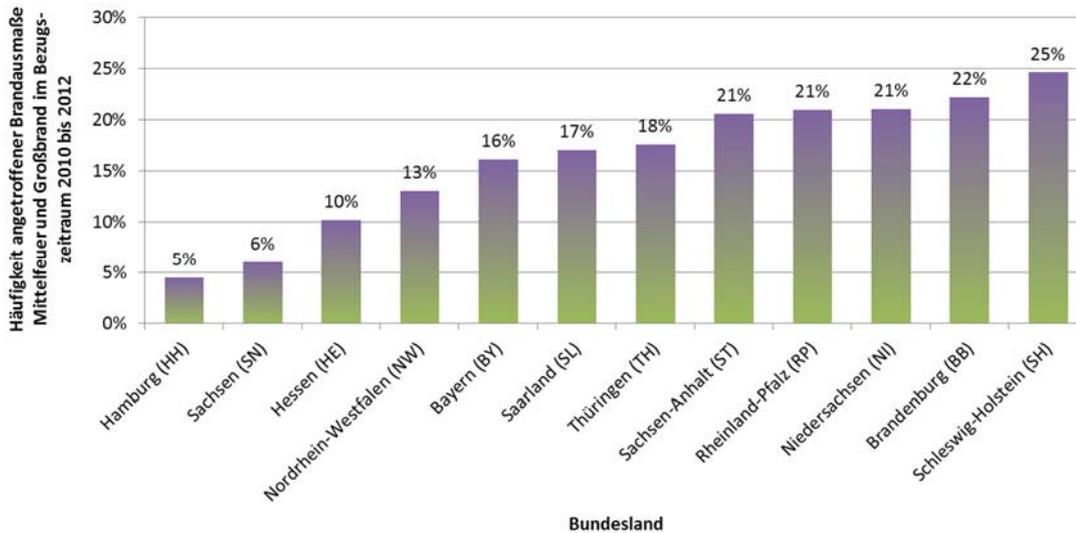


Abbildung 6-24: Häufigkeitsverteilung über Bundesländer zu angetroffene Brandausmaße Mittelfeuer und Großbrand

Als Ursache für die deutlichen Unterschiede zwischen den Bundesländern konnten im Zuge der Untersuchungen keine direkten Beziehungen ermittelt werden. Eine Auswertung bezüglich der gesetzlichen Verpflichtungen zur Installation von Rauchwarnmeldern in Neubauten bzw. der Verpflichtung zur Nachrüstung von Bestandsgebäuden (vgl. Tabelle 6-20) gab keinen Hinweis. Zwar ist Hamburg mit den wenigsten Großfeuern und der bereits sehr früh eingeführten Rauchwarnmelderpflicht im Vergleich der Bundesländer auch führend, hingegen ist das zweit platzierte Bundesland Sachsen noch ohne jegliche gesetzliche Verpflichtung. Schleswig-Holstein als letztplatziertes Bundesland hatte zudem die Rauchwarnmelderpflicht schon ein Jahr vor Hamburg eingeführt.

Tabelle 6-20: Vergleich der Bundesländer mit Darstellung des Zeitraumes der gesetzlichen Einführung der Rauchwarnmelderpflicht

2010 - 2012	Kleinbrand a	Kleinbrand b	Mittelfeuer	Großbrand	MF+GB	Melderpflicht	
						Neubau	Nachrüstung
Hamburg (HH)	70%	26%	4%	0%	5%	Apr 06	Dez 10
Sachsen (SN)	40%	54%	5%	1%	6%	-	-
Hessen (HE)	58%	31%	8%	2%	10%	Jun 05	Dez 14
Nordrhein-Westfalen (NW)		87%	10%	3%	13%	Apr 13	Dez 16
Bayern (BY)	22%	61%	13%	3%	16%	Jan 13	Dez 17
Saarland (SL)		83%	14%	3%	17%	Feb 04	-
Thüringen (TH)		82%	14%	4%	18%	Feb 08	Dez 18
Sachsen-Anhalt (ST)	26%	54%	16%	4%	21%	Dez 09	Dez 15
Rheinland-Pfalz (RP)	41%	38%	15%	6%	21%	Dez 03	Jul 12
Niedersachsen (NI)	38%	41%	14%	7%	21%	Nov 10	Dez 15
Brandenburg (BB)	30%	48%	17%	6%	22%	-	-
Schleswig-Holstein (SH)	40%	35%	17%	8%	25%	Apr 05	Dez 10

Ein geringfügiger Trend lässt sich bei Vergleich der Bundesländer bezüglich der einwohnermäßigen Abdeckung mit Berufsfeuerwehren ablesen. Tabelle 6-21 enthält eine diesbezügliche Auswertung. Trägt man in einem Diagramm den Grad der Abdeckung über die Auftretenshäufigkeit von Mittelfeuer und Großbränden auf, so kann der Trend grafisch belegt werden. Abbildung 6-25 zeigt die Analyse mit einer linear und einer potenziell aufgetragenen Trendlinie.

Tabelle 6-21: Vergleich der Bundesländer zur Abdeckung über Berufsfeuerwehren

Bundesland	MF+GB	Städte	abgedeckt durch BF			Bundesland gesamt			Verhältnis BF zu Bundesland		
			EW	km <sup>2</sup>	EW/km <sup>2</sup>	EW	km <sup>2</sup>	EW/km <sup>2</sup>	EW	km <sup>2</sup>	EW/km <sup>2</sup>
Hamburg (HH)	5%	1	1.751.780	755	2.319	1.751.780	755	2.319	100%	100%	100%
Sachsen (SN)	6%	8	1.572.371	1.280	1.228	4.047.000	18.416	220	39%	7%	18%
Hessen (HE)	10%	6	1.494.835	799	1.872	6.040.000	21.115	286	25%	4%	15%
Nordrhein-Westfalen (NW)	13%	31	7.785.245	4.584	1.698	17.569.000	34.098	515	44%	13%	30%
Bayern (BY)	16%	7	2.665.245	1.009	2.641	12.563.000	70.552	178	21%	1%	7%
Saarland (SL)	17%	1	176.996	167	1.059	992.000	2.570	386	18%	7%	36%
Thüringen (TH)	18%	8	630.404	944	668	2.162.000	16.173	134	29%	6%	20%
Sachsen-Anhalt (ST)	21%	3	545.970	581	940	2.246.000	20.446	110	24%	3%	12%
Rheinland-Pfalz (RP)	21%	5	676.370	537	1.259	3.995.000	19.854	201	17%	3%	16%
Niedersachsen (NI)	21%	11	1.708.735	1.587	1.077	7.792.000	47.635	164	22%	3%	15%
Brandenburg (BB)	22%	5	428.015	821	521	2.449.511	29.486	83	17%	3%	16%
Schleswig-Holstein (SH)	25%	4	611.992	461	1.328	2.811.000	15.799	178	22%	3%	13%

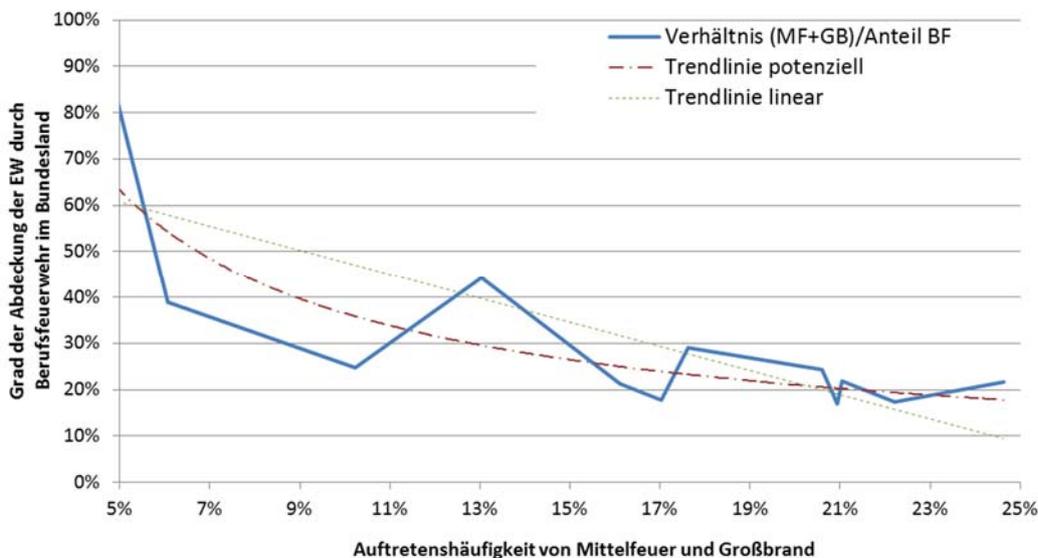


Abbildung 6-25: Trendanalyse zu Grad der Abdeckung durch Berufsfeuerwehr und Auftretenswahrscheinlichkeit von Mittelfeuer und Großbränden

Der Trend lässt sich in sehr geringem Umfang auch anhand des Vergleichs zwischen den Arten der Feuerwehren und des Auftretens von Großereignissen ablesen. Aus den Veröffentlichungen der Bundesländer Hessen, Rheinland-Pfalz, Saarland, Sachsen-Anhalt und Schleswig-Holstein konnten die Unterscheidungen zwischen den Feuerwehren herausgelesen werden. Tabelle 6-22 zeigt die Auswertung. In der letzten Spalte kann der absteigende Trend des Auftritts von Großbränden mit zunehmender Spezialisierung der Einsatzkräfte ablesen. Für die Mittelfeuer kann dieser Trend nicht eindeutig bestätigt werden.

Tabelle 6-22: Vergleich Art der Feuerwehr und Auftretenshäufigkeit von größeren Brandereignissen

Art der Feuerwehr	Kleinbrand		Mittelfeuer		Großbrand	
	Anzahl	Anteil	Anzahl	Anteil	Anzahl	Anteil
FF	84.755	78%	16.531	15%	7.144	6,6%
BF	24.633	90%	2.277	8%	314	1,2%
WF	1.039	83%	197	16%	18	1,4%
WF (ohne (ST))	1.008	83%	189	16%	11	0,9%

## 6.6 Sonstige Erhebungen aus Daten zu Einsätzen von Feuerwehren

### 6.6.1 Ermittlung der Leistungsfähigkeiten anhand eines interkommunalen Vergleichs (IKO-Netz)

Im Jahr 2001 wurde durch das IKO-Netz, einem wirtschaftlich ausgerichteten Geschäftsbereich der Kommunalen Gemeinschaftsstelle für Verwaltungsmanagement (KGSt), mit der Sammlung von Daten für einen bundesweiten Vergleich der Leistungsfähigkeit von Berufsfeuerwehren begonnen. Im ersten Schritt fand eine Datenerhebung an 13 teilnehmenden Berufsfeuerwehren von Städten über 250.000 Einwohnern statt. An diesem Vergleichsring nehmen die BF der deutschen Großstädte Berlin, Bochum, Bremen, Dortmund, Dresden, Düsseldorf, Frankfurt, Gelsenkirchen, Köln, Hamburg, Leipzig und München teil. Im Anschluss wurde im Jahr 2002 die Arbeit zu einem zweiten Vergleichsring mit weiteren neun teilnehmenden Berufsfeuerwehren von Städten bis 250.000 Einwohner aufgenommen.

In den Vergleichsrings wird ein Benchmarking im Bereich der Brandbekämpfung, der Technischen Hilfeleistung, des Rettungsdienstes, der Leitstelle, Personal, Finanzen und Vorbeugender Brandschutz vorgenommen. In den Vergleichsrings arbeiten derzeit 23 Berufsfeuerwehren mit. Darüber hinaus vergleichen sich seit Herbst 2012 in Nordrhein-Westfalen 11 kreisangehörige Städte mit Berufsfeuerwehren bzw. Feuerwehren mit hauptamtlichen Wachen. In Summe vergleichen sich aktuell über 1/4 aller bundesweiten Berufsfeuerwehren. (Quelle: [www.kgst.de](http://www.kgst.de)).

Eine Anfrage bei der KGSt bezüglich der wissenschaftlichen Nutzung der gesammelten Daten zur weiteren Verifizierung der Einsatzzeiten blieb leider erfolglos. Die Daten stehen bislang ausschließlich den teilnehmenden Feuerwehren zur Verfügung.

Eine künftige Auswertung dieser Daten würde eine bundesweite Beurteilung der Effektivität der Feuerwehren im Brandeinsatz auf Basis einer umfangreichen Grundgesamtheit ermöglichen, welche in der Folge als Grundlage für ingenieurtechnische Nachweise heran gezogen werden könnte.

### 6.6.2 Weitere Ansätze zur Ermittlung der Leistungsmerkmale des abwehrenden Brandschutzes

Im Zuge der Dissertation „Performance Management“ (Hilgers, 2008) wurden umfangreiche Literaturrecherchen bezüglich der Leistungserfassung von Feuerwehren durchgeführt. In der Arbeit werden 22 Forschungsarbeiten zum Thema der Performance Measurements bei öffentlichen Feuerwehren im Zeitraum 1971 bis 2006 aus den Ländern Japan, USA, Schweden, Dänemark, Belgien, Portugal und Deutschland aufgeführt. Allen gemeinsam ist dabei der Versuch, das Handeln der Feuerwehr zu erfassen und in ihrer Effizienz zu beurteilen. Nach eigener Recherche wurden die meisten Beurteilungen jedoch mit dem Ziel vorgenommen, eine Kosten/Nutzen-Analyse für Maßnahmen im Zuge von Bedarfsermittlungen zu

erhalten. Da diese Bewertungen unter Ansatz verschiedenster In- und Outputgrößen bzw. Messgrößen vorgenommen wurde, sind diese für die vorliegende Problemstellung nicht kumulativ verwendbar, sondern stellen nur teilweise und einzeln für sich verwertbare Informationen bereit.

Beispielsweise wurden in (Jaldell, 2002) 3039 Wohnhausbrände in Einfamilienhäusern in Schweden im Zeitraum von 1996/1997 als Basis für eine statistische Auswertung der Leistungsunterschiede zwischen hauptamtlichen (Berufsfeuerwehren) und freiwilligen Feuerwehren herangezogen. Im Ergebnis der Arbeit konnte jedoch kein wesentlicher Unterschied festgestellt werden.

Tabelle 6-23: Überblick zu relevanter Forschungsaktivität im Bereich Performance Measurement (Zusammenfassung aus (Hilgers, 2008))

	Portugal	Deutschland	Deutschland	Schweden	Deutschland	Schweden
<b>Autor / Quelle</b>	<b>Carvalho</b> (Carvalho, 2006)	<b>Stallmeyer</b> (Stallmeyer, 2004)	<b>Mamrot</b> (Mamrot, 2004)	<b>Jaldell</b> (Jaldell, 2002)	<b>Werners</b> (Werners, et al., 2001)	<b>Räddningsverket</b> (Räddningsverket, 1995)
<b>Titel</b>	<i>Measuring fire service performance: a comparative study</i>	<i>Lernen von den Besten – KGSt Vergleichsring, Steuerung der Feuerwehr</i>	<i>Zur Wirkung der Veränderung der Ressourcen bei der Feuerwehr auf die Sicherheit gegenüber Brandgefahren in einer Gemeinde</i>	<i>Essays on the Performance of Fire and Rescue Services</i>	<i>Standortplanung für das Rettungswesen</i>	<i>Optimal Fire Safety: Cost-benefit analysis and comparison of fire service costs in six countries</i>
<b>Inhalt</b>	Vergleichstudie zu Performance-Indikatoren aus UK und Portugal	Benchmarking Initiative der KGSt für Freiwillige und Berufsfeuerwehren	Kybernetischer Ansatz zur Modellierung der Einflussfaktoren von Brandrisiken	Kostenfunktionsschätzung, DEA Ansatz, Malmquist Produktivitätsindex	Operations-Research Ansatz zur Standortplanung für Feuerwachen	Kostenvergleich Brand-schutz der Swedish Rescue Services Agency (Räddningsverket)
<b>Praxisbezug / Empirie</b>	Auswertung von Interviews (Portugal) und Datenbanken (UK)	Ausführliches Kennzahlensystem für vier Vergleichsringe mit je ca. zehn Feuerwehren in Deutschland	Modellsimulation, Bewertung von Wirkungszusammenhängen aus Expertenmeinung	Empirische Auswertung u.a. von Bränden von Einfamilienhäusern in Schweden von 1996 und 1997	Gebietsstruktur der Stadt Bochum	
<b>Ansatz/ Maßgrößen</b>	Input: Kosten	Mehr als 200 Grund und Strukturzahlen werden auf ca. 100 Kennzahlen verdichtet	Finanzielle Mittel, techn. Ausstattung, pers. Leistungsfähigkeit des Personals	Input: Reaktionszeit, Personal	Fahrzeit zwischen Einsatzort und Wache	Output unterteilt in: Result (z.B. Zeit der Brandbekämpfung), Effekt (Tote, Gerettete, Wert) und Need (Sicherheitsgefühl)
	Output: Reaktionszeiten, Brandverletzte, Anzahl Wohnhausbrände, Krankenstand	Kennzahlen zu den drei Bereichen: Prozesse und Strukturen, Personal und Finanzen		Relation von Ausmaß des Brandes bei Eintreffen zu Ausmaß des Brandes bei Abrücken der Einsatzkräfte		Vgl. auch dazu: Mattson/Juas (1997)

Die einzelnen, in Tabelle 6-23 aufgeführten Quellen wurden im Zuge dieser Arbeit aus vorgenannten Gründen nicht mehr ausführlich recherchiert. Die Auflistung soll lediglich einer Basis bzw. Ideensammlung für weitere Forschung in dem Bereich zu Einsatzzeiten der Feuerwehr dienen.

## 7 Simulation von Raumbränden zur Risikoanalyse

### 7.1 Verwendetes Tool für die Simulation und Beschreibung der Vorgehensweise

Für die Durchführung der Risikoanalysen wurde das Hilfstool @RISK (Palisade, 2010) gewählt, mit welchem sich Monte Carlo-Simulationen unter Verwendung streuender Eingangsparameter (Verteilungen) durchführen lassen. @RISK basiert (Add-In) auf dem Tabellenkalkulationsprogramm Microsoft Excel und ergänzt dieses in seinen vorhandenen Rechenoperationen. Neben der Durchführung der Monte-Carlo-Simulation bietet dieses Programm zusätzlich die Möglichkeit der „Best-Fit“-Analyse zur Anpassung von Verteilungen auf Basis einer bestehenden Datenmenge sowie der Sensitivitätsanalyse zur Bestimmung des Einflusses von verteilungsbasierten Eingangsparametern auf das Ergebnis.

Für die durchzuführende Risikoanalyse mittels @RISK wird zunächst auf Basis von MS-Excel eine Modellierung der zu simulierenden Problemstellung durchgeführt. In der vorliegenden Arbeit wurden hierfür die Gleichungen zur Beschreibung von Raumbränden (vgl. Kapitel 7.3 und Anhang 2) mit der Berechnung von Temperaturverläufen in MS-Excel eingegeben. Die im Modell eingefügten Variablen sind die wichtigsten Bestandteile der Analyse. Sind die Werte für die Variablen im Zeitrahmen des Modells ausreichend bekannt und unterliegen nur sehr geringen bis keinen Streuungen, dann werden diese als bestimmte Werte eingefügt. Sind die Werte für die Variablen nicht bekannt, handelt es sich um unbestimmte oder „stochastische“, d.h. zufällige Variablen. Die Art der Unbestimmtheit wird dann durch Wahrscheinlichkeitsverteilungen definiert. In diesen Verteilungen werden alle Bereiche der Werte für die Variable (Minimal- bis Maximalwert) als auch die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten der einzelnen Werte abgebildet. Die für die vorliegende Arbeit zu verwendenden Verteilungen wurden bereits in den Kapiteln 5.2 und 6 beschrieben und dargestellt. Zusätzlich zu „bestimmt“ oder „unbestimmt“ können Variablen in dem Risikoanalysenmodell auch „unabhängig“ oder „abhängig“ sein. Eine unabhängige Variable wird von keiner anderen Variablen im Modell beeinflusst. In der vorliegenden Arbeit werden z.B. abhängige Variablen durch den Verlauf des Brandes durch das sich jeweils einstellende Szenario (Naturbrand unbeeinflusst, Brandentwicklung mit Flash-Over, Brandentwicklung bis Löscheinsatz) beeinflusst. Um Ergebnisse der Simulation zu erhalten, werden im Excel-Arbeitsblatt die entsprechenden Zellen als Ausgabezellen definiert.

Nach der Definition aller ein und Ausgabeparameter wird in @RISK per Monte Carlo-Simulation die Risikoanalyse ausgeführt. Die Simulation ist in diesem Sinne eine Methode, durch welche Verteilungen von möglichen Ergebnissen generiert werden, indem die Recheneinheit das Arbeitsblatt immer wieder neu berechnet, und zwar jedes Mal mit anderen Zufallswerten für die Wahrscheinlichkeitsverteilungen in den Zellwerten und Gleichungen. Bei genügend hoher Anzahl an Simulationsdurchläufen werden praktisch alle gültigen Kombinationen aus den Werten der Eingabevariablen verwendet, um sämtliche möglichen Resultate zu simulieren.

Die Ergebnisse der @RISK-Risikoanalyse werden wiederum in Form von Wahrscheinlichkeitsverteilungen der möglichen Werte, die auftreten können, dargestellt. Eine Wahrscheinlichkeitsverteilung zeigt dann die relative Wahrscheinlichkeit für jedes mögliche Ergebnis an. Zusätzlich kann auf Basis der durchgeführten Simulationen mit @RISK eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt werden. Hierzu werden Regressionskoeffizienten zu den streuenden Eingangsparametern bestimmt und dargestellt.

## 7.2 Aufbau der Simulationsrechnung

Wie im vorhergehenden Kapitel ausgeführt, ist für die Durchführung der Risikoanalyse mit @RISK zunächst die Modellierung der zu simulierenden Problemstellung notwendig. Abbildung 7-1 zeigt grafisch den Rechenablauf für die Simulationen.

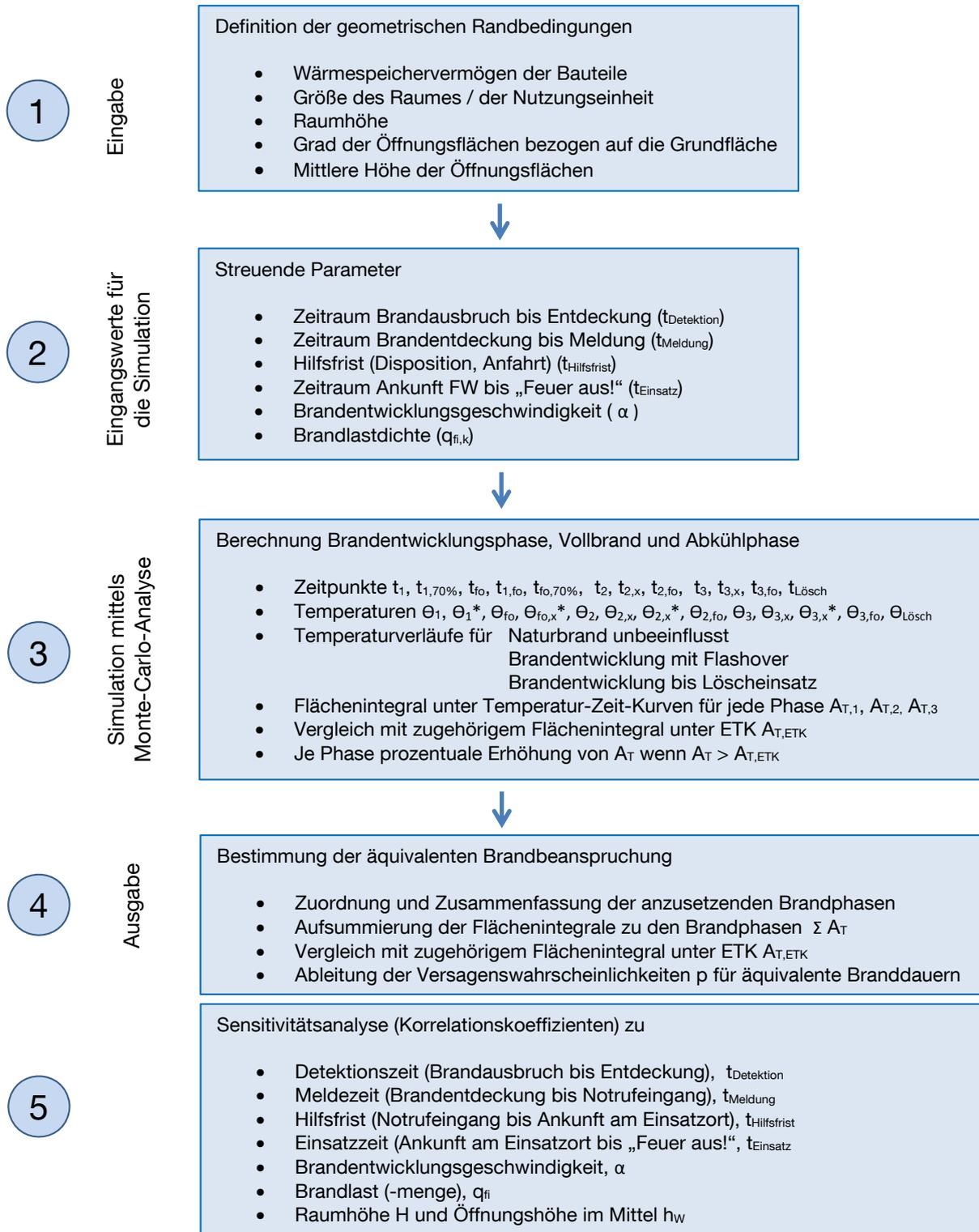


Abbildung 7-1: Aufbau und Ablaufschema der Simulation

Im ersten Schritt wird über die Eingabe der geometrischen Randbedingungen die Nutzungseinheit (NE) bzw. der zu analysierende Raum definiert. Neben der Größe des Raumes bzw. der Nutzungseinheit sind hierzu die Angaben zum Grad der Öffnungsflächen bezogen auf die Grundfläche des Raumes (bzw. der NE), der mittleren Höhe der Öffnungsflächen, der Raumhöhe sowie des Wärmespeichervermögens der Umfassungsbauteile notwendig. Aus der Kombination dieser Werte ergaben sich für den ersten Simulationsdurchlauf 140 zu untersuchende Variationen (vgl. Kapitel 5.2.6, Tabelle 5-6). Nachdem die Sensitivitätsanalyse für die beiden Parameter Raumhöhe und mittlere Höhe der Öffnungsflächen kein wesentliches Beeinflussungspotential auf die Ergebnisse zeigte, wurden diese in einem zweiten Simulationsdurchlauf vereinfachend zur Reduktion der Varianten als unbestimmte Variablen in Form von Histogramm-Verteilungen definiert.

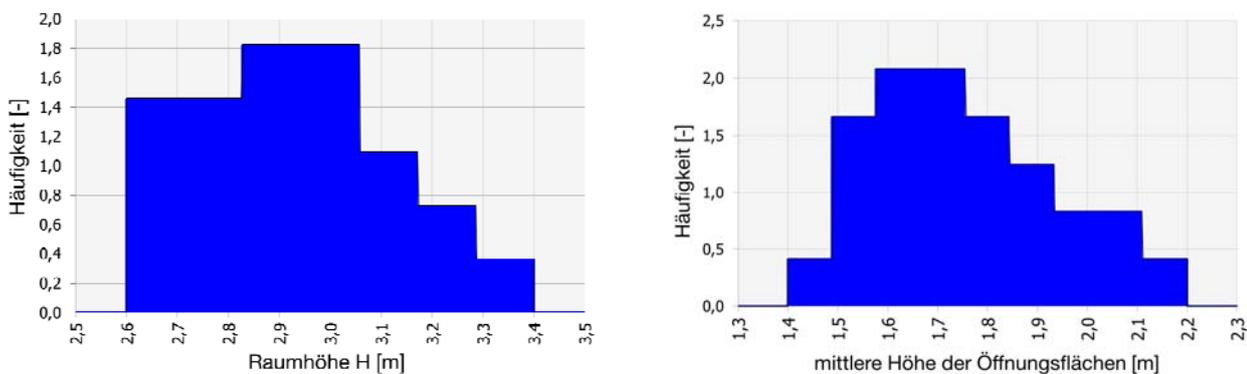


Abbildung 7-2: Angenommene Histogramm-Verteilungen für Raumhöhe und mittlere Höhe der Öffnungsflächen

Als zusätzliche Eingangsparameter, in Abbildung 7-1 als Nr. 2 dargestellt, werden im Modell die einzelnen Verteilungen zu den unbestimmten Werten,

- Zeitraum Brandausbruch bis Entdeckung ( $t_{\text{Detektion}}$ ) -> siehe Kapitel 5.2.4
- Zeitraum Brandentdeckung bis Meldung ( $t_{\text{Meldung}}$ ) -> siehe Kapitel 5.2.4
- Hilfsfrist (Disposition, Anfahrt) ( $t_{\text{Hilfsfrist}}$ ) -> siehe Kapitel 6.2
- Zeitraum Ankunft FW bis „Feuer aus!“ ( $t_{\text{Einsatz}}$ ) -> siehe Kapitel 6.4
- Brandentwicklungsgeschwindigkeit ( $\alpha$ ) -> siehe Kapitel 5.2.2
- Brandlastdichte ( $q_{fi}$ ) -> siehe Kapitel 5.2.3

eingepflegt.

Abbildung 7-3 zeigt die Maske für die Eingabe der bestimmten und unbestimmten Werte im Simulationsmodell. Die blau hinterlegten Felder stellen dabei die unbestimmten Eingabewerte mit zu Grunde gelegten Verteilungen dar. Aus diesen Verteilungen wird dann je Simulationsdurchgang per Zufallsgenerator jeweils ein Wert für die Berechnung entnommen. In der Darstellung sind bei den Fixwerten zwei Felder blau hinterlegt. Der Grund dafür ist, dass diese beiden zunächst bestimmten Werte im zweiten Simulationsdurchlauf durch Verteilungen zur Reduzierung der Variantenzahl ersetzt wurden.

Die vier unterschiedlichen Farbblöcke stellen die einzelnen Auswertegruppen entsprechend des maximal berücksichtigten Brandausmaßes (vgl. Tabelle 6-16) dar.

**Berechnung Variante****9****Fixwerte**

Wärmespeichervermögen Bauteile	$b_{\text{Umfassung}} =$	500	
Nutzung (Wohnraum- oder Büronutzung)		Whg	
Größe NE/Raum	$A_f =$	180	m <sup>2</sup>
Raumhöhe	$H =$	2,8	m
Verhältnis Öffn./Grundfl.	$\sim 1/A_f$	8	-
Öffnungsfaktor	$O =$	0,055	m <sup>1/2</sup>
Öffnungsfläche	$A_w =$	22,50	m <sup>2</sup>
gewichtetes Mittel der Fensterhöhen	$h_w =$	1,6	m
	$A_w \cdot \sqrt{h_w}$	28,46	m <sup>3/2</sup>
Fläche Umfassungsbauteile	$A_u =$	515,9	m <sup>2</sup>

**Streuende Werte**

				Verteilung	Minimum	Maximum	Medianwert	Mittelwert	Stabw	
<b>a) für Brandausmaß: angebranntes Essen bis Zimmerbrand</b>										
Zeitraum Brandentdeckung	$t_{\text{Detektion}} =$	972	sec	LogNV	0:00:00	∞	00:04:55	00:16:12	00:50:54	hh:mm:ss
Zeitraum Brandentdeckung bis Meldung	$t_{\text{Meldung}} =$	153	sec	Pearson5	0:00:00	∞	00:01:53	00:02:33	00:02:42	hh:mm:ss
Hilfsfrist (Disposition, Anfahrt)	$t_{\text{Hilfsfrist}} =$	394	sec	Gamma	0:00:00	∞	00:06:23	00:06:34	00:01:52	hh:mm:ss
Zeitraum Ankunft FW bis "Feuer aus!"	$t_{\text{Einsatz}} =$	721	sec	InvGauss	0:00:00	∞	00:08:26	00:12:01	00:11:17	hh:mm:ss
Zeitpunkt Ende der Löschmaßnahme	$t_{\text{Lösch}} =$	2.239	sec =							37 min
<b>b) für Brandausmaß: angebranntes Essen bis ausgedehnter Zimmerbrand</b>										
Zeitraum Brandentdeckung	$t_{\text{Detektion}} =$	972	sec	LogNV	0:00:00	∞	00:04:55	00:16:12	00:50:54	hh:mm:ss
Zeitraum Brandentdeckung bis Meldung	$t_{\text{Meldung}} =$	153	sec	Pearson5	0:00:00	∞	00:01:53	00:02:33	00:02:42	hh:mm:ss
Hilfsfrist (Disposition, Anfahrt)	$t_{\text{Hilfsfrist}} =$	394	sec	Gamma	0:00:00	∞	00:06:23	00:06:34	00:01:52	hh:mm:ss
Zeitraum Ankunft FW bis "Feuer aus!"	$t_{\text{Einsatz}} =$	859	sec	InvGauss	0:00:00	∞	00:09:25	00:14:19	00:14:55	hh:mm:ss
Zeitpunkt Ende der Löschmaßnahme	$t_{\text{Lösch}} =$	2.377	sec =							40 min
<b>c) für Brandausmaß: angebranntes Essen bis Wohnungsbrand</b>										
Zeitraum Brandentdeckung	$t_{\text{Detektion}} =$	972	sec	LogNV	0:00:00	∞	00:04:55	00:16:12	00:50:54	hh:mm:ss
Zeitraum Brandentdeckung bis Meldung	$t_{\text{Meldung}} =$	153	sec	Pearson5	0:00:00	∞	00:01:53	00:02:33	00:02:42	hh:mm:ss
Hilfsfrist (Disposition, Anfahrt)	$t_{\text{Hilfsfrist}} =$	394	sec	Gamma	0:00:00	∞	00:06:23	00:06:34	00:01:52	hh:mm:ss
Zeitraum Ankunft FW bis "Feuer aus!"	$t_{\text{Einsatz}} =$	954	sec	InvGauss	0:00:00	∞	00:09:59	00:15:54	00:17:42	hh:mm:ss
Zeitpunkt Ende der Löschmaßnahme	$t_{\text{Lösch}} =$	2.472	sec =							41 min
<b>d) ohne Einsatz der Feuerwehr</b>										
Zeitraum Brandentstehung bis Meldung	$t_{\text{Meldung}} =$	∞	sec							
Zeitraum Ankunft FW bis "Feuer aus!"	$t_{\text{Einsatz}} =$	∞	sec							
Zeitpunkt Ende der Löschmaßnahme	$t_{\text{Lösch}} =$	∞	sec							
Brandentwicklungsgeschwindigkeit	$\alpha =$	- 7,00	kW/sec <sup>2</sup>	NV	Werte werden in der Berechnung exp			-7	1,98	-
Brandlastdichte (DIN EN 1991-1-2 NAD)	$q_{n,k} =$	780	MJ/m <sup>2</sup>	NV	aus DIN EN 1991-1-2 NA			780	234	MJ/m <sup>2</sup>

Abbildung 7-3: Darstellung der Maske für die Eingabe der bestimmten und unbestimmten Werte im Simulationsmodell

Als dritter Schritt werden je Simulationsdurchlauf für die Brandentwicklungs-, die Vollbrand- und die Abkühlphase die Temperaturzeitverläufe berechnet. Neben dem unbeeinflussten Verlauf des Naturbrandes erfolgt parallel die Berechnung der Verläufe unter Berücksichtigung der prognostizierten Einsatzzeiten der drei verschiedenen Auswertegruppen. Zusätzlich wird bei allen vier Brandverläufen das Kriterium für das Auftreten eines Flash-Overs untersucht und ggf. mit berücksichtigt. Insgesamt werden für jeden Simulationsdurchlauf zwölf verschiedene Abläufe (Szenarien) von möglichen Brandverläufen untersucht und für jede Auswertegruppe ein passendes Szenario berechnet. Die einzelnen Szenarien gliedern sich wie folgt:

**Szenarien ohne Flash-Over**

- Szenario a) Natürlicher Brandverlauf ohne Einfluss der Feuerwehr
- Szenario b) Natürlicher Brandverlauf mit Umsetzung von 70% der Brandlast in der Brandentwicklungsphase und ohne Einfluss der Feuerwehr
- Szenario c) Natürlicher Brandverlauf mit Umsetzung von 70% der Brandlast in der Brandentwicklungsphase und Einfluss der Feuerwehr in der Abkühlphase

- Szenario d) Natürlicher Brandverlauf mit Einfluss der Feuerwehr in der Brandentwicklungsphase
- Szenario e) Natürlicher Brandverlauf mit Einfluss der Feuerwehr in der Vollbrandphase
- Szenario f) Natürlicher Brandverlauf mit Einfluss der Feuerwehr in der Abkühlphase

#### Szenarien mit Eintritt des Flash-Over

- Szenario g) Natürlicher Brandverlauf ohne Einfluss der Feuerwehr
- Szenario h) Natürlicher Brandverlauf mit Umsetzung von 70% der Brandlast in der Brandentwicklungsphase und ohne Einfluss der Feuerwehr
- Szenario i) Natürlicher Brandverlauf mit Umsetzung von 70% der Brandlast in der Brandentwicklungsphase und ohne Einfluss der Feuerwehr in der Abkühlphase
- Szenario j) Natürlicher Brandverlauf mit Einfluss der Feuerwehr in der Flash-Over-Phase
- Szenario k) Natürlicher Brandverlauf mit Einfluss der Feuerwehr in der Vollbrandphase
- Szenario l) Natürlicher Brandverlauf mit Einfluss der Feuerwehr in der Abkühlphase

Abbildung 7-4 zeigt beispielhaft den Berechnungsablauf für die Brandentwicklungsphase für einen beliebigen Simulationsdurchlauf. Im linken oberen Bereich der Abbildung befindet sich der Block mit der Berechnung der einzelnen Zeitpunkte, welche den jeweiligen Brandverlauf charakterisieren. Im oberen rechten Bereich werden die zum Simulationsschritt zugehörigen Parameter wie die Brandentwicklungsgeschwindigkeit, Öffnungsfaktor, k-Faktor und Entwicklungsgeschwindigkeit des Flash-Overs dargestellt. Darunterliegend, im mittleren Bereich, erfolgt auf der linken Seite die Bestimmung der zugehörigen Temperaturen für den Naturbrand. Auf der rechten Seite werden die Temperaturen auf Basis des Normbrandes (ETK-Verlauf) zu den jeweils zugehörigen Zeitpunkten  $t$  bestimmt. Ganz rechts ist der prozentuelle Vergleich zwischen den Temperaturen des Naturbrandes und des Normbrandes (ETK) zu gleichem Zeitpunkt  $t$  abzulesen. Überschreitet der Wert 100%, so liegt zum betreffenden Zeitpunkt die Temperatur des Naturbrandes oberhalb dem des Normbrandes. Diese Betrachtung dient jedoch nur zur Orientierung und wird in den folgenden Berechnungsschritten nicht weiter berücksichtigt.

Im untersten Block der Abbildung sind die Felder für die Berechnung der Flächenintegrale zur Natur- und Normbrandkurve für das einzelne Szenario zu erkennen. Nach der Berechnung der Temperatur-Zeit-Verläufe werden hier für jede Phase (Entwicklung-, Vollbrand-, Abkühlphase) die Flächenintegrale ( $A_{T,1}$ ,  $A_{T,2}$ ,  $A_{T,3}$ ) unter den Kurvenverläufen als Indikator für die Höhe der auftretenden Beanspruchung von Schutzbekleidungen und/oder Bauteilen, in Form einer Äquivalenzbetrachtung (vgl. Kapitel 7.3) ermittelt. Um ggf. höhere Beanspruchungen durch den Naturbrand im Vergleich zur Einheits-Temperatur-Zeit-Kurve (ETK) berücksichtigen zu können, wird für jede Phase des Brandes (Entwicklungs-, Vollbrand- und Abkühlphase) über den jeweiligen Zeitraum ein Vergleich zwischen dem Flächenintegral der Naturbrandkurve und der ETK vorgenommen. Für Bereiche in denen das Flächenintegral der Naturbrandkurve über dem Flächenintegral der Normbrandkurve (ETK) liegt, erfolgt eine prozentuelle Erhöhung des Flächenintegrals unter der Naturbrandkurve im Verhältnis der Überschreitung. Im aufgeführten Beispiel in Abbildung 7-4 ist nach rund 41 Minuten ( $t_{\text{Lösch}} = 2.472 \text{ sec}$ ) der Löscheinsatz abgeschlossen. Auf Grund der in diesem Beispiel sehr geringen Brandentwicklungsgeschwindigkeit traf die Feuerwehr trotz des langen Zeitraumes noch vor der Vollbrandphase ein und konnte den Brand löschen. Die bis dorthin aufgetretene Beanspruchung lag für dieses Beispiel auf Grund der sehr langsamen Brandentwicklung bei  $A_{T,1} = 169.065 \text{ K}\cdot\text{sec}$ . Im gleichen Zeitraum ( $t_{\text{Lösch}}$ ) beträgt das

Flächenintegral unter der ETK gleich  $A_{T,ETK} = 1.833.701 \text{ K}\cdot\text{sec}$ . Somit liegt das Verhältnis  $A_{T,1}$  zu  $A_{T,ETK}$  bei rund 0,1. Erreicht das Verhältnis z.B. Wert von 1,1 so erfolgt die beschriebene prozentuale Erhöhung von  $A_{T,1}$  um 10%.

Für jedes Szenario werden alle Wertepaare berechnet. Nach Berechnung der drei Brandphasen erfolgt die Zusammenstellung der zutreffenden Szenarien inklusive der ggf. prozentualen Erhöhung und der Aufsummierung der einzelnen Werte der berechneten Flächenintegrale.

Die Auswahl der zutreffenden Szenarien erfolgt nach dem in Anhang 2, Kapitel A2.m dargestellten Ereignisbaum. Der Aufbau der für die Berechnung der einzelnen Szenarien verwendeten Gleichungen wird überschlüssig in Kapitel 7.4 beschrieben. Eine ausführliche Zusammenstellung aller Gleichungen ist in Anhang 2, Kapitel A2.a bis A2.l enthalten.

2 Bereich $\alpha t^2$ -Anstieg bis Zeitpunkt $t_1, t_{1,70\%}, t_{1,fo}$ oder $t_{1,lösch}$			Brandentwicklung	$\alpha = 9,12E-04$				
Zeitpunkt $t_1$	6.312 sec	← maximale Wärmefreisetzungsrate erreicht		$t_g = 1.075,62 \text{ sec}$				
Zeitpunkt $t_{1,70\%}$	6.987 sec	← 70% der Brandlast sind verbrannt						
Zeitpunkt $t_{fo}$	4.135 sec		Öffnungsfaktor	$O = 0,055 \text{ m}^{1/2}$				
Zeitpunkt $t_{1,fo}$	4.211 sec	Flashover 70%	Faktor	$k = 0,018 \text{ -}$				
Zeitpunkt $t_{fo,70\%}$	4.139 sec		Entwicklung Flashover	$v_{fo} = 0,259001 \text{ MW/sec}$				
Zeitpunkt $t_{1,lösch}$	<table border="1"> <tr><td>2.239 sec</td></tr> <tr><td>2.377 sec</td></tr> <tr><td>2.472 sec</td></tr> </table>	2.239 sec	2.377 sec	2.472 sec	$t_1^* = \begin{cases} 2.239 \text{ sec} \\ 2.377 \text{ sec} \\ 2.472 \text{ sec} \end{cases}$			
2.239 sec								
2.377 sec								
2.472 sec								
Temperaturen zum Zeitpunkt	$t_1$	$\theta_{1,v} = 966,4 \text{ }^\circ\text{C}$	$\theta_1 = 966,4 \text{ }^\circ\text{C}$					
	$t_{1,70\%}$	$\theta_{1,f} = 459,2 \text{ }^\circ\text{C}$	$\theta_{1,ETK} = 1.029,3 \text{ }^\circ\text{C}$	94%				
	$t_{1,lösch}$	$\theta_1^* = 1.179,7 \text{ }^\circ\text{C}$	$\theta_{1,ETK}^* = 1.044,5 \text{ }^\circ\text{C}$	113%				
Flashover		$\theta_{1,x}^* = 139,1 \text{ }^\circ\text{C}$	$\theta_{1,x,ETK}^* = 874,4 \text{ }^\circ\text{C}$	16%				
		154,2 $^\circ\text{C}$	883,3 $^\circ\text{C}$	17%				
		165,2 $^\circ\text{C}$	889,2 $^\circ\text{C}$	19%				
	$t_{fo}$	$\theta_{fo} = 426,2 \text{ }^\circ\text{C}$	$\theta_{fo,ETK} = 966,1 \text{ }^\circ\text{C}$	44%				
	$t_{1,fo}$	$\theta_{1,fo} = 966,4 \text{ }^\circ\text{C} (= \theta_1)$	$\theta_{1,fo,ETK} = 968,8 \text{ }^\circ\text{C}$	100%				
$t_{fo,70\%}$	$\theta_{fo,x}^* = 453,4 \text{ }^\circ\text{C}$	$\theta_{fo,x,ETK}^* = 966,2 \text{ }^\circ\text{C}$	47%					
$t_{fo,lösch}$	$\theta_{fo,x}^{**} = - \text{ }^\circ\text{C}$	$\theta_{fo,x,ETK}^{**} = 874,4 \text{ }^\circ\text{C}$	-					
	- $^\circ\text{C}$	883,3 $^\circ\text{C}$	-					
	- $^\circ\text{C}$	889,2 $^\circ\text{C}$	-					
$A_{T,1}$ (für Szenario)	a, e, f	2.117.486 K·sec	g, k, l	695.534 K·sec				
	b, c	2.840.666 K·sec	h, i	644.373 K·sec				
	d	133.719 K·sec	j	- K·sec				
	d	153.874 K·sec	j	- K·sec				
	d	169.065 K·sec	j	- K·sec				

Abbildung 7-4: Beispielhafte Darstellung der Berechnungsschritte eines Durchlaufs für die Brandentwicklungsphase

Abbildung 7-5 zeigt beispielhaft die in roter Farbe hinterlegten Ergebnisfelder für einen beliebigen Simulationsdurchlauf mit den jeweiligen Summen der Flächenintegrale im oberen Kasten.

Die Bestimmung des zugehörigen ETK-Äquivalents (unterer Kasten) als maßgebliches Ergebnis zum Versagenszeitpunkt erfolgt durch Gleichsetzen mit dem Flächenintegral unterhalb ETK-Kurve.

<b>5 Ergebnis Summe AT bzw. ETK-Äquivalent; Brandphase zum Zeitpunkt Löschmaßnahme</b>		
mit Feuerwehr (max. Brandausmaß Zimmerbrand)	$\sum A_T =$	1.403.742 K·sec
mit Feuerwehr (max. Brandausmaß ausgedehnter Zimmerbrand)		2.198.760 K·sec
mit Feuerwehr (max. Brandausmaß Wohnungsbrand)		1.413.063 K·sec
ohne Feuerwehr (Ausbrand der Nutzungseinheit)		7.964.697 K·sec
ETK-Äquivalent		33 Min
		48 Min
		33 Min
		143 Min

Abbildung 7-5: Beispielhafte Darstellung des Ausgabefeldes eines Simulationsdurchlaufes

Für den im aufgeführten Beispiel in Abbildung 7-5 durchgeführten einzelnen Simulationsdurchlauf ergab die Summe der Flächenintegrale für die Naturbrandkurve bei maximalen Brandausmaß eines Zimmerbrandes inklusive der ggf. prozentuellen Erhöhungsanteile eine Summe von 1.403.742 K·sec. Das zugehörige ETK-Äquivalent beträgt dann 33 Minuten, das einer Fläche unter der Normbrandkurve (ETK) von 1.404.103 K·sec entspricht. Es besteht in akzeptablen Maß eine Flächengleichheit.

Da bei der Monte-Carlo-Simulation aus den Verteilungen der Parameter die Werte per Zufallsgenerator erzeugt werden, erscheinen in den Simulationsdurchläufen nicht immer logische, mit zunehmenden Brandausmaß ansteigende Werte. In vorgenanntem Beispiel ergibt sich für das geringste wie für das höchste Brandausmaß das identische ETK-Äquivalent, während das mittlere Brandausmaß einen fast eineinhalb Mal höheren Wert erreicht. Erst die Zusammenstellung der Einzelergebnisse in der kumulativen Verteilung nach Durchführung einer ausreichenden Anzahl an Simulationsdurchläufen führt zu dem letztlich verwendbaren Ergebnis (vgl. Abbildung 7-6).

Für die Untersuchung der zunächst definierten 140 Varianten (vgl. Kapitel 5.2.6, Tabelle 5-6) wurden je Variante 500.000 Simulationsdurchläufe durchgeführt. Die Ergebnisse zeigten, dass die beiden Eingangswerte Raumhöhe H und gemittelte Fensterhöhe  $h_w$  nur einen geringen Einfluss hatten. Zudem wurde eine Reduzierung der möglichen Varianten in Hinblick auf die spätere, praxistaugliche Verwendbarkeit der Ergebnisse für sinnvoll erachtet. Die beiden Variablen H und  $h_w$  wurden dementsprechend mittels Verteilung (vgl. Abbildung 7-2) als Eingangswerte für die Simulation eingepflegt. Des Weiteren wurde bereits im ersten Durchlauf festgestellt, dass wegen der Berücksichtigung des prognostizierten Feuerwehreinsatzes es bei den größeren Räumen (>150 m<sup>2</sup>) zu keiner höheren rechnerischen Beanspruchung der Bauteile kommt.

Der zweite Untersuchungsdurchgang wurde dann mit deutlich reduzierter Variantenzahl (32 Varianten) durchgeführt, wobei nur noch die Raumgröße  $A_r$  und das Öffnungsverhältnis 1/X (mit X = 2, 4, 6 und 8 nach Kap. 5.2.6, Tabelle 5-6) als feste Eingangswerte in die Simulation gingen. Wegen der Erhöhung der Anzahl unbestimmter Eingangsparameter wurde die Anzahl der Simulationsdurchläufe jeweils auf 2.500.000 erhöht. Abbildung 7-6 zeigt das Ergebnis der Simulation einer Variante im zweiten Untersuchungsblock für einen Raum mit einer Grundfläche von 45 m<sup>2</sup> und einem Verhältnis der Öffnungsfläche zur Grundfläche von 1/6. Die Kurven zeigen dabei jeweils mit welcher Häufigkeit ein unter ETK-Beanspruchung angenommener Widerstand für unter den jeweiligen Rahmenbedingungen der Variante simulierten Brände ausreichend war. Für das dargestellte Beispiel wäre somit ein Bauteil bzw. eine Schutzbekleidung mit einem Widerstand von 30 Minuten (Tragfähigkeit, Raumabschluss oder

Schutzwirkung) in 87,7% ausreichend. Nur in 12,3% der Fälle, in denen ein Brand in diesen durch die Variante bestimmten Räumen entsteht, würde es dementsprechend zu einem Versagen kommen.

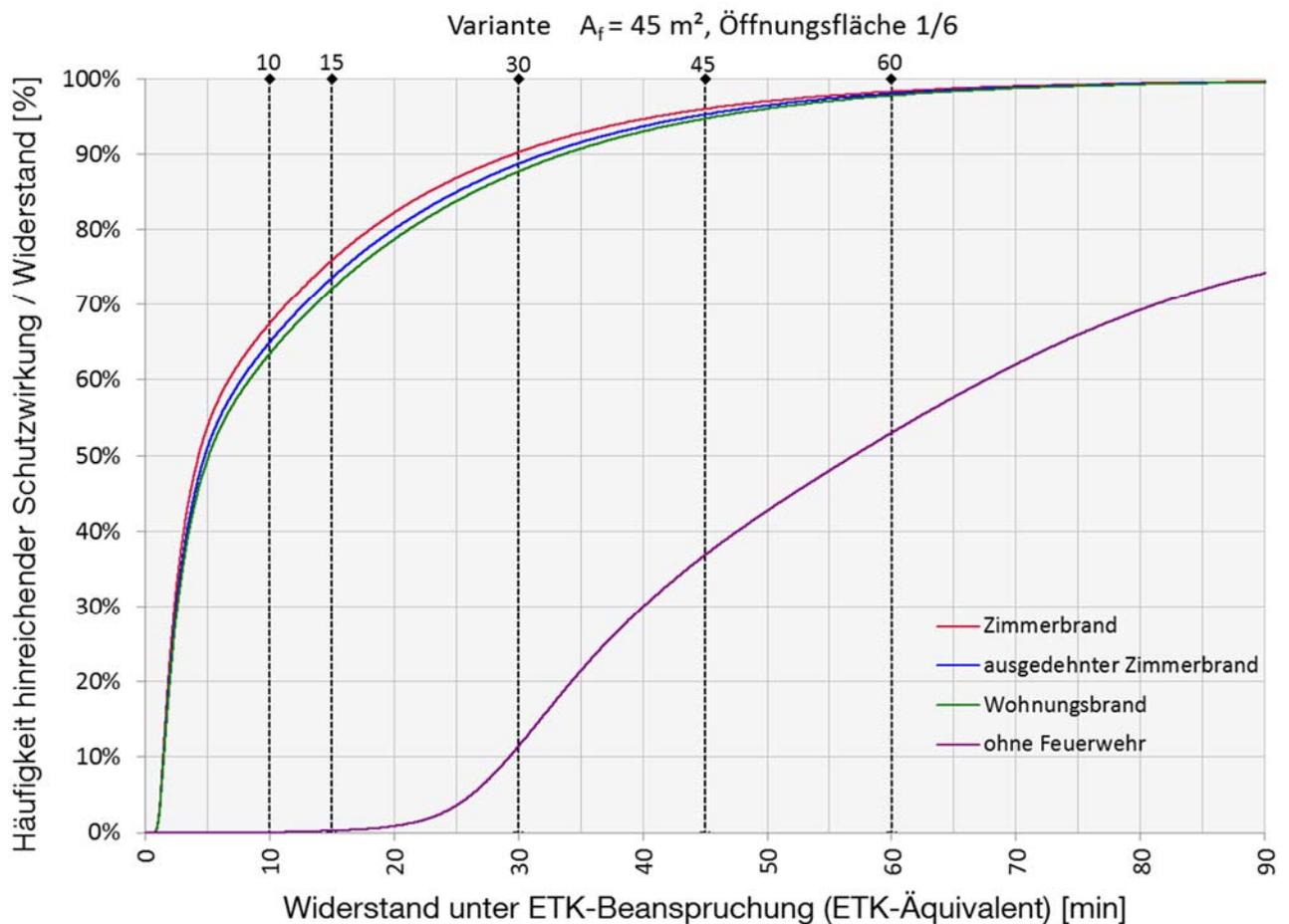


Abbildung 7-6: Beispielhafte Ergebnisdarstellung für die Simulation (Eingangswerten für  $A_f = 45 \text{ m}^2$  und Öffnungsfläche 1/6) der Häufigkeit hinreichender Schutzwirkung / Feuerwiderstandsfähigkeit von unter ETK-Beanspruchung geprüften Bauteilen

Für sämtliche Varianten der beiden Untersuchungsblöcke (erster Durchlauf mit 140 Varianten und zweiter Durchlauf mit 32 Varianten) wurden durch Simulation die entsprechenden Ergebniskurven generiert. Auf Basis dieser berechneten Verteilungen kann jedoch noch keine Aussage über notwendige Widerstände von Bauteilen oder Schutzbekleidungen getroffen werden. Die Simulationsergebnisse stellen ausschließlich den hinreichenden Widerstand auf Basis der ETK-Äquivalenzbetrachtung dar.

In Kapitel 7.5 werden deshalb abschließend die Ergebnisse der Simulation mit der Auftretenswahrscheinlichkeit von Bränden verknüpft und den in Kapitel 3.3 festgelegten, zulässigen Versagenswahrscheinlichkeiten entsprechend den Brandsicherheitsklassen  $SK_{HB0}$  bis  $SK_{HB3}$  gegenübergestellt.

### 7.3 Modell für die Äquivalenzbetrachtung

Äquivalenzbetrachtungen zwischen Naturbränden und Norm- oder „Modellbränden“ existieren schon seit rund hundert Jahren. In den Ausführungen zur Historie von Brandversuchen zur Bestimmung von Feuerwiderständen (Babrauskas, et al., 1978) wird von ersten Versuchen bereits um 1890 berichtet, bei denen ein Rückschluss zwischen der Menge an angeordneter Brandlast in Verbindung mit den vorherrschenden Ventilationsbedingungen und der Einwirkung auf umfassende Bauteile vorgenommen wurde. Diese ersten Untersuchungen bildeten einen entscheidenden Grundstock für die noch heute verwendete ISO-Normbrandkurve (ETK), die damals als „ASTM Standard Curve“ – ASTM steht für American Society für Testing and Materials – erstmals festgelegt wurde.

In der nachfolgenden Zeit bis heute wurden international eine Vielzahl von Modellen zur Betrachtung äquivalenter Branddauern entwickelt.

Erste diesbezügliche Betrachtungen werden in (Ingberg, 1928) beschrieben. In diesen Versuchen wurden Raumbrandversuche mit typischer Anordnung von Büromöbeln durchgeführt, wobei die Ventilationsbedingungen so gewählt wurden, dass ein maximales Brandausmaß bzw. eine maximale Brandeinwirkung erwartet wurde. Die Versuche blieben bis zur vollen Umsetzung der Brandlast (burn out) unbeeinflusst. Im Anschluss an die Versuche fand ein Vergleich der aufgezeichneten Temperatur-Zeitverläufe des Naturbrandes mit dem der Normbrandkurve statt. Ingberg stellte dar, dass eine vergleichbare Einwirkung vorliegen muss, wenn die Flächengleichheit der beiden Temperatur-Zeit-Kurven oberhalb einer Referenztemperatur ( $T_{t_{cr}} \sim 300^{\circ}\text{C}$ ) vorliegt.

Eine Vielzahl weiterer Modelle zu Äquivalenzbetrachtungen können z.B. in (Spearpoint, 2008) und (Wade, et al., 2014) oder auch (Blume, 2003) recherchiert werden, die teilweise auf den Erkenntnissen von Ingberg aufbauen bzw. andere aber doch ähnliche Ansätze verfolgen. Alle diese Modellbetrachtungen haben gemeinsam, dass mit Ausnahme von (Nyman, 2002) die Versuche jeweils in Brandräumen mit Umfassungsbauteilen aus mineralischen Baustoffen (Ziegel oder Beton) durchgeführt wurden. Des Weiteren basieren alle im Zuge dieser Recherche betrachteten Verfahren jeweils auf der vollen Umsetzung der angeordneten Brandlast ohne externe Einwirkung.

Das in Deutschland bekannteste und als einziges baurechtlich unmittelbar eingeführte Verfahren ist der im Industriebau verwendete Nachweis nach (DIN 18230-1:2010-09) zur Bestimmung der Vergleichsbranddauer  $t_a$ . Grundlage dieses Verfahrens sind in Brandversuchen ermittelte Zeiten in Minuten, welche unter Normbrand bei einem Vergleichselement (an der Decke des Prüfofens angeordnete Stahlplatte mit einer Temperaturmessstelle in 50 mm Tiefe) die gleiche Temperaturerhöhung gegenüber dem Ausgangszustand ergeben, wie sie bei dem Abbrand definierter Vergleichsbrandmengen (Naturbrände) als Maximalwert auftritt. Es ergeben sich daraus für unterschiedliche Brandlastmengen zugehörige Vergleichsbranddauern unter Normbrand. Unter Zugrundelegung aller zu definierten Brandabschnitten gehörigen Randparameter, wie Art und Menge der Brandlasten (Heizwert, Abbrandfaktor), die thermophysikalischen Eigenschaften der Umfassungsbauteile und den Wärmeabfluss über Ventilationsöffnungen kann daraus eine äquivalente Branddauer ermittelt werden. Unter Berücksichtigung spezifischer Beiwerte für die brandschutztechnische Infrastruktur sowie zur risikospezifischen Bedeutung des Bauteils im Bauwerk kann schlussendlich die rechnerisch erforderliche Feuerwiderstandsdauer  $t_F$  und damit abschließend die Feuerwiderstandsklasse nach DIN 4102 oder DIN EN 13501-2 bestimmt werden. Die Anwendbarkeit des Verfahrens beschränkt sich jedoch auch hier

auf die Bemessung mineralischer Bauteile in Form von brandschutztechnisch geschützten (bekleideten) Stahlbauteilen oder Stahlbetonbauteilen.

Als Fazit für den geeigneten Ansatz der Äquivalenzbetrachtung ergibt sich demnach, dass die bislang über Ingenieurmethoden zur Verfügung stehenden Verfahren zur Bewertung der äquivalenten Branddauer für eine Anwendung auf Bauteile in Holzbauweise nicht validiert sind bzw. deren Anwendbarkeit nicht überprüft wurde. Dies begründet sich damit, dass die Herleitung der Verfahren nahezu durchgängig nur in Brandräumen mit mineralischen, monolithischen Wänden bzw. Umfassungsbauteilen vorgenommen wurden. Daraus resultiert zudem, dass bei keinem der Versuche eine Brandbeteiligung aus der Konstruktion bzw. der Bauteilbekleidung mit berücksichtigt werden konnte.

Für die vorliegende Arbeit wird deshalb die einfachste Form der Äquivalenzbetrachtung mittels Vergleich der Flächenintegrale aus den Temperatur-Zeit-Verläufen unter Norm- und Naturbrand gewählt. Dieses Verfahren basiert auf den Überlegungen nach (Ingberg, 1928), wobei in dieser Arbeit der gesamte Bereich unterhalb der Temperatur-Zeit-Verläufe für die Berechnung herangezogen wird.

Das gewählte Verfahren soll im Gesamtkonzept dieser Arbeit als vorläufiger „Platzhalter“ eingesetzt werden. Ergeben sich in der Zukunft durch weitere Forschung als besser geeignet anzusehende Vergleichsmethoden, können diese problemlos an Stelle des jetzt gewählten Ansatzes in die Risikoanalyse eingepflegt werden.

#### **7.4 Verwendete Gleichungssysteme für die Simulationsberechnung**

Der Aufbau der verwendeten Gleichungssysteme erfolgte auf dem Grundschemata des in (Zehfuß, 2004) und später in (DIN EN 1991-1-2/NA:2010-12) dargestellten vereinfachten Naturbrandmodells für unbeeinflusste Brände. Die Anwendungsgrenzen gelten für Räume bis zu 400 m<sup>2</sup> Grundfläche und bis zu 5 m Höhe mit vertikalen Ventilationsöffnungen von 12,5% (1/8) bis 50% (1/2) der Raumgrundfläche sowie einer Brandlastdichte von 100 MJ/m<sup>2</sup> bis 1.300 MJ/m<sup>2</sup>. Alle Grenzen werden in dieser Arbeit eingehalten. Abbildung 7-7 zeigt die schematische Darstellung der Temperaturverläufe in den einzelnen Brandphasen, wobei auf der horizontalen Achse der Bereich 1 für die Brandentwicklungsphase, 2 für die Vollbrandphase und 3 für die Abkühlphase steht. Die grundsätzliche Berechnung des Temperaturverlaufs eines Naturbrandes erfolgt zunächst durch die Bestimmung der jeweiligen Temperaturen in den Phasenübergängen  $\Theta_1$ ,  $\Theta_2$ ,  $\Theta_3$ . Im Anschluss können die Temperaturverläufe während der Phasen durch Ansatz der in Abbildung 7-7 enthaltenen, quadratischen Gleichungen ermittelt werden.

In dieser Arbeit wurden zwölf anzusetzende Szenarien zu möglichen Brandverläufen für eine Verwendung in der Simulation nach diesem Schema aufbereitet. Da in Anhang 2 eine vollständige Zusammenstellung der verwendeten Gleichungen inklusive der grafischen Darstellung der Verläufe zur Wärmefreisetzung als auch der Temperaturentwicklung für alle Szenarien erstellt wurde, wird an dieser Stelle nur auf die Herleitung besonderer Gleichungen, die das grundlegende Modell entsprechend erweitern, detailliert eingegangen.

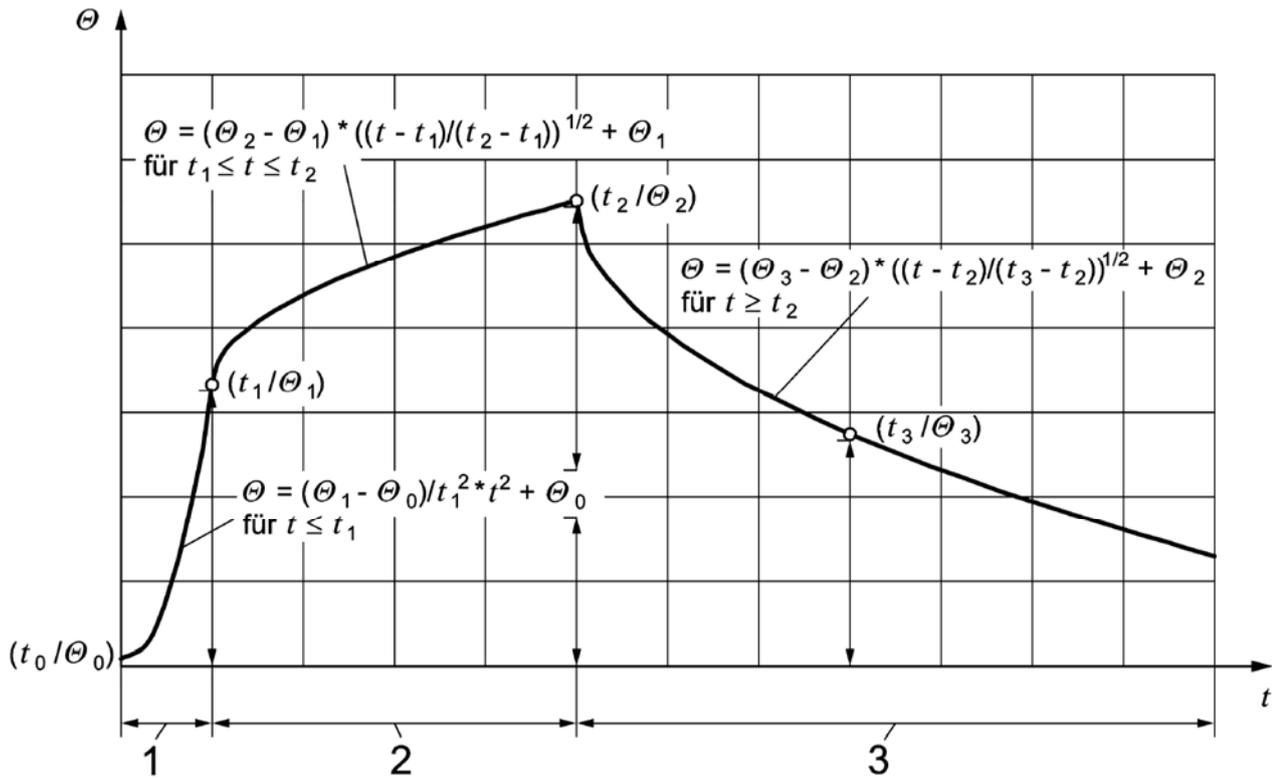


Abbildung 7-7: Schematische Darstellung der Temperaturzeitkurve nach dem vereinfachten Naturbrandmodell, entnommen aus (DIN EN 1991-1-2/NA:2010-12)

Für die Bestimmung der Brandverläufe ohne Eintritt des Flash-Overs und ohne Beeinflussung durch die Feuerwehr - Szenario a) - wurde das vereinfachte Modell aus (DIN EN 1991-1-2/NA:2010-12) ohne Abänderung verwendet. Durch Integration der Gleichungen für die Temperaturverläufe, in Abbildung 7-7 mit  $\Theta$  bezeichnet, über die Zeit  $t$ , wurden die jeweiligen Flächenintegrale der drei Brandphasen bestimmt. Sämtliche, für das Szenario a) verwendete Gleichungen sind im Anhang 2, Kapitel A2.a aufgeführt.

Für die Bestimmung des ETK-Äquivalents wurde das Flächenintegral über die Differenzenmethode ermittelt. Abbildung 7-8 zeigt den grafischen Verlauf der Temperatur sowie das zugehörige Flächenintegral der Normbrand- bzw. ETK-Beanspruchung.

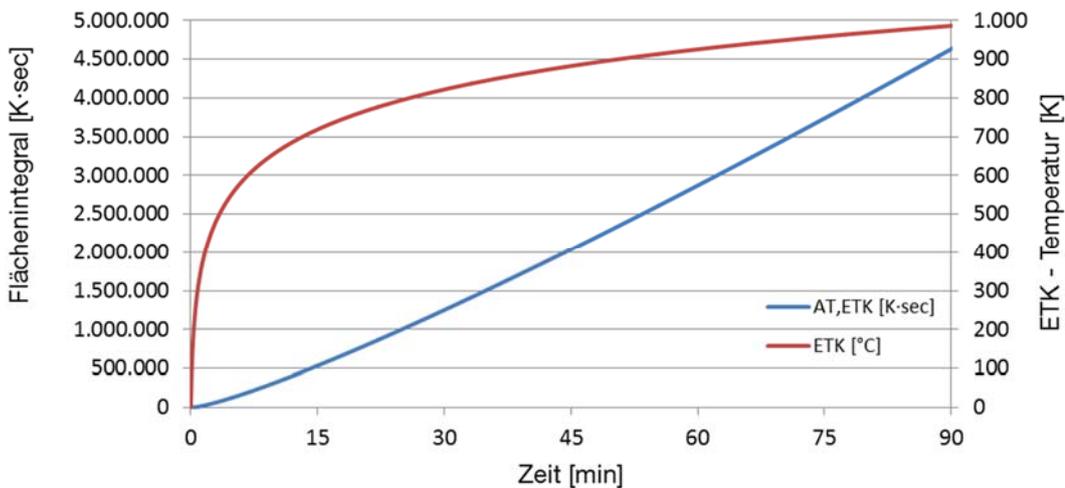


Abbildung 7-8: Grafische Darstellung des Flächenintegrals unter der Einheits-Temperatur-Zeitkurve (ETK)

Anhang 2, Kapitel A2.b enthält die Gleichungen für die Berechnung des natürlichen Brandverlaufes ohne Flash-Over mit Umsetzung von 70% der Brandlast in der Brandentwicklungsphase und ohne Einfluss der Feuerwehr. Kapitel A2.c enthält die Gleichungen für den analogen Brandverlauf, jedoch mit einer Verkürzung der Abkühlphase durch einen Löschangriff. Für beide Brandverläufe fehlt die Phase des Vollbrandes, da nach Umsetzung von 70% der Brandlast nach dem zu Grunde gelegten Modell der Beginn der Abkühlphase stattfindet.

Kapitel A2.d enthält die Gleichungen für den Brandverlauf ohne Flash-Over mit Einfluss der Feuerwehr während der Brandentwicklungsphase, Kapitel A2.e die Gleichungen für den Einfluss der Feuerwehr in der Vollbrandphase und Kapitel A2.f die Gleichungen mit einem Löschangriff in der Abkühlphase. Hier wird jeweils zum Zeitpunkt des abgeschlossenen Löschangriffs (Meldung „Feuer aus!“) der natürliche Brandverlauf gekappt. Das Kappen stellt aus Sicht des Verfassers dieser Arbeit einen konservativen Ansatz dar, da es bereits während der prognostizierten Dauer des Löschangriffs von vier bis fünf Minuten zu einer Reduktion der Brandbeanspruchung auf die Bauteile bzw. Schutzbekleidungen kommt. Diese Reduktion bleibt in den Berechnungen in dieser Arbeit unberücksichtigt.

Kapitel A2.g enthält einen Brandverlauf mit Eintritt des Flash-Overs ohne Einfluss der Feuerwehr. (DIN EN 1991-1-2/NA:2010-12) enthält hierzu lediglich die Gleichungen AA.29 und AA.30 für die Bestimmung des Zeitpunktes  $t_{1,fo}$  (Eintritt des Flash-Overs) sowie der zugehörigen Wärmefreisetzung  $\dot{Q}_{fo}$ . Da keine weiteren Angaben zum Verlauf nach Eintritt des Flash-Overs gemacht werden, wurde unter Verwendung der Empfehlungen für die Anstiegsraten der Wärmefreisetzung nach den Untersuchungen von (Wilk, 2013) und der Herleitung der Gleichungen [9] und [10] der Verlauf nach Einsetzen des Flash-Overs selbst bestimmt.

$$\dot{Q} = \dot{Q}_{fo} + (t - t_{fo}) \cdot v_{fo} \quad \text{und} \quad \dot{Q} = \dot{Q}_{max} \quad [9], [10]$$

Tabelle 7-1 enthält die in (Wilk, 2013) veröffentlichten Empfehlungen für die Anstiegsraten während des Flash-Overs in Abhängigkeit von drei vorherrschende Brandentwicklungsgeschwindigkeiten.

Tabelle 7-1: Empfehlung für Werte für Anstiegsraten bei Eintritt des Flashovers nach (Wilk, 2013)

Brandentwicklung	$t_g$ [sec]	$\alpha$ [ - ]	Wachstumsrate bei Flashover nach Wilk/Kotthoff [kW/s]
langsam	600	$2,8 \cdot 10^{-6}$	18,1
mittel	300	$1,1 \cdot 10^{-5}$	23,9
schnell	150	$4,4 \cdot 10^{-5}$	32,6

Für die Verwendung dieser Werte in der Simulation wurden, wie in Abbildung 7-9 dargestellt die drei Versuchswerte in einem Diagramm dargestellt, miteinander verbunden und durch eine Trendlinienanalyse zu zwei Gleichungen [11] und [12] aufbereitet.

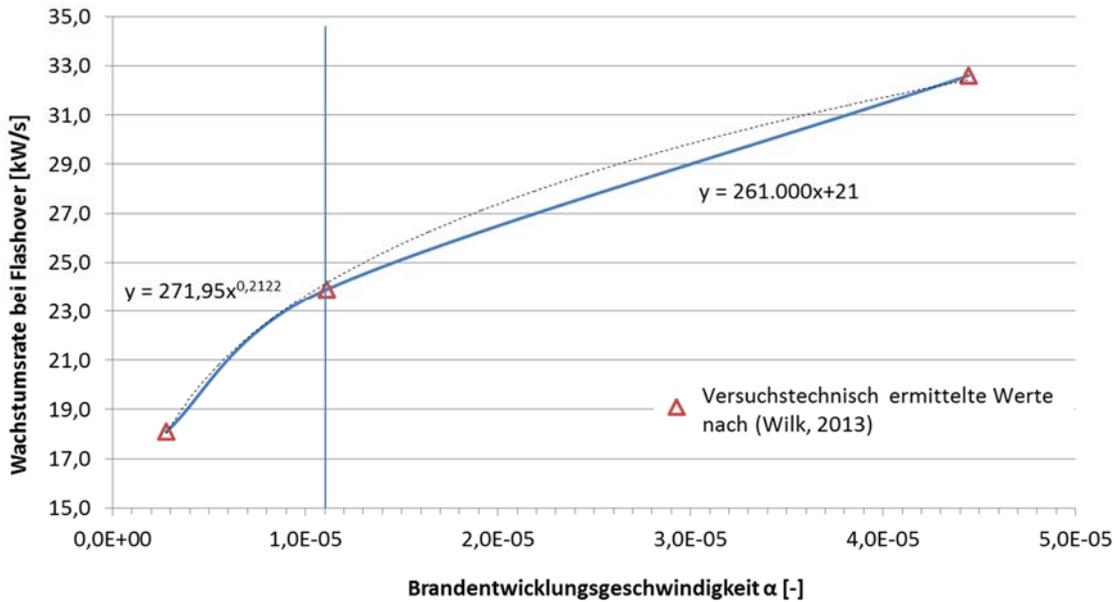


Abbildung 7-9: Grafische Darstellung der Versuchswerte nach (Wilk, 2013)

Gleichungsansatz für die Wachstumsrate bei Eintritt des Flash-Overs

ab Brandentwicklungsgeschwindigkeit „mittel“  $(\alpha > 1,1 \cdot 10^{-5})$   $v_{fo} = 261.000 \cdot \alpha + 21$  [11]

für Brandentwicklungsgeschwindigkeit „langsam“  $(\alpha \leq 1,1 \cdot 10^{-5})$   $v_{fo} = 271,95 \cdot \alpha^{0,2122}$  [12]

Mit den beiden vorgenannten Gleichungen kann dann der Zeitpunkt des Vollbrandes nach dem Flash-Over für jede beliebige Brandentwicklungsgeschwindigkeit bestimmt werden.

Kapitel A2.h und A2.i enthalten die Gleichungen für den Brandverlauf mit Flash-Over und Umsetzung von 70% der Brandlast in der Brandentwicklungsphase ohne Einfluss bzw. mit Einfluss der Feuerwehr in der Abkühlphase. Die Kapitel A2.j bis A2.l enthalten die restlichen drei Gleichungssysteme zur Berechnung der Brandverläufe mit Eintritt des Flash-Overs und Einfluss durch die Feuerwehr in der Flash-Over-Phase, der Vollbrandphase sowie der Abkühlphase.

Mit den vorgenannten Gleichungssystemen werden mit Ausnahme von Schwelbrandverläufen alle möglichen Brandverläufe in einem Raum bzw. einer Nutzungseinheit berücksichtigt und im Simulationsmodell verwendet. Zwar bleiben Schwelbrände auf Grund ihrer thermisch wesentlich geringeren Beanspruchung für die hier durchzuführenden Betrachtungen weitestgehend unberücksichtigt, die für die Simulation verwendete Verteilung zur Brandentwicklungsgeschwindigkeit nach (Holborn, et al., 2004), vgl. Tabelle 5-1, enthält jedoch einen erheblichen Anteil (30%) von Werten, die einer sehr langsamen Brandentwicklung entsprechen.

## 7.5 Auswertung der Simulationsergebnisse

Im Anschluss zur Simulation der in Kapitel 5.2.6 und Kapitel 7.2 beschriebenen Varianten wurden die erhaltenen Ergebnisse zusammengefasst und ausgewertet. Die Auswertung des zweiten Simulationsblockes mit der reduzierten Variablenanzahl erfolgte je Auswertegruppe (nach maximal berücksichtigtem Brandausmaß) zusammenfassend für die vier Verhältnisse der Öffnungsflächen zur Grundfläche (1/8, 1/6, 1/4 und 1/2). Abbildung 7-10 enthält beispielhaft die Auswertung der Simulationen für das Verhältnis der Öffnungsfläche von 1/6 und dem maximal berücksichtigtem Brandausmaß eines Wohnungsbrandes. Die gesammelten Auswertungen sind vollständig in Anhang 3 enthalten.

Die Auswertung der Versagenswahrscheinlichkeiten erfolgt durch Bestimmung des Gegenereignisses (Versagenswahrscheinlichkeit = 1 – Häufigkeit aus Simulation) zu den Einzelergebnissen der jeweiligen Varianten. Mit Hilfe der Graphen zu den jeweiligen Grundflächen  $A_f$  (15 bis 150 m<sup>2</sup>) lassen sich damit, wie im Beispiel in Abbildung 7-10 erkennbar, zunächst die Versagenswahrscheinlichkeiten  $p_{sim}$  eines vorhandenen Widerstandes eines Bauteils oder einer Schutzbekleidung für ein Brandereignis unter Berücksichtigung der Wahrscheinlichkeit eines einsetzenden Löschangriffs durch die Feuerwehr ablesen. Im Beispiel liegt demnach die Versagenswahrscheinlichkeit für eine Schutzbekleidung oder ein Bauteil mit einem nach ETK geprüften Widerstand (ETK-Äquivalent) von 30 Minuten in einem Raum von 45 m<sup>2</sup> bei rund  $p_{sim} = 12\%$  (in Diagramm mit Nummer 1 bezeichnet). Für dieselbe Raumgröße würde die Versagenswahrscheinlichkeit bei einem Widerstand von 15 Minuten bei rund  $p_{sim} = 28\%$  (Nummer 2) liegen.

Um die Ergebnisse zu den Versagenswahrscheinlichkeiten in das in Kapitel 3.3 beschriebene Sicherheitskonzept mit den vier Brandsicherheitsklassen überführen zu können, ist noch zusätzlich die Wahrscheinlichkeit der Entstehung eines Brandes zu berücksichtigen. Die Berücksichtigung erfolgt in Anlehnung an (DIN EN 1991-1-2/NA:2010-12) mit  $p_1$  als Wert für die Jährliche Auftretenswahrscheinlichkeit und  $p_{2,1}$  als Wert für die Wahrscheinlichkeit, dass der Entstehungsbrand nicht durch den Nutzer selbst gelöscht werden kann und der Löscheininsatz durch die Feuerwehr erfolgen muss.

Das Produkt der drei vorgenannten Wahrscheinlichkeiten entspricht dann der zugehörigen Versagenswahrscheinlichkeit eines Bauteils bzw. Schutzbekleidung, welches nach ETK für eine bestimmte Widerstandsdauer geprüft wurde. Diese Versagenswahrscheinlichkeit darf den entsprechenden Grenzwert  $p_f$  nach Kapitel 3.3, Tabelle 3-3 in der zugehörigen Brandsicherheitsklasse  $SK_{HB}$  nicht überschreiten.

$$p_f \leq p_1 \cdot p_{2,1} \cdot p_{sim} \quad [13]$$

- mit
- $p_f$  ... zulässige Versagenswahrscheinlichkeit  $p_f$  (Bezugszeitraum 1 Jahr)
  - $p_1$  .... jährliche Auftretenswahrscheinlichkeit eines Entstehungsbrandes in der NE in a<sup>-1</sup>  
mit  $p_1 = 1 - \exp(a \cdot A_f^b)$
  - a .... der Basiswert der bezogenen Brandentstehungshäufigkeit je Quadratmeter in (m<sup>2</sup> · a)<sup>-1</sup>
  - b .... von der Nutzung und Unterteilung der Nutzungseinheit (Raumzellen) abhängige Exponent
  - $A_f$  .... die Grundfläche der brandschutztechnisch abgetrennten Nutzungseinheit in m<sup>2</sup>
  - $p_{2,1}$  ... Ausfallwahrscheinlichkeit der manuellen Brandbekämpfung durch die Nutzer
  - $p_{sim}$  .... Versagenswahrscheinlichkeit des Bauteils oder der Schutzbekleidung auf Basis der parametrischen Brandbeanspruchung und der statistischen Berücksichtigung des Feuerwehreinsatzes

Die Zahlenwerte für a und b sind in DIN EN 1991-1-2\_NA Tabelle BB.3 für verschiedene Nutzungen angegeben. Für die hier vorliegende Wohnnutzung sind die Werte für  $a = 4,8 \cdot 10^{-5}$  und für  $b = 0,9$  festgelegt. Für eine Büronutzung ergeben sich Werte für  $a = 5,9 \cdot 10^{-5}$  und für  $b = 0,9$ .

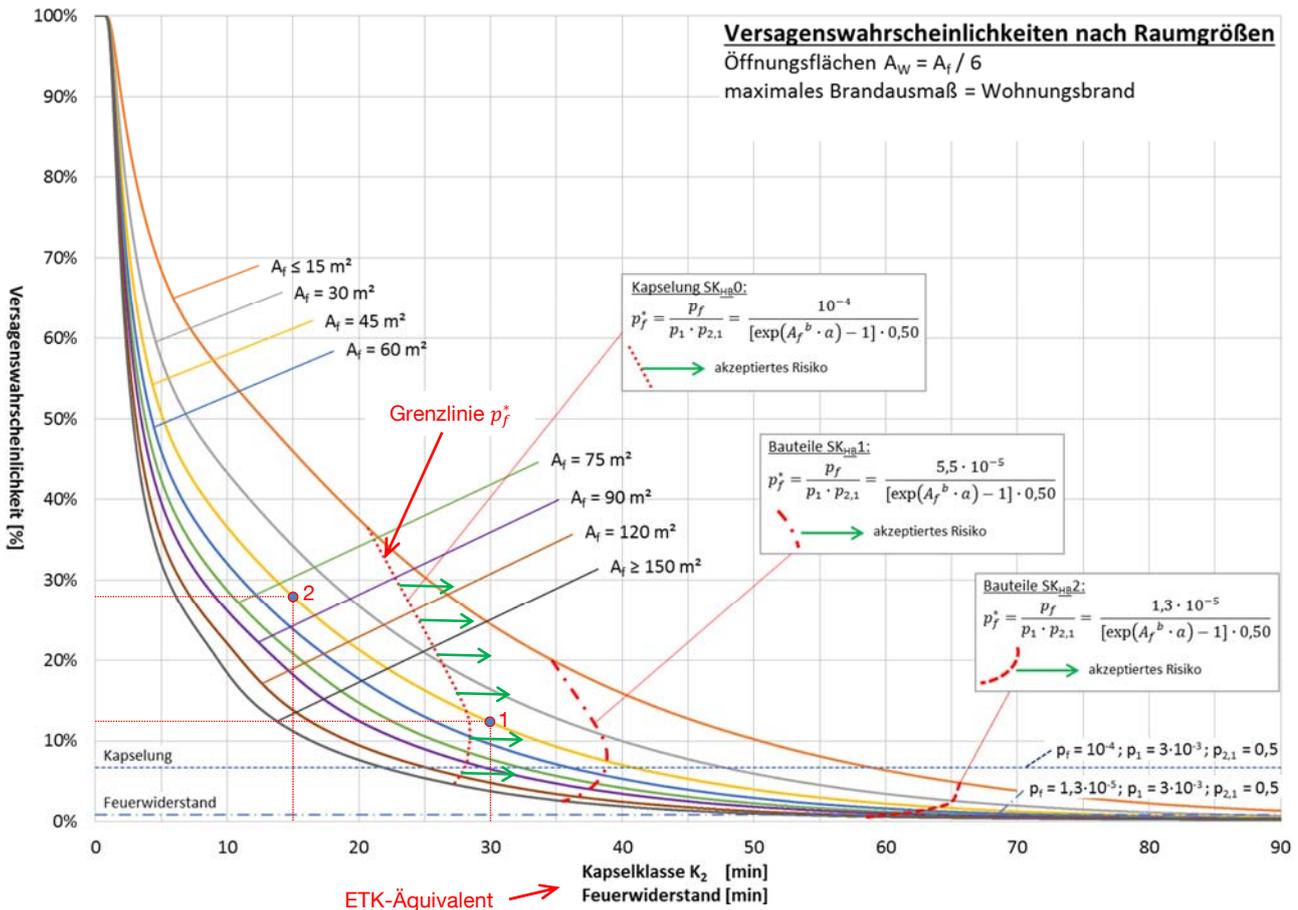


Abbildung 7-10: Auswertung der Simulationsergebnisse für Öffnungsverhältnis 1/6 und max. Wohnungsbrand

In den Diagrammen (Abbildung 7-10 bzw. Anhang 3) wurde zur künftig vereinfachten Anwendung die zulässige Versagenswahrscheinlichkeit in Form von Grenzkurven auf Basis der Grundflächen für die jeweilige Brandsicherheitsklasse nach Kapitel 3.3 eingetragen. Zur Bestimmung der Grenzkurven ergaben sich nachfolgende Gleichungen:

für Brandsicherheitsklasse SK<sub>HB0</sub>

$$p_f^* = \frac{p_f}{p_1 \cdot p_{2,1}} = \frac{10^{-4}}{[\exp(A_f^b \cdot a) - 1] \cdot p_{2,1}} \quad [14]$$

für Brandsicherheitsklasse SK<sub>HB1</sub>

$$p_f^* = \frac{p_f}{p_1 \cdot p_{2,1}} = \frac{5,5 \cdot 10^{-5}}{[\exp(A_f^b \cdot a) - 1] \cdot p_{2,1}} \quad [15]$$

für Brandsicherheitsklasse SK<sub>HB2</sub>

$$p_f^* = \frac{p_f}{p_1 \cdot p_{2,1}} = \frac{1,3 \cdot 10^{-5}}{[\exp(A_f^b \cdot a) - 1] \cdot p_{2,1}} \quad [16]$$

für Brandsicherheitsklasse SK<sub>HB3</sub>

$$p_f^* = \frac{p_f}{p_1 \cdot p_{2,1}} = \frac{10^{-6}}{[\exp(A_f^b \cdot a) - 1] \cdot p_{2,1}} \quad [17]$$

Die entsprechenden Grenzlinien sind in Abbildung 7-10 als punktierte für Klasse SK<sub>HB0</sub>, strich-punktierte für SK<sub>HB1</sub> bzw. gestrichelte Linie SK<sub>HB2</sub> erkennbar. Jeweils rechts der Grenzlinie, in der beispielhaften Abbildung anhand der grünen Pfeile dargestellt, befinden sich die Bereiche des akzeptierten Risikos bzw. der akzeptierten Versagenswahrscheinlichkeiten. Sämtliche ETK-äquivalenten Feuerwiderstände, die auf der rechten Seite der jeweiligen Grenzlinie liegen, werden demnach nach diesem Verfahren akzeptiert. Bezüglich der beiden vorher genannten Beispiele hat die Ausführung der Kapselbekleidung (SK<sub>HB0</sub>) im 45 m<sup>2</sup> großen Raum einen Widerstand von mindestens 28 Minuten, also K<sub>2</sub>30 (als Nummer 1 dargestellt) zu erfüllen. Der Widerstand von 15 Minuten (Nummer 2) befindet sich links der gepunkteten Grenzlinie und somit außerhalb des akzeptierten Risikobereichs.

Neben den Auswertungen für die Versagenswahrscheinlichkeiten wurden im Zuge der Simulationen für jede Auswertegruppe auch Sensitivitätsanalysen zu den unbestimmten Eingangsparametern durchgeführt. Abbildung 7-11 enthält beispielhaft die Darstellung der Sensitivitätsanalyse zu den Ergebnissen des Öffnungsflächenverhältnisses 1/6. Die entsprechenden Diagramme zu den Öffnungsverhältnissen 1/8, 1/4 und 1/2 sind in Anhang 3 enthalten.

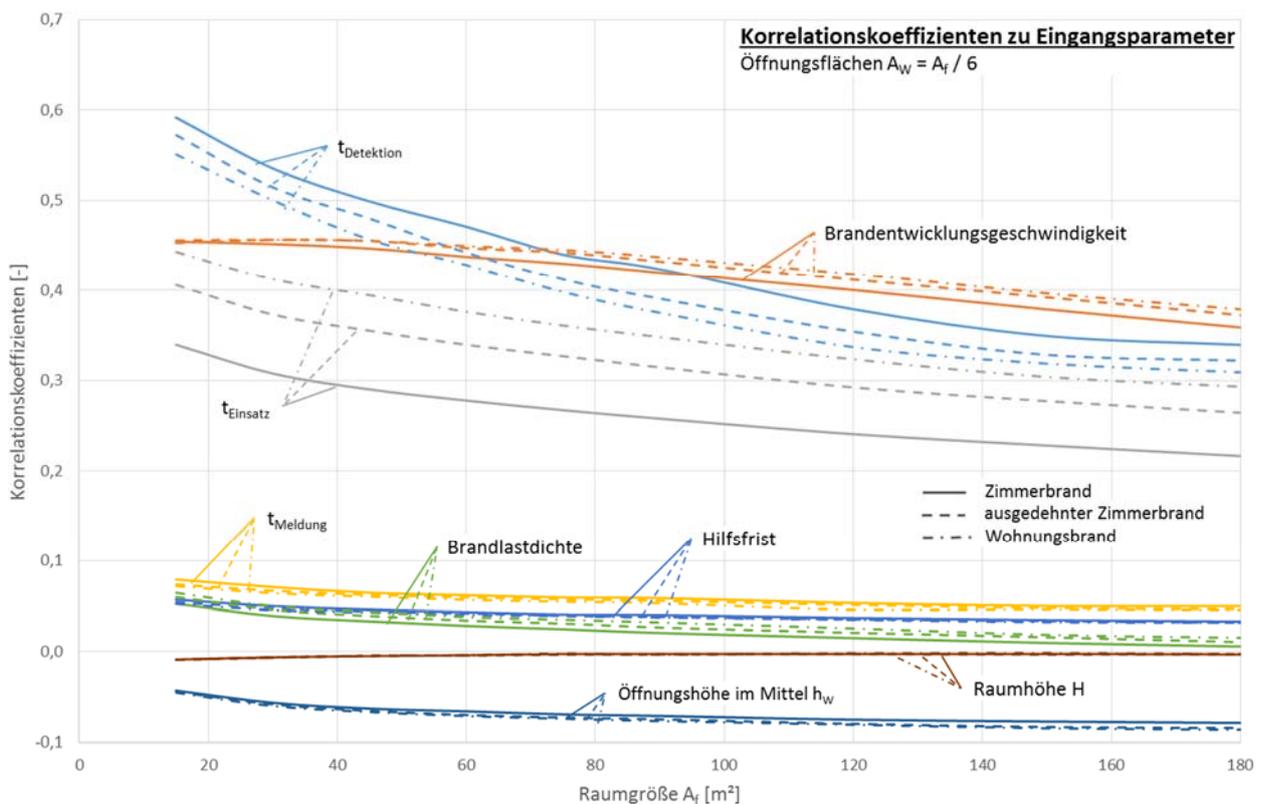


Abbildung 7-11: Darstellung der Sensitivitätsanalyse für die Ergebnisse zu dem Verhältnis der Öffnungsflächen von 1/6

Anhand dem Beispiel in Abbildung 7-11 kann sehr einfach abgelesen werden, dass für den Brandverlauf und die damit entstehende Beanspruchung auf Bauteile oder Schutzbekleidungen die drei Faktoren

Detektionszeit, Brandentwicklungsgeschwindigkeit und Einsatzzeit einen wesentlichen Einfluss haben. Die übrigen Faktoren Meldezeit, Brandlastdichte, Hilfsfrist, Öffnungshöhe im Mittel und die Raumhöhe spielen dagegen für das Ergebnis nur eine relativ untergeordnete Rolle. Da die Linien der Korrelationskoeffizienten über alle drei betrachtete Brandausmaße (Zimmerbrand – durchgezogene Linie, ausgedehnter Zimmerbrand – strichlierte Linie und Wohnungsbrand – strichpunktete Linie) im Verhältnis nahe zusammenliegen, muss hier bezüglich der Aussagen keine Unterscheidung getroffen werden. Dies gilt für die Sensitivitätsanalysen zu allen vier Öffnungsverhältnissen.

## 7.6 Bewertung der Simulationsergebnisse und Vorschlag für künftige Bauteilanforderungen

Anhang 3 enthält die Diagramme der einzelnen Simulationsergebnisse zu den Versagenswahrscheinlichkeiten und den Sensitivitätsanalysen in Abhängigkeit der Öffnungsverhältnisse und der Auswertegruppen bezogen auf das maximal berücksichtigte Brandausmaß.

Die nachfolgenden Tabellen enthalten eine Zusammenstellung der Ergebnisse der Auswertungen zu den Simulationen. Die Mindestanforderungen an den Widerstand wurden auf Basis der in den Diagrammen zur Versagenswahrscheinlichkeit eingetragenen Grenzlinien, vgl. Beschreibung in Kapitel 7.5, ermittelt. Die Werte in den Tabellen wurden jeweils auf volle Fünfer-Schritte aufgerundet. Daneben, in Klammern dargestellt, wurde als Vorschlag der zugehörige Widerstand nach europäischer Klassifizierung (DIN EN 13501-2:2010-02) eingetragen.

Tabelle 7-2: Notwendiger Widerstand nach den Brandsicherheitsklassen in Minuten (Vorschlag nach europäischer Klassifizierung) für die Auswertegruppe Zimmerbrand

Auswertegruppe Zimmerbrand	Verhältnis Öffnungsfläche $A_w$ zur Grundfläche $A_f$			
	1/8	1/6	1/4	1/2
Brandsicherheitsklasse				
SK <sub>HB0</sub>	40 (K <sub>2</sub> 45)	20 (K <sub>2</sub> 30)	20 (K <sub>2</sub> 30)	20 (K <sub>2</sub> 30)
SK <sub>HB1</sub>	55 (EI60)	30 (EI30)	25 (EI30)	25 (EI30)
SK <sub>HB2</sub>	90 (R90)	55 (R60)	45 (R45)	40 (R45)
SK <sub>HB3</sub>	> 90 Minuten	> 90 Minuten	> 90 Minuten	> 90 Minuten

Tabelle 7-3: Notwendiger Widerstand nach den Brandsicherheitsklassen in Minuten (Vorschlag nach europäischer Klassifizierung) für Auswertegruppe ausgedehnter Zimmerbrand

Auswertegruppe ausgedehnter Zimmerbrand	Verhältnis Öffnungsfläche $A_w$ zur Grundfläche $A_f$			
	1/8	1/6	1/4	1/2
Brandsicherheitsklasse				
SK <sub>HB0</sub>	45 (K <sub>2</sub> 45)	25 (K <sub>2</sub> 30)	25 (K <sub>2</sub> 30)	20 (K <sub>2</sub> 30)
SK <sub>HB1</sub>	70 (EI90)	35 (EI45)	30 (EI30)	30 (EI30)
SK <sub>HB2</sub>	90 (R90)	65 (R90)	55 (R60)	45 (R45)
SK <sub>HB3</sub>	> 90 Minuten	> 90 Minuten	> 90 Minuten	> 90 Minuten

Tabelle 7-4: Notwendiger Widerstand nach den Brandsicherheitsklassen in Minuten (Vorschlag nach europäischer Klassifizierung) für Auswertegruppe Wohnungsbrand

Auswertegruppe Wohnungsbrand	Verhältnis Öffnungsfläche $A_w$ zur Grundfläche $A_r$			
	1/8	1/6	1/4	1/2
SK <sub>HB0</sub>	60 (K <sub>2</sub> 60)	30 (K <sub>2</sub> 30)	25 (K <sub>2</sub> 30)	25 (K <sub>2</sub> 30)
SK <sub>HB1</sub>	80 (EI90)	40 (EI45)	35 (EI45)	30 (EI30)
SK <sub>HB2</sub>	> 90 (R90)	70 (R90)	60 (R60)	50 (R60)
SK <sub>HB3</sub>	> 90 Minuten	> 90 Minuten	> 90 Minuten	> 90 Minuten

Die Tabellen lassen einen klaren Trend erkennen. Einerseits erhöhen sich die Anforderungen an die Bauteile mit ansteigender Auswertegruppe, d.h. die geringsten Feuerwiderstände werden bei der Berücksichtigung von lediglich geringen Brandausmaßen bis maximal zum Zimmerbrand notwendig. Andererseits steigt die Anforderung an den Feuerwiderstand mit abnehmendem Verhältnis der Öffnungsfläche zur Grundfläche an. Vor Allem das Öffnungsverhältnis 1/8, wie es im Normalfall in Kellergeschossen vorkommt, erfordert über alle drei Auswertegruppen die höchsten Feuerwiderstände.

Mit Ausnahme des Öffnungsverhältnisses von 1/8 genügt über alle Auswertungen hinweg ein Widerstand von 30 Minuten für die Brandsicherheitsklasse SK<sub>HB0</sub>. Für die Klasse SK<sub>HB1</sub>, also für die raumabschließenden Bauteile, genügt überwiegend ein Feuerwiderstand von ebenfalls 30 Minuten. Nur beim zweitgeringsten Öffnungsverhältnis von 1/6 muss dieser in den beiden oberen Auswertegruppen auf 45 Minuten erhöht werden. Für die tragenden und aussteifenden Bauteile der Klasse SK<sub>HB2</sub> werden Feuerwiderstände zwischen 45 und 90 Minuten erforderlich, wobei der Anstieg ebenfalls klar dem im oberen Absatz beschriebenen Trend folgt.

Für die brandabschnittsbildenden Bauteile der Klasse SK<sub>HB3</sub> ergeben sich über alle Simulationen hinweg notwendige Feuerwiderstände von 90 bis 120 Minuten. Diese wurden in den Tabellen dann als > 90 Minuten dargestellt. Folgt man der Systematik der Bauordnungen, erfolgt damit eine „Deckelung“ der Werte auf 90 Minuten, allerdings würden zusätzliche Anforderungen an die Stoßbeanspruchung der Bauteile gestellt werden, die grundsätzlich wieder einen wesentlich robusteren Bauteilaufbau erfordern.

Die Sensitivitätsanalysen zeigen über alle Verhältnisse der Öffnungsflächen zur Grundfläche als auch über die Auswertegruppen hinweg einen gleichmäßigen Trend.

Die drei wichtigsten Einflussparameter sind, wie schon im vorhergehenden Kapitel dargestellt, der Zeitraum für die Brandentdeckung ( $t_{\text{Detektion}}$ ), die Brandentwicklungsgeschwindigkeit sowie die Einsatzzeit ( $t_{\text{Einsatz}}$ ). Der Grund für diesen dominanten Einfluss ist dabei in der Höhe der Streuung dieser Faktoren zu suchen. Während Parameter wie z.B. die Hilfsfrist oder die Brandlastdichte im Verhältnis nur sehr geringen Streuungen (28% bzw. 30%) ausgesetzt sind, kommt es bei den erstgenannten Parametern zu Streuungen mit Varianzen im Bereich von 100% und mehr. Aus dieser Erkenntnis heraus müssen die Anstrengungen des baulichen und anlagentechnischen Brandschutzes genau auf diese Bereiche fokussiert werden.

Der Zeitraum bis zur Detektion ist direkt abhängig von der eingesetzten Anlagentechnik. Wie in Kapitel 5.2.4 ausführlich beschrieben ist bereits mit der flächendeckenden Einführung der Rauchwarnmeldetechnik eine deutliche Verbesserung der statistischen Werte zu erwarten. Als wesentlich effektivere Maßnahme gegenüber der Installation singulärer Melder ist der Einsatz von Hausalarm-Anlagen zu werten. Diese sind heute mit einer großen Vielfalt an technischen Möglichkeiten auf dem Markt erhältlich. Die höchste Stufe der Detektionsmöglichkeiten stellt die aufgeschaltete Brandmeldeanlage dar. Wegen der vermeintlich hohen Zahl an Fehlauflösungen und damit verbundenen Fehleinsätzen der Feuerwehr wird diese im Bereich der Wohnnutzung jedoch nur ungern eingesetzt. Für die schnelle und unproblematische Weiterleitung des Alarms besteht jedoch auch bei Hausalarm-Anlagen die Möglichkeit, per Handknopfmeldung den Alarmruf an eine Dienststelle zu senden. Da für diese Art der Anlagen bislang noch keine Regelungen bezüglich der Auslegung, Wartung und Überprüfung vorhanden sind, besteht im baurechtlichen Verfahren jeweils die Problematik des Nachweises der Verwendbarkeit.

Der zweithöchste Einflussparameter, die Brandentwicklungsgeschwindigkeit, wird auch künftig wegen des nicht regelbaren Privatbereichs, welchen nicht öffentliche Räume darstellen, wenig bis nicht beeinflussbar sein. Zwar erhöht die Anordnung brennbarer Oberflächen in einem geringen bis mittleren Maß die Geschwindigkeit der Brandausbreitung, dies wird aus Sicht des Verfassers dieser Arbeit jedoch das Gesamtsystem nur unwesentlich beeinflussen. In jedem Fall sind ergänzend zu den bisherigen Erkenntnissen noch weitere Untersuchungen zum Raumbrandverhalten bei Vorhandensein brennbarer Bauteiloberflächen notwendig.

Der dritte wesentliche Einflussparameter ist die Einsatzzeit. Hier können durch einfache Maßnahmen wesentliche Verbesserungen geschaffen werden. Im Zuge der Auswertungen der Realdaten zu Brandereignissen war ein großer Anteil an Bränden deshalb im Einsatz (zeit-)aufwendig, da durch z.B. offen stehende Türen es zu einer massiven Verrauchung des ortsfesten Rettungs- und Angriffsweges gekommen ist. Durch den Einsatz von selbstauslösenden Feststellanlagen bei Kellertüren (leider üblicherweise „aufgekeilt“) oder durch selbstschließende Brandschutztüren als Wohnungsabschluss zum Treppenraum (wie sie z.B. in Schweden gefordert werden) könnte die Einsatzzeit wesentlich positiv beeinflusst werden. Aber auch organisatorische Brandschutzmaßnahmen zur Sensibilisierung der Hausbewohner sind künftig im Bereich des mehrgeschossigen Wohnbaus denkbar.

Zusätzlich ist die Erhöhung der Rauchabzugsflächen eine wirksame Maßnahme. Dementsprechend werden auch bereits des Öfteren bei mehrgeschossigen Gebäuden in Holzbauweise „Sicherheitstreppe“ in Form von außenliegenden, nicht durch Wände umschlossene Treppenläufe eingesetzt. Hier ist jedoch anzumerken, dass das nach außen legen von Treppenräumen nicht zwangsweise dem Bauen mit Holz geschuldet ist, sondern vielmehr eine sehr effektive Maßnahme darstellt, die für die Kompensation vielfältiger Abweichungen von den deskriptiven Regeln der Bauordnung herangezogen werden kann.

Im Bereich des Feuerwehreinsatzes können sich unterstützende Maßnahmen ebenfalls positiv auf den Verlauf und die benötigte Zeit auswirken. Als Beispiel ist hier die Anordnung von Steigleitungen innerhalb des Treppenraumes zu nennen. Diese führen zu einem wesentlich verkürzten Aufbau des Löschangriffs. Zusätzlich wären aus Sicht des Verfassers dieser Arbeit aber auch Feuerwehreinsatzpläne, wie sie sonst nur im Bereich von Sonderbauten eingesetzt werden, in reduzierter Form eine hilfreiche und den Einsatzerfolg fördernde Maßnahme. Gerade bei komplexeren Gebäudeformen ist durch diese Maßnahme eine Reduzierung der Erkundungszeit und eine Verkürzung der nachfolgenden Einsatzschritte zu erwarten.

Solche Einsatzpläne könnten analog oder digital (per Chip) an leicht und dauerhaft zugänglicher Stelle am Gebäude installiert werden. Eine ähnliche Vorgehensweise wird derzeit schon von der Automobilindustrie bei Fahrzeugen in Form von „Schnittplänen“ für die Rettungsmaßnahmen durch die Feuerwehr vorgehalten. Anhand der „Schnittpläne“ lassen sich schnell die geeigneten Stellen für das Aufbrechen eines Fahrzeuges finden, wodurch enorme Zeiteinsparungen und zusätzlich eine Minimierung des Verletzungsrisikos für die Einsatzkräfte erwartet werden.

Da die für die Brandintervention durch die Feuerwehr zugehörigen Eingangsparameter für die Simulation ohne Unterscheidung zwischen Gebäuden der Gebäudeklasse 4 und 5 vorgenommen wurde, können die Ergebnisse generell für sämtliche mehrgeschossige Gebäude bis zur Hochhausgrenze als gültig angesehen werden.

## 8 Zusammenfassung, Ergebnis und Ausblick

### 8.1 Zusammenfassung der Arbeit

Ziel dieser Arbeit ist die ingenieurtechnische Ermittlung realer Brandbeanspruchungen in Form von Temperatur-Zeitkurven für Bauteile und Schutzbekleidungen im Bereich des Wohn-, Büro- und Objektbaus mit Größen der Nutzungseinheiten kleiner als 400 m<sup>2</sup>. Aus dieser Betrachtung heraus sollen Ableitungen für einen Vorschlag zu notwendigen Widerständen von Schutzbekleidungen (Kapselgrößen K<sub>2</sub>30, K<sub>2</sub>45, K<sub>2</sub>60) sowie tragenden und/oder aussteifenden Bauteilen (Feuerwiderstände R bzw. EI) in mehrgeschossigen Gebäuden erfolgen.

Hierzu wurden in Kapitel 2 die möglichen Verfahren zur Durchführung von Brandrisikobewertungen ermittelt und auf die Verwendbarkeit für die vorliegende Zielstellung untersucht. Als am besten geeignete Methoden wurden die quantitativen Verfahren in Form stochastischer Analyseverfahren identifiziert. Für die weitere Arbeit wurde hierfür ein auf MS-Excel basierendes Tool (@RISK) zur Durchführung von Monte-Carlo-Analysen gewählt.

In Kapitel 3.3 wurde ein Ansatz für eine geeignete Verfahrenssystematik zur Klassifizierung von Bauteilen und Schutzmaßnahmen durch Einführung von Brandsicherheitsklassen für den Holzbau (SK<sub>HB</sub>) erarbeitet. Durch die Einführung der Brandsicherheitsklassen wird eine feingliederige Beurteilungsmöglichkeit von Bauteilen bzw. Maßnahmen in Hinblick auf deren Funktion und mögliches Schadenspotential geschaffen. Insgesamt wurden vier Klassen SK<sub>HB</sub>0 bis SK<sub>HB</sub>3 eingeführt, wobei letztere die höchste Stufe zur Sicherung von Brandabschnitten darstellt und dementsprechend die niedrigste Versagenswahrscheinlichkeit erfüllen muss.

Eine Betrachtung der ingenieurmäßigen Verfahren zur Ermittlung von Brandverläufen enthält Kapitel 4. Aus den zur Verfügung stehenden mathematischen Modellen zur Brandsimulation wurde die auf der Arbeit von (Zehfuß, 2004) basierende, empirisch abgeleitete Handrechenmethode, welche aktuell auch vom nationalen Anhang des Brandschutzteils des Eurocodes 1 (DIN EN 1991-1-2/NA:2010-12) übernommen wurde, gewählt. Diese Methode lässt sich nach einer weiteren Aufbereitung der Gleichungssysteme in das Analysetool @RISK einbinden. Eine Beschreibung des verwendeten Tools @RISK, den Aufbau der Simulationsrechnung sowie die verwendeten Gleichungssysteme enthalten Kapitel 7.1, 7.2 und 7.3 sowie Anhang 2. Insgesamt können mit den in dieser Arbeit erweiterten Gleichungssystemen zwölf mögliche Brandszenarien abgebildet werden. Diese zwölf berechenbaren Szenarien bilden theoretisch alle möglichen Brandverläufe ab.

Die verschiedenen Einflussparameter auf ein Brandereignis werden in Kapitel 5 diskutiert. Diese dienen im späteren Verlauf als streuende Eingangswerte für die probabilistische Analyse. Als maßgebliche Parameter werden die Wahrscheinlichkeit einer Brandentstehung, die Brandentwicklungsgeschwindigkeit, die Brandlasten bzw. -dichten, die Zeiträume für die Brandentdeckung und -meldung, die Wirksamkeit von Primärbrandbekämpfungsmaßnahmen eingehender untersucht und mit entsprechenden Verteilungskurven belegt. Zusätzlich wird in diesem Kapitel eine Studie für den Ansatz möglicher Anordnungen von Öffnungsflächen, -größen und Öffnungsfaktoren einer Nutzungseinheit bzw. eines Raumes durchgeführt. Auf Basis dieser Studie werden die Varianten für die späteren Simulationen festgelegt. Insgesamt wurden in einem ersten Schritt 140 verschiedene Varianten, aufgeteilt auf vier Verhältnisse von Öffnungs- zu Grundfläche (1/8, 1/6, 1/4, 1/2), festgelegt. In einem zweiten Schritt wurde später die zuvor große Anzahl an Varianten reduziert, indem mehrere das Ergebnis wenig beeinflussende Parameter zu unbestimmten

Variablen mit statistischen Verteilungen gewandelt wurden. Die Festlegung für den zweiten Simulationsblock enthält nur noch 32 Varianten.

In Kapitel 6 erfolgt schließlich die Diskussion sämtlicher Parameter, die den zeitlichen Verlauf der Brandintervention durch die Feuerwehr beeinflussen. Diese umfassen die Disposition, die Alarmierung, das Ausrücken und die Fahrt sowie alle am Einsatzort stattfindenden Maßnahmen wie die Erkundung- und Entwicklungszeit, den Zeitraum für die Personenrettung bis zum erfolgreichen Abschluss der Löschmaßnahmen. Um diese so realitätsnah wie möglich abbilden zu können, werden die einzelnen Schritte aufbereitet und beschrieben sowie mit Zeitansätzen aus der Literatur belegt. Neben der Literaturrecherche werden umfangreiche Erhebungen aus realen Daten zu Feuerwehreinsätzen einer ausgewählten deutschen Großstadt vorgenommen. Insgesamt werden im Rahmen der Datenerhebung rund 300, in Teilbereichen sogar 440 Einsätze aus einem Zeitraum von drei Jahren erfasst und ausgewertet. Um die Aussagekraft dieser Einsatzdaten zu verstärken, wurde eine Verknüpfung mit Daten aus der digitalen Gebäudedatei dieser Großstadt vorgenommen. Somit konnten zu jedem Brandeinsatz zusätzliche Erkenntnisse über die Art, Alter, Nutzung, Anzahl der Stockwerke, Größe (Gebäudeklasse + durchschnittliche Größe der Nutzungseinheiten) des Gebäudes gewonnen werden. Sämtliche erfassten Brandereignisse wurden anhand ihrer Charakteristik (Brandausmaß) in drei Gruppen zusammengefasst. Die erste Gruppe mit einer Auftretenshäufigkeit von 91% umfasst die Ereignisse „angebranntes Essen“, „Kleinf Feuer“ und „Zimmerbrand“. Die beiden anderen Gruppen umfassen zusätzlich dazu die „ausgedehnten Zimmerbrände“ bzw. alle vorhergehenden Brandausmaße inklusive der „Wohnungsbrände“.

Die ermittelten Einsatzzeiten der Maßnahmen am Brandort wurden entsprechend kumulativ anhand dieser drei Gruppen ausgewertet. So enthält die dritte Gruppe (maximales Brandausmaß = Wohnungsbrand) die Verteilungen aus den Einsätzen aller vordefinierten Brandereignisse. Da das auftretende Brandausmaß wesentlich von der frühzeitigen Erkennung des Brandes abhängt und jegliche Anordnung von Brandfrüherkennungsmaßnahmen einen positiven Einfluss darauf hat, wurden für die Simulation der Varianten aus Kapitel 5 die notwendigen Eingangsparameter zur Brandintervention auf die drei Gruppen bezogen.

Eine Auswertung der Simulationsergebnisse enthält Kapitel 7.5, die Bewertung der Ergebnisse sowie ein Vorschlag für künftige Bauteilanforderungen enthält Kapitel 7.6.

## **8.2 Ergebnisdiskussion**

Das Gesamtergebnis der Simulationen (vgl. Tabelle 7-2) zeigt, dass mittels der Anwendung von Ingenieurmethoden und der damit spezifischeren Betrachtung von Gebäudestrukturen und abwehrenden Maßnahmen eine Reduktion der Anforderungen an den Feuerwiderstand bzw. die Schutzwirkung brandschutztechnisch notwendiger Bekleidungen möglich ist.

Die Werte im Bereich des Öffnungsverhältnisses von 1/8 (Öffnungsfläche zur Grundfläche) bestätigen, dass für Räume mit geringen Öffnungsflächen höhere Widerstände zur Erfüllung der Schutzziele notwendig sind. Bei den betreffenden Werten kann eine gute Übereinstimmung mit den baurechtlichen

Vorgaben für Kellergeschosse abgelesen werden. Kellergeschosse haben im Allgemeinen nur geringe Öffnungsflächen und können deshalb für den Vergleich gut herangezogen werden.

Betrachtet man die Varianten mit den größeren Verhältnissen von Öffnungsfläche zu Grundfläche, so lässt sich im Mittel eine gute Tendenz zu den Festlegungen in den überarbeiteten Schweizer Brandschutzvorschriften VKF-2015 (<http://www.praever.ch/de/bs/bsv2015>) erkennen. Im Wesentlichen wird auch hier nach dem aktuellen Stand eine Tragsicherheit von mehrgeschossigen Gebäuden bis zur Hochhausgrenze im Brandfall auf 60 Minuten als ausreichend erachtet, während gegen den Verlust des Raumabschlusses zwischen verschiedenen Nutzungseinheiten nur ein Widerstand von 30 Minuten gefordert wird. Analoge Ergebnisse liefern auch die in dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen.

Auf Basis der Simulationsergebnisse kann bezüglich der vom deutschen Baurecht durch die Musterrichtlinie für hochfeuerhemmende Holzbauteile (M-HFHolzR, 2004) geforderten Schutzbekleidung brennbarer Konstruktionsbauteile von einer K<sub>2</sub>60-Kapselung eine Reduktion auf K<sub>2</sub>30, also um 30 Minuten vorgenommen werden. Ausführungstechnisch bedeutet dies eine Reduktion auf eine einlagige mineralische Gipsbekleidung mit 18 mm Dicke.

Bezüglich der Ausbildung von Brandabschnitten ergeben die Simulationen durchwegs einen notwendigen Widerstand > 90 Minuten, wodurch die Bauteilanforderungen deutlich über dem derzeitigen baurechtlichen Anforderungen liegen würden. Es ist zu vermuten, dass die im Baurecht verankerten Anforderungen nach oben „gedeckelt“ wurden und ggf. eine theoretische Versagenswahrscheinlichkeit oberhalb des in der Simulation angenommenen Wertes von  $p_f = 10^{-6}$  stillschweigend akzeptiert wird. Andererseits kann auch angenommen werden, dass ein Großteil der als unter mechanischer Stoßbeanspruchung feuerbeständig ausgeführten Brandwände einen deutlich späteren Versagenszeitpunkt aufweist und deshalb statistisch keine höheren Versagenshäufigkeiten zu verzeichnen sind. Ursachen für das Versagen von Brandwänden gehen üblicherweise auf Mängel in der Ausführung, wie fehlerhafte Schottungen, über die Brandwand hinweggeführte brennbare Bauteile, etc., zurück.

### 8.3 Ausblick

Bei allen untersuchten Modellen zur Ermittlung von Naturbrandkurven war eine Berücksichtigung brennbarer Oberflächen im Raum nicht oder nicht ohne weiteres möglich. An dieser Stelle sind umfangreiche Forschungsarbeiten im Rahmen von Realbrandversuchen mit anschließender Modellierung der Ergebnisse notwendig. Wünschenswert ist eine Anpassung des verwendeten Handrechenmodells nach (Zehfuß, 2004) bzw. (DIN EN 1991-1-2/NA:2010-12), da sich dieses hervorragend für die Einbindung in probabilistische Modelle eignet.

Im Zuge der experimentellen Durchführung von Raumbrandversuchen sollte gleichzeitig auch eine Verifizierung der in dieser Arbeit angenommenen Äquivalenz zwischen den Flächenintegralen unterhalb von Naturbrand- und Einheits-Temperatur-Zeitkurve (vgl. Kap. 7.3) erfolgen. An dieser Stelle lassen sich wesentlich besser geeignete Vergleichsverfahren entwickeln. Die Verwendbarkeit solcher Äquivalenzbetrachtungen würde zu deutlichen Vereinfachungen in der Anwendung von Ingenieurverfahren im Brandschutz führen.

Bei den anlagentechnischen Schutzmaßnahmen besteht für die mehrgeschossigen Gebäude Forschungsbedarf vor allem in Hinblick auf die Zusammenstellung technischer Lösungen zur Brandfrüherkennung. Da wegen der erhöhten Gefahr von Missbrauch und Fehlfunktionen automatische Brandmeldeanlagen von der Feuerwehr grundsätzlich für Wohngebäude abgelehnt werden, sind Lösungen in Richtung ausgereifter und ertüchtigter Hausalarmanlagen mit manueller Alarmweiterleitung zu erforschen und für eine Verwendbarkeit im baurechtlichen Sinne aufzubereiten.

Einen großen Beitrag zum Verständnis der wesentlichen Einflüsse bei Brandereignissen konnte die in dieser Arbeit durchgeführte Auswertung realer Einsatzdaten bereits liefern. Durch eine Ausweitung dieser Untersuchungen wird es möglich sein, die getroffenen Annahmen zu bestätigen bzw. statistisch genauer zu belegen. Die bisherige Auswertung der Einsatzzeiten lässt vermuten, dass einsatztechnisch keine signifikanten Unterschiede zwischen der Gebäudeklasse 4 und 5 bestehen. Um diese Erkenntnis zweifelsfrei zu belegen, ist jedoch eine weit höhere Anzahl an Datensätzen notwendig. Ebenso ist es notwendig, Daten aus mehreren Großstädten für die Analyse heranzuziehen und diese im Anschluss auf die Untersuchung Freiwilliger Feuerwehren des ländlichen Bereichs auszuweiten. Hierzu müsste jedoch ein bisher noch nicht erfolgter Zugriff auf die Datenbanken des IKO-Vergleichsrings oder ein zentraler Zugriff auf die Datenspeicher der integrierten Leitstellen ermöglicht werden.

## 9 Literaturverzeichnis

**AGBF. 2000.** *Einsatzgrenzen von Drehleitern und tragbaren Leitern in Abhängigkeit der zu rettenden Personenzahlen; Sitzungsergebnis.* Bonn : AGBF; Arbeitsgemeinschaft der Leiter der Berufsfeuerwehren in der Bundesrepublik Deutschland, 2000.

—. **1998.** *Qualitätskriterien für die Bedarfsplanung von Feuerwehren in Städten.* Bonn : AGBF; Arbeitsgemeinschaft der Leiter der Berufsfeuerwehren in der Bundesrepublik Deutschland, 1998.

**AVBayFwG. 2014.** *Verordnung zur Ausführung des Bayerischen Feuerwehrgesetzes (AVBayFwG).* München : Bayerische Staatsministerium des Innern, 2014.

**Babrauskas, Vytenis und Williamson, Robert Brady. 1978.** *The Historical Basis of Fire Resistance Testing — Part I & II.* s.l. : Fire Technology , Volume 14 Issue 3, pp 184-194 & Volume 14 Issue 4, pp 304-316, 1978.

**Bart, B., Kotthoff, I. und Wiederkehr, R. 2009.** *Lignum-Dokumentation Brandschutz 7.1 - Aussenwände - Konstruktion und Bekleidungen.* Zürich, Schweiz : LIGNUM, SIA, MFPA, BFH AHB, VSH, 2009.

**Bauministerkonferenz. 2014.** *Liste der Technischen Baubestimmungen.* Berlin : Konferenz der für Städtebau, Bau- und Wohnungswesen zuständigen Minister und Senatoren der Länder (ARGEBAU) , 2014.

**Beyerle, Gert, et al. 1978.** *Grundlagenuntersuchungen für die Entwicklung verbesserter Feuerwehrfahrzeuge zur Optimierung der Leistungsfähigkeit bei der Brandbekämpfung und anderen Einsätzen.* s.l. : Dr.-Ing. h.c. F. Porsche Aktiengesellschaft, Entwicklungszentrum Weissach, 1978.

**BIS.HH, Freie und Hansestadt Hamburg, Behörde für Inneres und Sport. 2010.** *Jahresbericht Feuerwehr Hamburg.* 2010.

**BK.SN, Brand- und Katastrophenschutzamt, Landeshauptstadt Dresden. 2010.** *Jahresbericht.* 2010.

**Blagojevic, Milan Dj. und Pesic, Dusica J. 2011.** *A new curve for temperatur-time relationship in compartment fire.* s.l. : THERMAL SCIENCE, Vol. 15, No. 2, pp. 339-352, 2011.

**Blume, Gary Werner. 2003.** *Ingenieurmodell zur brandschutztechnischen Bemessung von Bauteilen auf der Basis von experimentell ermittelten Verbrennungseffektivitäten; Dissertation.* s.l. : Fachbereich für Bauingenieurwesen der Technischen Universität Carolo-Wilhemina zu Braunschweig, 2003.

**BRD, Bundesministerium der Justiz -. 1949.** *Grundgesetz für die Bundesrepublik Deutschland.* Berlin : Internetquelle [www.juris.de](http://www.juris.de), 1949.

**Bregulla, J., et al. 2003.** *Barriers to the enhanced use of wood in Europe: Particular attention to the regulatory barriers.* Garston, Watford : BRE Construction Division, , 2003.

**Brushlinsky, N.N., et al. 2014.** *World Fire Statistics 2014, Nr.19.* Russia, Germany, USA : Center of Fire Statistics of CTIF, 2014.

**Carvalho, J. 2006.** *Measuring fire service performance: a comparative study.* s.l. : International Journal of Public Sector Management, Jg. 19, 2006, Heft 2, 2006.

**Cimolino, et al. 2004.** *Atemschutz - Sicheres und effizientes Vorgehen, Suchverfahren, Notfalltraining.* Landsberg : ecomed Verlagsgesellschaft AG & Co.KG, 2004.

**Dautermann, D. 2013.** *Masterarbeit: Ingenieurmethoden im Brandschutz - Ermittlung von Einsatzzeiten der Feuerwehr im Brandeinsatz in mehrgeschossigen Gebäuden auf Basis realer Einsatzdaten.* s.l. : Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion, TU München (unveröffentlicht), 2013.

—. **2012.** *Studienarbeit: Ingenieurmethoden im Brandschutz - Ermittlung von Einsatzzeiten der Feuerwehr im Brandfall mit Fokus auf die Personenrettung in mehrgeschossigen Gebäuden.* s.l. : Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion, TU München, 2012.

**DBT2013, Antwort der Bundesregierung – Drucksache. 2013.** *Sachstand und Perspektiven für den Holzbau im privaten Sektor.* Drucksache 17/12893, WWW : Deutscher Bundestag, 17. 04 2013.

**Dehne, Michael. 2003.** *Dissertation: Probabilistisches Sicherheitskonzept für die brandschutztechnische Bemessung.* s.l. : Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz, Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig, 2003.

**Department for Communities and Local Government. 2013.** *Fire statistics, Great Britain 2012 to 2013.* London : s.n., 2013.

**DETR. 1992.** *UK Building Regulations Approved Document B.* Great Britain : Department of the Environment, Transport and the Regions, 1992.

**DIN 14010:2005-10.** *Angaben zur statistischen Erfassung von Bränden.* s.l. : Beuth-Verlag.

**DIN 18230-1:2010-09.** *Baulicher Brandschutz im Industriebau - Teil 1: Rechnerisch erforderliche Feuerwiderstandsdauer.* Berlin : NA 005-52-30 AA „Baulicher Brandschutz im Industriebau (DIN 18230-1)“; beuth-Verlag.

**DIN 25424:1990-04.** *Fehlerbauanalyse; Normenreihe Teil 1 "Methode und Bildzeichen" und Teil 2 " Handrechenverfahren zur Auswertung eines Fehlerbaumes".* Berlin : beuth-Verlag.

**DIN 4102-2:1977-09.** *Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen; Bauteile, Begriffe, Anforderungen und Prüfungen.* Berlin : Fachbereich „Einheitliche Technische Baubestimmungen" des NABau; DIN.

**DIN 5034-1:2011-07.** *Tageslicht in Innenräumen - Teil 1: Allgemeine Anforderungen.* Berlin : Arbeitsausschuss NA 058-00-06 AA „Innenraumbelichtung mit Tageslicht“; beuth-Verlag.

**DIN EN 13501-2:2010-02.** *Klassifizierung von Bauprodukten und Bauarten zu ihrem Brandverhalten - Teil 2: Klassifizierung mit den Ergebnissen aus den Feuerwiderstandsprüfungen, mit Ausnahme von Lüftungsanlagen.* Berlin : Komitee CEN/TC 127 „Baulicher Brandschutz“ / Arbeitsausschuss NA 005-52-02 AA „Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen — Bauteile“.

**DIN EN 1363-1:2012-10.** *Feuerwiderstandsprüfungen - Teil 1: Allgemeine Anforderungen; Deutsche Fassung EN 1363-1 : 2012.* s.l. : Beuth-Verlag.

**DIN EN 1990:2010-12.** *Eurocode 0: Grundlagen der Tragwerksplanung (EN1990:2002+A1:2005 +A1:2005/AC:2010).* s.l. : CEN/TC 250 EUROPÄISCHES KOMITEE FÜR NORMUNG; beuth-Verlag.

**DIN EN 1991-1-1:2010-12.** *EC 1 Teil 1-1: Allgemeine Einwirkungen auf Tragwerke - Wichten, Eigengewicht und Nutzlasten im Hochbau.* s.l. : CEN - EUROPÄISCHES KOMITEE FÜR NORMUNG.

**DIN EN 1991-1-2/NA:2010-12.** *DIN EN 1991-1-2/NA - Nationaler Anhang - National festgelegte Parameter zu Eurocode 1 Teil 1-2: Allgemeine Einwirkungen - Brandeinwirkungen auf Tragwerke.* Berlin : Normenausschuss Bauwesen (NABau), Arbeitsausschuss NA 005-52-22 AA „Konstruktiver baulicher Brandschutz (Spiegelausschuss zu Teilbereichen von CEN/TC 250)“.

**DIN EN 1991-1-2:2010-12.** *EC 1 Teil 1-2: Allgemeine Einwirkungen - Brandeinwirkungen auf Tragwerke.* Berlin : CEN - EUROPÄISCHES KOMITEE FÜR NORMUNG.

**DIN EN 1991-1-7/NA:2010-12.** *EC1-1-7/NA - Nationaler Anhang - National festgelegte Parameter zu Eurocode 1 Teil 1-7: Allgemeine Einwirkungen - Außergewöhnliche Einwirkungen.* Berlin : Normenausschuss Bauwesen (NABau), Arbeitsausschuss NA 005-51-02 AA „Einwirkungen auf Bauten (Sp CEN/TC 250/SC 1)“.

**DIN EN 31010:2010-11.** *Risikomanagement - Verfahren zur Risikobeurteilung (IEC/ISO 31010:2009; VDE 0050-1).* Berlin : beuth-Verlag.

**DIN EN 54-1:2011-06.** *Brandmeldeanlagen Teil 1: Einleitung.* Berlin : Technischen Komitee CEN/TC 72 „Brandmelde- und Feueralarmanlagen“ / Arbeitsausschuss NA 031-02-01 AA „Brandmelde- und Feueralarmanlagen“.

**DIN EN 60300-3-1:2005-05.** *Zuverlässigkeitsmanagement - Teil 3-1: Anwendungsleitfaden - Verfahren zur Analyse der Zuverlässigkeit - Leitfaden zur Methodik (IEC 60300-3-1:2003).* Berlin : beuth-Verlag.

**DIN EN 61025:2007-08.** *Fehlzustandsbaumanalyse (IEC 61025:2006).* Berlin : beuth-Verlag.

**DIN EN 62502:2011-06.** *Verfahren zur Analyse der Zuverlässigkeit - Ereignisbaumanalyse (ETA) (IEC 62502:2010; VDE 0050-3).* Berlin : beuth-Verlag.

**Drysdale, Dougal. 1999.** *An Introduction to Fire Dynamics.* Edinburgh : JOHN WILEY & SONS, 1999.

**E DIN 4102-20:2010-03.** *Entwurf zur DIN 4102-20: Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen - Besonderer Nachweis für das Brandverhalten von Außenwandbekleidungen, als Bestandteil der Zulassungsgrundsätze des Deutschen Instituts für Bautechnik.* Berlin : Normenausschuss NA 005-52-01 AA N 1247; Deutsches Institut für Bautechnik.

**EN 61508-1:2011-02.** *EN 61508 Funktionale Sicherheit sicherheitsbezogener elektrischer/elektronischer/programmierbarer elektronischer Systeme - Teil 1: Allgemeine Anforderungen.* s.l. : Beuth-Verlag.

**Farmers, G. und Messerer, J. 2008.** „Rettung von Personen“ und „wirksame Löscharbeiten“ - bauordnungsrechtliche Schutzziele mit Blick auf die Entrauchung - Grundsatzpapier. s.l. : Fachkommission Bauaufsicht, 2008.

**FEMA. 2011.** *Topical Fire Report Series, Fire Death Rate Trends: An International Perspective.* Emmitsburg, Maryland 21727 : U.S. Department of Homeland Security • U.S. Fire Administration, 2011. Volume 12, Issue 8 / July 2011.

**Fontana, Mario, et al. 2002.** *Statistische Untersuchungen zu Gebäudebränden. Zahlen aus der Schweiz.* Köln : s+s report (Jg.: 9, Nr.1, Seite 18-23), 2002.

**Frantzich, H. 1998.** *Uncertainty and Risk Analysis in Fire Safety Engineering (Report LUTVDG/(TVBB-1016)).* s.l. : Lund University Sweden; Institute of Technology; Department of Fire Safety Engineering, 1998.

**FwDV 3. 2008.** *Feuerwehr-Dienstvorschrift FwDV 3 „Einheiten im Lösch- und Hilfeleistungseinsatz“.* s.l. : Ausschuss Feuerwehrangelegenheiten, Katastrophenschutz und zivile Verteidigung (AFKzV), 2008.

**FwDV100. 1999.** *Feuerwehr-Dienstvorschrift 100 (FwDV 100) - Führung und Leitung im Einsatz - Führungssystem.* s.l. : Ausschuss Feuerwehrangelegenheiten, Karastrophenschutz und zivile Verteidigung (AFKzV), 1999.

**GDV, Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e.V. 2001.** *VdS 2023: Elektrische Anlagen in baulichen Anlagen mit vorwiegend brennbaren Baustoffen - Richtlinien zur Schadenverhütung.* Köln : VdS Schadenverhütung GmbH, 2001.

**Grimwood, T. Paul. 1992.** *Fog Attack: Firefighting Strategy and Tactics - an International View.* Surrey (UK) : FMJ International Publications, 1992.

**Hageböiling, D. und Fortkamp, M. 1990.** *Der zweite Rettungsweg.* s.l. : BRANDSchutz; Deutsche Feuerwehrzeitung 44, 1990.

**Hilgers, Dennis. 2008.** *Performance Management - Leistungserfassung und Leistungssteuerung in Unternehmen und öffentlichen Verwaltungen.* s.l. : Verlag Dr. Th. Gabler | GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden, 2008.

**Holborn, P.G., Nolan, P.F. und Golt, J. 2004.** *An analysis of fire sizes, fire growth rates and times between events using data from fire investigations.* s.l. : Fire Safety Journal 39 (Page 481-524), 2004.

**Hosser, D. 2013.** *Leitfaden - Ingenieurmethoden im Brandschutz.* Altenberge ; Braunschweig : TWB, Technisch-Wissenschaftlicher Beirat der Vereinigung zur Förderung des Deutschen Brandschutzes e.V. (vfdb), 2013.

—. **2009.** *Leitfaden - Ingenieurmethoden im Brandschutz.* Altenberge ; Braunschweig : TWB, Technisch-Wissenschaftlicher Beirat der Vereinigung zur Förderung des Deutschen Brandschutzes e.V. (vfdb), 2009.

**Hosser, D. und Kampmeier, B. 2011.** *Grundlagenuntersuchungen für einen Vorschlag zur Überarbeitung der Muster-Holzbaurichtlinie.* Berlin : Bautechnik; Ernst&Sohn, 2011.

**Hosser, Dietmar, et al. 2008.** *Erarbeitung eines Sicherheitskonzeptes für die brandschutztechnische Bemessung unter Anwendung von Ingenieurmethoden gemäß Eurocode 1 Teil 1-2 (Sicherheitskonzept zur Brandschutzbemessung).* Braunschweig : Fraunhofer IRB-Verlag, 2008.

**IM.SH, Innenministerium des Landes Schleswig-Holstein. 2010.** *JAHRESSTATISTIK DER FEUERWEHREN.* Kiel : s.n., 2010.

**IM.TH, Thüringer Innenministerium. 2010.** *Jahresbericht über Einsätze im Brandschutz, in der Allgemeinen Hilfe und im Katastrophenschutz im Freistaat Thüringen.* Erfurt : s.n., 2010.

**Ingberg, Simon H. 1928.** *Tests of the Severity of Building Fires.* s.l. : National Fire Protection Association, Quarterly 22, p43-61, 1928.

**Jaldell, H. 2002.** *Essays on the Performance of Fire and Rescue Services.* Göteborg : Economic Studies No. 116, Department of Economics, 2002.

**Kampmeier, Björn. 2008.** *Risikogerechte Brandschutzlösungen für den mehrgeschossigen Holzbau.* s.l. : TU Braunschweig, Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz -iBMB-, 2008.

**Karlsson, Björn und Quintiere, James G. 2000.** *Enclosure Fire Dynamics.* Boca Raton, Florida : CRC Press LLC, 2000.

**Kerber, Stephen. 2013.** *Analysis of Changing Residential Fire Dynamics and Its Implications on Firefighter Operational Timeframes.* s.l. : UL Firefighter Safety Research Institute, 2013.

**Klein, Jochen. 2009.** *Dissertation: Zum Verhalten von Tragwerken bei natürlicher Brandeinwirkung unter Berücksichtigung technischer Massnahmen.* s.l. : Institut für Baustatik und Konstruktion, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, 2009.

**Klingelhöfer H.G., Rademacher H., Sauerbrey T. 2002.** *Erprobung eines Prüfverfahrens zum Brandverhalten von Fassaden und Ermittlung von Grenzwerten zur Beurteilung.* BRD : Fraunhofer IRB, 2002. ISBN 3-8167-6493-2.

- Köstler, Thomas, Karsten, Andreas und Rost, Michael. 2011.** *Feuerwehreinsätze bei Bränden in Wohngebäuden.* s.l. : BRANDSchutz; Deutsche Feuerwehrzeitung 3/11, 2011.
- LEONARDO DA VINCI PILOT PROJECT. 2005.** *Development of skills facilitating implementation of eurocodes, Handbook 5, Design of buildings for the fire situation.* Luxembourg : LEONARDO DA VINCI PILOT PROJECT, CZ/02/B/F/PP-134007, 2005.
- LIGNUM. 2003.** *Schweizer Forschungsvorhaben "Brandsicherheit und Holzbau" - Dokumentationen zu Arbeitsgruppen und Grundsatzpapiere.* Schweiz : unveröffentlicht, 2003.
- Lindemann, Thomas. 2011.** *Rettungszeiten der Feuerwehr beim kritischen Wohnungsbrand.* Solingen : BRANDSchutz Deutsche Feuerwehrzeitung, 2011.
- Magnusson, Sven Erik und Thelandersson, Sven. 1970.** *Temperatur time curves of complete process of fire development.* Lund, Sweden : Lund Institute of Technology, 1970.
- Mahapatra, K. und Gustavsson, L. 2009.** *General conditions for construction of multi-storey wooden buildings in Western Europe.* Växjö, Sweden : School of Technology and Design; Reports, No. 59, Växjö University, 2009.
- Mamrot, D. 2004.** *Zur Wirkung der Veränderung der Ressourcen bei der Feuerwehr auf die Sicherheit gegenüber Brandgefahren in einer Gemeinde.* s.l. : Vereinigung zur Förderung des Deutschen Brandschutzes (vfdb), 2004, Heft 4, 2004.
- Mayer, Christian. 2012.** *Masterarbeit: Ingenieurmethoden im Brandschutz - Möglichkeiten zur Beschreibung der Brandentstehungs- und Vollbrandphase bei Raumbränden.* s.l. : Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion, TU München, 2012.
- Mayr, Josef und Battran, Lutz. 2014.** *Brandschutzatlas.* Köln : FeuerTRUTZ Network GmbH (Rudolf Müller Verlag), 2014.
- MBO. 2002.** *Musterbauordnung in der Fassung vom November 2002, zuletzt geändert im September 2012.* www.is-argebau.de : Konferenz der für Städtebau, Bau- und Wohnungswesen zuständigen Minister und Senatoren der Länder (ARGEBAU), 2002.
- McCaffrey, B.J., Quintiere, J.G. und Harkleroad, M.F. 1981.** *Estimating room temperatures and the likelihood of flashover using fire test data correlations.* s.l. : Fire Technology, Volume 17, Issue 2, pp 98-119, 1981.
- M-HFHolzR. 2004.** *Muster-Richtlinie über brandschutztechnische Anforderungen an hochfeuerhemmende Bauteile in Holzbauweise.* www.is-argebau.de : Konferenz der für Städtebau, Bau- und Wohnungswesen zuständigen Minister und Senatoren der Länder (ARGEBAU), 2004.
- MI.BB, Ministerium des Innern des Landes Brandenburg. 2010.** *Brand- und Katastrophenschutz im Land Brandenburg.* Potsdam : Pressestelle, 2010.

**MI.ST, Ministerium des Innern des Landes Sachsen-Anhalt. 2010.** *Ereignisbericht der Feuerwehr für das Land Sachsen-Anhalt, Jahresbericht.* Magdeburg : s.n., 2010.

**MIK.NRW, Ministerium für Inneres und Kommunales des Landes Nordrhein-Westfalen. 2010.** *Gefahrenabwehr in Nordrhein-Westfalen, Jahresbericht.* Düsseldorf : s.n., 2010.

**MIKE.SL, Ministerium für Inneres, Kultur und Europa. 2011.** *Feuerwehren im Saarland, Jahresstatistiken.* Saarbrücken : s.n., 2011.

**MIS.HE, Hessisches Ministerium des Innern und für Sport. 2010.** *Brandschutz; Allgemeine Hilfe; Katastrophenschutz.* Wiesbaden : s.n., 2010.

**MIS.NI, Ministerium für Inneres und Sport. 2010.** *Jahresbericht der Feuerwehren in Niedersachsen.* Hannover : s.n., 2010.

**MISI.RP, Ministerium des Innern, für Sport und Infrastruktur Rheinland-Pfalz. 2010.** *Statistik der Feuerwehren in Rheinland-Pfalz.* Mainz : s.n., 2010.

**Moser, Maximilian. 2009.** *Naturholzbüro aus Südtiroler Bergfichte.* Welz, Austria : HUMAN RESEARCH Institut für Gesundheitstechnologie und Präventionsforschung, 2009.

**NCSR, National Centre for Social Research and Office of the Deputy Prime Minister. 2008.** *Survey of English Housing, 2004-2005 (SEH).* Colchester, Essex : UK Data Archive, 2008.

**Neukam, Elisabeth. 2011.** *Studienarbeit: Ingenieurmethoden im Brandschutz - Ermittlung von mobilen und immobilen Brandlasten in Räumen verschiedener Nutzung.* s.l. : Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion, TU München, 2011.

**Neulinger, Erwin und Adam, Stefan. 2012.** *Lehrunterlage: Betreten von Brandräumen, Verhalten im Innenangriff.* s.l. : Feuerweherschule München, 2012.

**Nyman, J. F. 2002.** *Equivalent Fire Resistance Ratings of Construction Elements Exposed to Realistic Fires (Master of Engineering).* Christchurch, New Zealand : University of Canterbury, 2002.

**OVG Münster. 1987.** *Entstehung von Bränden.* 10 A 363/86, s.l. : Oberverwaltungsgericht Münster, 11. 12 1987.

**Palisade. 2010.** *Guide to Using @Risk - Risk Analysis and Simulation.* Ithaca, NY USA : Palisade Corporation, 2010.

**Pedro, J.B. Meijer, F. Visscher, H. 2010.** *Technical Building Regulations in EU Countries: A Comparison of Their Organization and Formulation.* Salford, United Kingdom : CIB W113 - Law and Dispute Resolution; CIB Publication 345, 2010. Datei: wbc2010-proceedings.pdf - Seite 38 ff..

**Räddningsverket. 1995.** *Optimal Fire Safety: Cost-benefit analysis and comparison of fire service costs in six countries.* Karlstadt : Swedish Rescue Services Agency (Räddningsverket), Forschungsbericht 21-098, 1995.

- Ridder, Adrian. 2013.** *Methodische Ansätze zur datenbasiert-analytischen Risikobeurteilung zur strategischen Planung von Feuerwehren.* s.l. : Bergische Universität Wuppertal; Lehrstuhl Methoden der Sicherheitstechnik/Unfallforschung; Abteilung Sicherheitstechnik, 2013.
- Ridder, Adrian, Cimolino, Ulrich und Fuchs, Martin. 2013.** *Brandbekämpfung im Innenangriff.* s.l. : ecomed Sicherheit; www.ecomed-storck.de, 2013.
- Schneider, J., Schlatter, H.P. 2007.** *Sicherheit und Zuverlässigkeit im Bauwesen, Ausgabe 3.* pdf-Format, WWW : Teubner Verlag, 2007.
- Schneider, Ulrich, et al. 2014.** *Ingenieurmethoden im Brandschutz, 7.Auflage.* Renningen : expert Verlag, 2014.
- SFPE. 2002.** *Society of Fire Protection Engineers: The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering. Third Edition.* Quincy, Massachusetts : National Fire Protection Association, 2002.
- SIA160. 1989.** *160 Einwirkungen auf Tragwerke.* Zürich : Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, 1989.
- Spangenberg, H. 2008.** *Risikoanalysen - Theorie und Praxis der qualitativen und quantitativen Risikoanalyse erläutert an Beispielen aus der Praxis.* Karlsruhe : Landesanstalt für Umwelt, Messung und Naturschutz (LUBW) Baden Württemberg (Internetquelle), 2008.
- Spearpoint, Michael. 2008.** *Fire Engineering Design Guide; Third Edition.* Christchurch, NZ : New Zealand Centre For Advanced Engineering, 2008.
- Stallmeyer, A. 2004.** *Lernen von den Besten - KGSt Vergleichsring: Berufsfeuerwehren.* s.l. : Brandschutz, Jg. 58, 2004, Heft 4, 2004.
- Stammler, Nadine. 2009.** *Diplomarbeit: Brandrisikobewertung von Holzgebäuden.* s.l. : Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion, TU München, 2009.
- STMI, Bayerisches Staatsministerium des Innern. 2012.** *Die Feuerwehren Bayerns im Zahlenspiegel.* München : Sachgebiet ID2, 2012.
- . **2005.** *Die Feuerwehren Bayerns im Zahlenspiegel.* München : Sachgebiet ID2, 2005.
- . **2006.** *Die Feuerwehren Bayerns im Zahlenspiegel.* München : Sachgebiet ID2, 2006.
- Visscher, H.J., Sheridan, L. und Meijer, F.M. 2005.** *Systems of performance based requirements for housing in Europe.* Delft, Netherlands : OTB Research Institute for Housing, Urban and Mobility Studies, Delft University of Technology, 2005.
- VollBekBayFwG. 2013.** *Vollzug des Bayerischen Feuerwehrgesetzes (VollBekBayFwG).* München : Bayerischen Staatsministeriums des Innern, 2013.
- Wade, C. A., Gerlich, J. T. und Abu, A. 2014.** *The Relationship between Fire Severity and Time-Equivalence; BRANZ Study Report SR314.* Porirua, New Zealand : BRANZ, 2014.

**Wade, C., et al. 2013.** *B-RISK User Guide and Technical Manual; BRANZ Study Report 282.* Porirua City, New Zealand : BRANZ Ltd, Judgeford, 2013.

**Werners, B., Drawe, M. und Thorn, J. 2001.** *Standortplanung für das Rettungswesen.* s.l. : WiSt, Jg. 30, Heft 12, 2001.

**Wilk, Erhardt. 2013.** *Tagungsbeitrag: Brandentwicklung und Brandwirkungen bei Raumbränden.* Magdeburg : 3. Magdeburger Brand- und Explosionsschutztag; 21./22. März, 2013.

**Winter, S. und Merk, M. 2008.** *Holzbau der Zukunft - Teilprojekt 2 - Brandsicherheit mehrgeschossiger Holzbau.* München : Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion, TU München, 2008.

**Winter, Stefan und Stein, René. 2005.** *Untersuchungen zur Einstufung von Güteüberwachten, handwerklich gefertigten Holzgebäuden mit nicht brennbaren Beplankungen in die Bauartklasse II von Gebäudeversicherungen und deren Gleichsetzung bei den Versicherungsprämien mit Fertighäusern.* München : Holzabsatzfonds (Nr. 540-2004-H13 090401301), Deutsche Gesellschaft für Holzforschung (DGfH-Nr. G-2004-09), 2005.

**Wissenschaftsforum Referat II.1. 2010.** *Methode für die Risikoanalyse im Bevölkerungsschutz.* Bonn : Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe, 2010.

**Zehfuß, J. 2004.** *Bemessung von Tragsystemen mehrgeschossiger Gebäude in Stahlbauweise für realistische Brandbeanspruchung.* s.l. : Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig, Fachbereich Bauingenieurwesen, 2004.

## 10 Formelzeichen und Abkürzungen

### Große lateinische Buchstaben (mit/ohne Index)

$A$	Fläche (m <sup>2</sup> )
$A_T$	Flächenintegral unter der Temperatur-Zeitkurve (K·sec)
$A_{T,ETK}$	Flächenintegral unter der Einheits-Temperatur- Zeitkurve (K·sec)
$A_{T,1}$	Flächenintegral unter der Temperatur-Zeitkurve während der Brandentwicklungsphase (K·sec)
$A_{T,2}$	Flächenintegral unter der Temperatur-Zeitkurve während der Vollbrandphase (K·sec)
$A_{T,3}$	Flächenintegral unter der Temperatur-Zeitkurve während der Abklingphase (K·sec)
$A_f$	Grundfläche Brandraumes bzw. der Nutzungseinheit, angenommene Brandfläche (m <sup>2</sup> )
$A_t$	Gesamtfläche der umfassenden Bauteile mit überrechneten Öffnungsflächen (m <sup>2</sup> )
$A_w$	Fläche der Ventilationsöffnungen in den Umfassungsbauteilen (m <sup>2</sup> )
$H$	Höhe (m)
$HRR$	Heat Release Rate – englische Bezeichnung für Energiefreisetzungsrate (MW)
$MIN$	Rechenoperation, Minimum aus [ ..... ]
$O$	Öffnungsfaktor (m <sup>1/2</sup> )
$Q$	Brandlast (MJ)
$Q_1$	Menge der Brandlast, die während der Brandentwicklungsphase umgesetzt wird (MJ)
$Q_2$	Menge der Brandlast, die während der Vollbrandphase umgesetzt wird (MJ)
$Q_3$	Menge der Brandlast, die während der Abklingphase umgesetzt wird (MJ)
$Q_x$	Menge der Brandlast bei einer beliebigen Brandlastdichte von x MJ/m <sup>2</sup> (MJ)
$\dot{Q}$	Energiefreisetzungsrate (MW)
$\dot{Q}_{fo}$	Energiefreisetzungsrate, bei der ein Flash-Over eintritt (MW)
$\dot{Q}_{max}$	maximale Energiefreisetzungsrate (MW)
$\dot{Q}_{max,v}$	maximale Energiefreisetzungsrate bei einem ventilationsgesteuerten Brandverlauf (MW)
$\dot{Q}_{max,f}$	maximale Energiefreisetzungsrate bei einem brandlastgesteuerten Brandverlauf (MW)

### Kleine lateinische Buchstaben (mit/ohne Index)

$a$	Basiswert der bezogenen Brandentstehungshäufigkeit je Quadratmeter (1/(m <sup>2</sup> ·a))
$b$	Wärmespeichervermögen der Umfassungsbauteile (J/(m <sup>2</sup> ·s <sup>1/2</sup> ·K))
$exp$	Rechenoperator → Exponent
$h_w$	gemittelte Höhe der Ventilationsöffnungen (m)
$k$	Hilfsfaktor zur Berechnung der Temperaturen bei einem brandlastgesteuerten Brand (-)
$log_{10}$	Logarithmus der Zahl X zur Basis 10
$p_f$	die für alle Lastfälle geltende zulässige Versagenswahrscheinlichkeit für Bauteile
$p_f^*$	Hilfswert Versagenswahrscheinlichkeit $p_f^* = p_{sim}$ (-)
$p_{fi}$	Auftretenswahrscheinlichkeit eines Schadenfeuers je Nutzungseinheit und Jahr (1/a)
$p_{f,fi}$	bedingte Versagenswahrscheinlichkeit im Brandfall (-)
$p_{sim}$	simulierte Versagenswahrscheinlichkeit eines Bauteils bei Entstehung eines Brandes unter statistischer Berücksichtigung des abwehrenden Brandschutzes (-)
$p_1$	Auftretenswahrscheinlichkeit von mindestens einem Entstehungsbrand je Nutzungseinheit und Jahr (1/a)
$p_{2,1}$	Ausfallwahrscheinlichkeit der manuellen Brandbekämpfung durch den Nutzer, Primärbrandbekämpfung (-)
$q_{f,i,k}$	charakteristischer Wert der Brandlastdichte bezogen auf Grundfläche (MJ/m <sup>2</sup> )
$q_{ref}$	Referenzbrandlastdichte $q_{ref} = 1.300 \text{ MJ/m}^2$

$t$	Zeit (sec)
$t_{Detektion}$	Zeitspanne vom Ausbruch eines Brandes bis zur Detektion (sec)
$t_{Einsatz}$	Zeitspanne von Ankunft der Rettungskräfte am Einsatzort bis zur Meldung „Feuer aus!“ (sec)
$t_{Hilfsfrist}$	Zeitspanne von Alarmeingang bei der hilfeleistenden Stelle bis zur Ankunft am Einsatzort (sec)
$t_{Meldung}$	Zeitspanne von der Detektion eines Brandes bis zum Alarmeingang bei der hilfeleistenden Stelle (sec)
$t_{\alpha}$	Zeitspanne, die erforderlich ist, bis die Energiefreisetzung von 1 MW erreicht wird (sec)
$t_0$	Zeitpunkt des rechnerischen Brandbeginns (sec)
$t_{fo}$	Zeitpunkt des einsetzenden Flash-Overs (sec)
$t_{L\ddot{o}sch}$	Zeitpunkt der abgeschlossenen L\ddot{o}schma\ddot{a}\ddot{u}hme $t_{L\ddot{o}sch} = t_{Detektion} + t_{Hilfsfrist} + t_{Einsatz}$ (sec)
$t_1$	Zeitpunkt des \dd{U}bergangs von der Brandentwicklungsphase in die Vollbrandphase ( $^{\circ}C$ )
$t_1^*$	rechnerischer Zeitpunkt im Simulationsmodell mit $MIN[t_1 ; t_{1,70\%} ; t_{1,fo} ; t_{L\ddot{o}sch}]$ (sec)
$t_{1,fo}$	Zeitpunkt des \dd{U}bergangs von der Brandentwicklungsphase in die Vollbrandphase nach Flash-Over (sec)
$t_{1,70\%}$	Zeitpunkt des \dd{U}bergangs zur Abklingphase nach Umsetzung von 70% der Brandlast in der Brandentwicklungsphase (sec)
$t_2$	Zeitpunkt des \dd{U}bergangs der Vollbrandphase in die Abklingphase bei Referenzbrandlastdichte (sec)
$t_2^*$	rechnerischer Zeitpunkt im Simulationsmodell $MIN[t_{2,x} ; t_{2,70\%} ; t_{fo} ; t_{L\ddot{o}sch}]$ (sec)
$t_{2,fo}$	Zeitpunkt des \dd{U}bergangs von der Vollbrandphase in die Abklingphase bei Verlauf mit Flash-Over (sec)
$t_{2,x}$	Zeitpunkt des \dd{U}bergangs der Vollbrandphase in die Abklingphase bei beliebiger Brandlastdichte (sec)
$t_3$	Zeitpunkt an dem die gesamte Referenzbrandlast vollst\dd{a}ndig umgesetzt ist (sec)
$t_{3,fo}$	Zeitpunkt an dem die beliebig angesetzte Brandlast vollst\dd{a}ndig umgesetzt ist, Brandverlauf mit Flash-Over (sec)
$t_{3,fo,70\%}$	Zeitpunkt an dem die beliebig angesetzte Brandlast vollst\dd{a}ndig umgesetzt ist, Brandverlauf mit Umsetzung von 70% der Brandlast in der Flash-Over-Phase (sec)
$t_{3,fo,200^{\circ}C}$	Zeitpunkt an dem die kritische Raumtemperatur in der Abklingphase unterhalb $200^{\circ}C$ sinkt, Brandverlauf mit Flash-Over (sec)
$t_{3,x}$	Zeitpunkt an dem die beliebig angesetzte Brandlast vollst\dd{a}ndig umgesetzt ist (sec)
$t_{3,x,200^{\circ}C}$	Zeitpunkt an dem die kritische Raumtemperatur in der Abklingphase unterhalb $200^{\circ}C$ sinkt (sec)
$v_{fo}$	Anstiegsrate der Energiefreisetzung nach Eintritt des Flash-Overs

## Griechische Buchstaben

$\alpha$	Wert f\dd{u}r die Brandentwicklungsgeschwindigkeit ( $kW/s^2$ )
$\alpha t^2$	Kurvenansatz f\dd{u}r den Verlauf der Energiefreisetzungsrates w\dd{a}hrend der Brandentwicklungsphase (MW)
$\beta_{fi}$	Zuverl\dd{a}ssigkeitsindex f\dd{u}r den Brandfall
$\theta_{fo}$	Temperatur im Brandraum zum Zeitpunkt $t_{fo}$ bei Eintritt des Flash-Over ( $^{\circ}C$ )
$\theta_{fo,x}^*$	Temperatur im Brandraum zum Zeitpunkt $t_{fo,70\%}$ nach Eintritt des Flash-Over und Umsetzung von 70% der angesetzten Brandlast ( $^{\circ}C$ )
$\theta_{fo,x}^{**}$	Temperatur im Brandraum zum Zeitpunkt $t_1^* = t_{L\ddot{o}sch}$ nach Eintritt des Flash-Over ( $^{\circ}C$ )
$\theta_0$	Temperatur zum Zeitpunkt des rechnerischen Brandbeginns, Raumtemperatur ( $^{\circ}C$ )
$\theta_1$	Temperatur im Brandraum zum Zeitpunkt $t_1$ ( $^{\circ}C$ )
$\theta_{1,v}$	Temperatur im Brandraum zum Zeitpunkt $t_1$ des \dd{U}bergangs der Brandentwicklungs- zur Vollbrandphase bei ventilationsgesteuerten Brandverl\dd{a}ufen ( $^{\circ}C$ )
$\theta_{1,f}$	Temperatur im Brandraum zum Zeitpunkt $t_1$ des \dd{U}bergangs der Brandentwicklungs- zur Vollbrandphase bei brandlastgesteuerten Brandverl\dd{a}ufen ( $^{\circ}C$ )
$\theta_{1,fo}$	Temperatur im Brandraum zum Zeitpunkt $t_{1,fo}$ bei \dd{U}bergang zur Vollbrandphase nach Flash-Over ( $^{\circ}C$ )
$\theta_1^*$	Temperatur im Brandraum zum Zeitpunkt $t_1^*$ ( $^{\circ}C$ )
$\theta_2$	Temperatur im Brandraum zum Zeitpunkt $t_2$ ( $^{\circ}C$ )
$\theta_{2,v}$	maximale Temperatur im Brandraum zum Zeitpunkt $t_2$ des \dd{U}bergangs der Vollbrandphase in die Abklingphase bei ventilationsgesteuerten Brandverl\dd{a}ufen ( $^{\circ}C$ )

$\theta_{2,f}$	maximale Temperatur im Brandraum zum Zeitpunkt $t_2$ des Übergangs der Vollbrandphase in die Abklingphase bei brandlastgesteuerten Brandverläufen (°C)
$\theta_{2,f_0}$	Temperatur im Brandraum zum Zeitpunkt $t_{2,f_0}$ bei Übergang zur Abklingphase nach Vollbrand (°C)
$\theta_{2,x}$	Temperatur im Brandraum zum Zeitpunkt $t_{2,x}$ bei Übergang der Vollbrandphase in die Abklingphase bei beliebiger Brandlastdichte (°C)
$\theta_{2,x}^*$	Temperatur im Brandraum zum Zeitpunkt $t_2^*$ (°C)
$\theta_3$	Temperatur im Brandraum zum Zeitpunkt $t_3$ (°C)
$\theta_{3,v}$	Temperatur im Brandraum zum Zeitpunkt $t_3$ an dem die gesamte Referenzbrandlast bei ventilationsgesteuertem Brandverlauf vollständig umgesetzt ist (°C)
$\theta_{3,f}$	Temperatur im Brandraum zum Zeitpunkt $t_3$ an dem die gesamte Referenzbrandlast bei brandlastgesteuertem Brandverlauf vollständig umgesetzt ist (°C)
$\theta_{3,x}$	Temperatur im Brandraum zum Zeitpunkt $t_{3,x}$ an dem die eine beliebige angesetzte Brandlast vollständig umgesetzt ist (°C)
$\mu_\alpha$	Mittelwert aus der Verteilung der Brandentwicklungsgeschwindigkeit (-)
$\mu_q$	Mittelwert aus der Verteilung der Brandlastdichten (-)
$\sigma_\alpha$	zugehörige Standardabweichung der Verteilung der Brandentwicklungsgeschwindigkeit (-)
$\sigma_q$	zugehörige Standardabweichung der Verteilung der Brandlastdichten (-)

### Abkürzungen

<i>k. A.</i>	keine Angaben vorhanden
<i>NE</i>	Nutzungseinheit → brandschutztechnisch wirksam abgetrennte Einheit
<i>SK<sub>HB</sub></i>	Brandsicherheitsklasse für den Holzbau

## 11 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Knochenhauer Amtshaus am Marktplatz in Hildesheim ( <a href="http://www.knochenhaueramtshaus.com">www.knochenhaueramtshaus.com</a> ) .....	8
Abbildung 1-2: Darstellung der Einteilung von Gebäuden nach nationaler Musterbauordnung.....	10
Abbildung 1-3: Trends in Fire Death Rates per Million Population by Region, 1979–2007 (FEMA, 2011).....	13
Abbildung 1-4: Reaktionsdreieck Brandentstehung ( <a href="http://www.feuerwehr-potsdam.de">http://www.feuerwehr-potsdam.de</a> ).....	14
Abbildung 1-5: Grafische Darstellung eines Temperatur-Zeit-Verlaufes eines typischen Raumbrandes ohne intervenierende Einwirkung durch die Feuerwehr [ <a href="http://www.wikipedia.de">www.wikipedia.de</a> ].....	14
Abbildung 1-6: Vergleich aus 50 Naturbrandversuchen zur ETK, entnommen aus (LEONARDO DA VINCI PILOT PROJECT, 2005 S. I-8).....	23
Abbildung 1-7: Brandphasen mit zugeordneten Hauptnutzungen der Rettungswege und Bedingungen für die Nutzbarkeit der Rettungswege im Brandfall, entnommen aus (Hosser, 2013) .....	24
Abbildung 2-1: Definition des Risikos und der Komponenten, in Anlehnung an (Spangenberg, 2008).....	30
Abbildung 2-2: Ablaufschema einer Risikoanalyse, entnommen aus (Spangenberg, 2008) .....	31
Abbildung 2-3: Auszug FIRE RISK ASSESSMENT SHEET (Onlinequelle <a href="http://www.oxonrcc.org.uk/">http://www.oxonrcc.org.uk/</a> ).....	32
Abbildung 2-4: Beispielhafter Aufbau eines Ereignisbaumes (Frantzych, 1998) .....	33
Abbildung 2-5: Beispielhafte Abfolge der Analyse mittels Fehlerbaumes (Frantzych, 1998).....	34
Abbildung 2-6: Beispiel für eine grafische Darstellung der Funktion einer Gauss'schen Wahrscheinlichkeitsverteilung (Mittelwert 0 und Standardabweichung 1) und kumulativer Verteilungsfunktion (entnommen aus <a href="http://engineering.tamu.edu">http://engineering.tamu.edu</a> ) .....	35
Abbildung 2-7: Zusammenhang von Aufwand zu Ergebnis bei Risikoanalysen, entnommen aus (Stammler, 2009) .....	36
Abbildung 2-8: Auszug international verwendeter Verfahren, entnommen aus (Stammler, 2009).....	37
Abbildung 3-1: Hierarchische Darstellung der Regelungen im Bauwesen (entnommen aus (Mayr, et al., 2014)) .....	39
Abbildung 3-2: Gegenüberstellung der Einwirkungen zu notwendigen Widerständen für Bauteile der Klasse SK <sub>HB3</sub> ...	46
Abbildung 3-3: Beispielhafter Ansatz zur Ermittlung der maßgeblichen Beanspruchung in der Kategorie SK <sub>HB3</sub> .....	46
Abbildung 3-4: Gegenüberstellung der Einwirkungen zu notwendigen Widerständen für Bauteile der Klasse SK <sub>HB2</sub> ...	48
Abbildung 3-5: Gegenüberstellung der Einwirkungen zu notwendigen Widerständen für Bauteile der Klasse SK <sub>HB1</sub> ...	48
Abbildung 3-6: Gegenüberstellung der Einwirkungen und Widerstände für Bauteile der Klasse SK <sub>HB0</sub> (Kapselung) ....	49
Abbildung 3-7: Gegenüberstellung der Einwirkungen und Widerstände für Bauteile der Klasse SK <sub>HB0</sub> (Fassade).....	50
Abbildung 3-8: Zeitliche Übersicht des Zusammenhangs zwischen Brandsicherheitsklasse, Beanspruchung und Widerstand.....	51

Abbildung 4-1: Übersicht zu Modellen der Brandsimulation (Mayer, 2012) .....	54
Abbildung 4-2: Diagramme zur grafischen Methode nach Magnusson & Thelandersson (SFPE, 2002).....	55
Abbildung 4-3: Beispielhafter Verlauf einer Temperaturzeitkurve nach EC1-1-2 (rot), erstellt mit Tool aus (Mayer, 2012) .....	56
Abbildung 5-1: Darstellung der Log-NV zur Brandentwicklungsgeschwindigkeit nach (Holborn, et al., 2004).....	63
Abbildung 5-2: Darstellung der gewählten Log-Normal-Verteilung zur Abbildung des Zeitraumes zur Brandentdeckung .....	66
Abbildung 5-3: Kumulative Wahrscheinlichkeitsdarstellung des Zeitraumes bis zur Branddetektion.....	66
Abbildung 5-4: Ermittelte Häufigkeitsverteilung zu den Daten für den Meldezeitraum nach (Holborn, et al., 2004) .....	68
Abbildung 5-5: Ansatz der möglichen Anordnungen von Öffnungsflächen einer Nutzungseinheit / eines Raumes .....	70
Abbildung 5-6: Darstellung des Zusammenhangs zwischen Grundfläche, Öffnungsverhältnis und Raumhöhe zum zugehörigen Öffnungsfaktor O .....	71
Abbildung 6-1: Zeitachse zum Ablauf eines Brandes mit Intervention durch die Feuerwehr.....	74
Abbildung 6-2: Hinweise zur Feuerbedarfsplanung, oben: Schutzzieldefinition der AGBF, unten: Bemessungswerte in den Hinweisen zur Leistungsfähigkeit der Feuerwehr in Baden-Württemberg; entnommen aus (Lindemann, 2011) .....	79
Abbildung 6-3: Grafische Darstellung der Best-Fit-Verteilung für die Hilfsfrist unter Verwendung der Daten aus (Dautermann, 2013) .....	80
Abbildung 6-4: Darstellung Hilfsfrist Kumulativ aufsteigend unter Verwendung der Daten aus (Dautermann, 2013) ....	81
Abbildung 6-5: Schlauchreserve .....	83
Abbildung 6-6: Feuerwehrleine .....	83
Abbildung 6-7: Einzelschritte der Personenrettung.....	84
Abbildung 6-8: Trupp im Seitkriechgang, entnommen aus (Dautermann, 2013).....	85
Abbildung 6-9: Rechte-Hand-Suche, entnommen aus (Dautermann, 2013).....	86
Abbildung 6-10: Darstellung des Gebäudebestandes zum Stand Gebäudedatei 2007 mit Überlagerung Brandereignisse.....	94
Abbildung 6-11: Entwicklung von Nutzungseinheiten in den Gebäudeklassen 3, 4 und 5 .....	95
Abbildung 6-12: Darstellung der Häufigkeitsverteilung von Bränden über die Bauepochen .....	96
Abbildung 6-13: Brandereignisse nach angetroffenem Ausmaß, bezogen auf die Gebäudeklassen.....	99

Abbildung 6-14: über die Gebäudeklassen kumulierte Darstellung von Verteilungen der angetroffenen Brandausmaße .....	99
Abbildung 6-15: Darstellung der tageszeitlichen Verteilung von Notrufeingängen zu kritischen Brandereignissen.....	100
Abbildung 6-16: Darstellung der Verteilung von geretteten Personenanzahlen je Brandeinsatz.....	102
Abbildung 6-17: Anteil der Rettungs- und Angriffsarten bezogen auf das Brandausmaß bei Ankunft.....	103
Abbildung 6-18: Grafische Darstellung der Mittelwerte und Streuungen zur Hilfsfrist sowie Zeiten der Personenrettung .....	104
Abbildung 6-19: Darstellung der Rettungszeiten aufgeschlüsselt über Gebäudeklassen und eingesetzte Rettungsmittel .....	104
Abbildung 6-20: Zeiträume bis zur abgeschlossenen Löschmaßnahme nach Ankunft am Einsatzort mit Bezug auf das angetroffene Brandausmaß .....	105
Abbildung 6-21: Häufigkeitsverteilung der Einsatzzeiten bis „Feuer aus“ nach Ankunft bei kumulativer Betrachtung der Brandausmaße angebranntes Essen bis Wohnungsbrand in der Gebäudeklasse 3 bis 5.....	108
Abbildung 6-22: Kumulativ aufsteigende Darstellung der Einsatzzeiten bis „Feuer aus“ nach Ankunft bei kumulativer Betrachtung der Brandausmaße angebranntes Essen bis Wohnungsbrand in der Gebäudeklasse 3 bis 5.....	108
Abbildung 6-23: Grafische Aufbereitung von Daten der jährlichen Statistiken aus den Bundesländern (2010 – 2012)	109
Abbildung 6-24: Häufigkeitsverteilung über Bundesländer zu angetroffene Brandausmaße Mittelfeuer und Großbrand .....	110
Abbildung 6-25: Trendanalyse zu Grad der Abdeckung durch Berufsfeuerwehr und Auftretenswahrscheinlichkeit von Mittelfeuer und Großbränden.....	111
Abbildung 7-1: Aufbau und Ablaufschema der Simulation.....	115
Abbildung 7-2: Angenommene Histogramm-Verteilungen für Raumhöhe und mittlere Höhe der Öffnungsflächen ....	116
Abbildung 7-3: Darstellung der Maske für die Eingabe der bestimmten und unbestimmten Werte im Simulationsmodell .....	117
Abbildung 7-4: Beispielhafte Darstellung der Berechnungsschritte eines Durchlaufs für die Brandentwicklungsphase .....	119
Abbildung 7-5: Beispielhafte Darstellung des Ausgabefeldes eines Simulationsdurchlaufes .....	120
Abbildung 7-6: Beispielhafte Ergebnisdarstellung für die Simulation (Eingangswerten für $A_f = 45 \text{ m}^2$ und Öffnungsfläche $1/6$ ) der Häufigkeit hinreichender Schutzwirkung / Feuerwiderstandsfähigkeit von unter ETK-Beanspruchung geprüften Bauteilen.....	121
Abbildung 7-7: Schematische Darstellung der Temperaturzeitkurve nach dem vereinfachten Naturbrandmodell, entnommen aus (DIN EN 1991-1-2/NA:2010-12) .....	124
Abbildung 7-8: Grafische Darstellung des Flächenintegrals unter der Einheits-Temperatur-Zeitkurve (ETK) .....	124

Abbildung 7-9: Grafische Darstellung der Versuchswerte nach (Wilk, 2013) .....126

Abbildung 7-10: Auswertung der Simulationsergebnisse für Öffnungsverhältnis 1/6 und max. Wohnungsbrand.....128

Abbildung 7-11: Darstellung der Sensitivitätsanalyse für die Ergebnisse zu dem Verhältnis der Öffnungsflächen von 1/6  
.....129

## 12 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1-1: Versicherung - Definition und Erklärung Bauartklassen ( <a href="http://www.top-versicherungslexikon.de">http://www.top-versicherungslexikon.de</a> ).....	15
Tabelle 3-1: Darstellung der vier Hauptgruppen eines Brandschutznachweises für bauliche Anlagen (Hosser, 2013)..	40
Tabelle 3-2: Vorschlag für Brandsicherheitsklassen SK <sub>HB</sub> im Holzbau .....	44
Tabelle 3-3: Zusammenstellung akzeptierbaren Versagenshäufigkeiten nach den Brandsicherheitsklassen SK <sub>HB</sub> 0 bis 3 .....	50
Tabelle 5-1: Zusammenfassung der Auswertung zu Brandentwicklungsgeschwindigkeiten nach (Holborn, et al., 2004) .....	62
Tabelle 5-2: Ereigniszeiten für Brände in Räumen mit Wohnnutzung nach (Holborn, et al., 2004) .....	65
Tabelle 5-3: Vergleich der Ausstattung mit Rauchmelder UK - BRD.....	67
Tabelle 5-4: Vergleich der Kennwerte nach (Holborn, et al., 2004) zu selbst angenommener Pearson-Verteilung .....	68
Tabelle 5-5: Ansatz der Ausfallwahrscheinlichkeit ( $p_{2,1}$ ) einer Primärbrandbekämpfung .....	69
Tabelle 5-6: Grenzen der aus der Studie zu den Öffnungsflächen abgeleiteten Variationen.....	71
Tabelle 6-1 Zusammenfassung der berechneten Verteilungswerte zur Hilfsfrist unter Verwendung der Daten aus (Dautermann, 2013) .....	80
Tabelle 6-2: Werte für die Erkundung- und Entwicklungszeit bei neun Übungen (Dautermann, 2012) .....	84
Tabelle 6-3: Angabe IdF NRW zu Rüst- und Rettungszeiten, aus (Dautermann, 2013).....	87
Tabelle 6-4: Rettungsraten für anleiterbare Stellen nach (Hagebölling, et al., 1990) .....	88
Tabelle 6-5: Rettungskennwerte taktischer Einheiten nach (Hagebölling, et al., 1990) .....	88
Tabelle 6-6: Einsatzgrenzen tragbarere Leitern und Hubrettungsfahrzeuge nach (AGBF, 2000) .....	88
Tabelle 6-7: Zeiten für die Dauer bis zum Abschluss der Personenrettung nach (Köstler, et al., 2011) .....	88
Tabelle 6-8: Orientierungswerte für die maximal beherrschbare Brandfläche, entnommen aus (Hosser, 2013).....	89
Tabelle 6-9: Verteilung der ausgewählten Datenpakete zur weiteren Analyse .....	91
Tabelle 6-10: Übersicht der erfassten Brandereignisse.....	92
Tabelle 6-11: Übersicht der Meldebilder zu den Brandeinsätzen.....	92
Tabelle 6-12: Vergleich der Einteilung zum Brandausmaß nach DIN 14010 und eigener Einteilung .....	98
Tabelle 6-13: Aufteilung der erfassten Brände nach Ausmaß des Brandes bei Eintreffen der Feuerwehr .....	98
Tabelle 6-14: Darstellung der herangezogenen Einsatzfälle für die Bewertung der Rettungsmittel .....	102
Tabelle 6-15: Darstellung der berücksichtigten Brandausmaße für die jeweilige Auswertegruppe.....	106

Tabelle 6-16: Auswertung der Einsatzzeiten von Ankunft bis „Feuer aus!“ zusammengefasst für Gebäudeklasse 3 bis 5 .....	107
Tabelle 6-17: Auswertung der Einsatzzeiten von Ankunft bis „Feuer aus!“ zusammengefasst für Gebäudeklasse 4...107	
Tabelle 6-18: Auswertung der Einsatzzeiten von Ankunft bis „Feuer aus!“ zusammengefasst für Gebäudeklasse 4 bis 5 .....	107
Tabelle 6-19: Vergleich der Bundesländer mit Darstellung des Zeitraumes der gesetzlichen Einführung der Rauchwarnmelderpflicht.....	110
Tabelle 6-20: Vergleich der Bundesländer zur Abdeckung über Berufsfeuerwehren.....	111
Tabelle 6-21: Vergleich Art der Feuerwehr und Auftretenshäufigkeit von größeren Brandereignissen .....	112
Tabelle 6-22: Überblick zu relevanter Forschungsaktivität im Bereich Performance Measurement (Zusammenfassung aus (Hilgers, 2008)) .....	113
Tabelle 7-1: Empfehlung für Werte für Anstiegsraten bei Eintritt des Flashovers nach (Wilk, 2013) .....	125
Tabelle 7-2: Notwendiger Widerstand nach den Brandsicherheitsklassen in Minuten (Vorschlag nach europäischer Klassifizierung) für die Auswertegruppe Zimmerbrand.....	130
Tabelle 7-3: Notwendiger Widerstand nach den Brandsicherheitsklassen in Minuten (Vorschlag nach europäischer Klassifizierung) für Auswertegruppe ausgedehnter Zimmerbrand.....	130
Tabelle 7-4: Notwendiger Widerstand nach den Brandsicherheitsklassen in Minuten (Vorschlag nach europäischer Klassifizierung) für Auswertegruppe Wohnungsbrand.....	131



## Anhang 1 zu Abschnitt 6 – Brandintervention durch die Feuerwehr

## A1.a Feuerwegesetze der 16 Bundesländer (nach eigener Recherche 12/2013)

Tabelle A1.a 1: Auflistung der geltenden Feuerwegesetze der 16 Bundesländer der BRD

Bundesland – Gesetz	Definierter Zeitabschnitt nach Landesgesetz
<b>Baden-Württemberg</b> - Feuerwegesetz (FwG) vom 10. Februar 1987, zuletzt geändert am 10. November 2009 Rettungsdienstplan 2000 Baden- Württemberg, Kap. III 2	<b>Hilfsfrist</b> von Eingang der Meldung bis Ankunft am Notfallort an Straßen <b>Erreichungsgrad</b> zu 95% in 15 Minuten
<b>Bayern</b> - Bayerisches Feuerwegesetz - BayFwG vom 1. Januar 1982, zuletzt geändert durch Gesetz am 20.12.2011  §2 Absatz 1 Ausführungsverordnung des Bayerischen Rettungsdienstgesetzes AVBayRDG vom 30.11.2010	<b>Hilfsfrist</b> von Eingang Meldung bis Ankunft an einem an einer Straße liegenden Einsatzort muss in 10 Minuten möglich sein. Hilfsfrist(=Fahrzeit) von Fahrtbeginn bis Ankunft am an einer Straße liegenden Einsatzort <b>Erreichungsgrad</b> in der Regel in 12 Minuten und 15 Minuten in dünn besiedelten Gebieten
<b>Berlin</b> - Gesetz über die Feuerwehren im Land Berlin (FwG) Rettungsdienstgesetz, § 2 Abs. 1	bedarfsgerecht
<b>Brandenburg</b> - Gesetz über den Brandschutz, die Hilfeleistung und den Katastrophenschutz des Landes Brandenburg vom 24. Mai 2004 (BbgBKG) Brandenburgisches Rettungsdienstgesetz BbgRettG §8 Absatz 2 Satz 2 vom 14.07.2008	<b>Hilfsfrist</b> von Eingang der Meldung bis Ankunft Notfallort Erreichungsgrad zu 95% in 15 Minuten
<b>Bremen</b> - Bremisches Hilfeleistungsgesetz (BremHilfeG), § 28	<b>Eintreffzeit</b> von Eröffnung des Einsatzes bis Ankunft am Einsatzort an befestigter Straße <b>Erreichungsgrad</b> zu 95% in 10 Minuten
<b>Hamburg</b> - Feuerwegesetz Hamburg (FeuerwG) Rettungsdienstgesetz, § 6 Abs. 2 von 1992	flächendeckend und bedarfsgerecht
<b>Hessen</b> - Hessisches Gesetz über den Brandschutz, die Allgemeine Hilfe und den Katastrophenschutz (HBKG) §15 Absatz 2 Hessisches Rettungsdienstgesetz (HRDG); Rettungsdienstplan des Landes Hessen, Kap. 2.2.1, vom 03.04.2011	<b>Hilfsfrist</b> von nach Eingang der Meldung bis Ankunft am an einer Straße gelegenen Notfallort Erreichungsgrad zu 90% in 10 Minuten
<b>Mecklenburg-Vorpommern</b> - Brandschutz- und Hilfeleistungsgesetz §7 Absatz 2 (1) Rettungsdienstgesetz M-V vom 01.07.1993	<b>Hilfsfrist</b> von Eingang der Meldung bis Ankunft am an einer Straße gelegenen Notfallort <b>Erreichungsgrad</b> 10 Minuten in der Regel (in der Regel = im Jahresdurchschnitt aller Einsätze)
<b>Niedersachsen</b> - Niedersächsisches Brandschutzgesetz (NBrandSchG) §2 Absatz 2 und 3 Bedarfsverordnung Rettungsdienst BedarfVO-RettD vom 04.01.1993	<b>Eintreffzeit</b> Von Beginn der Einsatzentscheidung bis Ankunft am an einer öffentlichen Straße gelegenen Einsatzort <b>Erreichungsgrad</b> zu 95% in 15 Minuten
<b>Nordrhein-Westfalen</b> - Gesetz über den Feuerschutz und die Hilfeleistung (FSHG) vom 11. Dezember 2007	<b>Hilfsfrist</b> von Eingang der Meldung bis Ankunft am an einer Straße gelegenen Notfallort <b>Erreichungsgrad</b> 5 - 8 Minuten; 12 Minuten im ländlichen Raum
<b>Rheinland-Pfalz</b> - Landesgesetz über den Brandschutz, die allgemeine Hilfe und den Katastrophenschutz (LBKG) § 8 Absatz 2 Rettungsdienstgesetz RDG vom 22.04.1991	<b>Hilfeleistungsfrist</b> (= Fahrzeit) von Eingang der Meldung bis Ankunft am an einer Straße gelegenen Notfallort <b>Erreichungsgrad</b> in der Regel maximal 15 Minuten
<b>Saarland</b> - Gesetz über den Brandschutz, die Technische Hilfe und den Katastrophenschutz im Saarland (SBKG) §6 Absatz 3 Rettungsdienstgesetz vom 01.01.2004	<b>Hilfsfrist</b> von Eingang der Meldung bis Ankunft am an einer Straße gelegenen Notfallort <b>Erreichungsgrad</b> zu 95% in 12 Minuten
<b>Sachsen</b> - Sächsisches Gesetz über den Brandschutz, Rettungsdienst und Katastrophenschutz (SächsBRKG) §3 Sächsische Landesrettungsdienstplanverordnung –	<b>Hilfsfrist</b> von Eingang der Meldung bis Ankunft am Notfallort <b>Erreichungsgrad</b> zu 95% in 12 Minuten

SächsLRettDPVO vom 5.12.2006	
<b>Sachsen-Anhalt</b> - Brandschutzgesetz (BrSchG) Rettungsdienstgesetz, § 7 Abs. 2	<b>Hilfsfrist</b> von nach Eingang der Meldung bis Ankunft am an einer Straße gelegenen Notfallort <b>Erreichungsgrad</b> zu 90% in 12 Minuten
<b>Schleswig-Holstein</b> - Gesetz über den Brandschutz und die Hilfeleistungen der Feuerwehren (BrSchG) §7 Absatz 2 Landesverordnung zur Durchführung des Rettungsdienstgesetzes vom 20.11.2008	<b>Hilfsfrist</b> nach Eingang der Meldung bis Ankunft am ausschließlich über eine Straße erreichbaren möglichen Einsatzort <b>Erreichungsgrad</b> zu 90% in 12 Minuten
<b>Thüringen</b> - Thüringer Gesetz über den Brandschutz, die Allgemeine Hilfe und den Katastrophenschutz (Thüringer Brand- und Katastrophenschutzgesetz -ThürBKG -) 3.2 Landesrettungsdienstplan 2009	<b>Hilfsfrist</b> von Eingang der Meldung bis Ankunft am Notfallort <b>Erreichungsgrad</b> zu 95 % in 12 Minuten und maximal 14 Minuten Fahrzeit in dicht besiedelten Gebieten bzw. zu 95 % in 15 Minuten und maximal 17 Minuten in dünn besiedelten Gebieten

### A1.b Auswertung der statistischen Erhebungen realer Daten zu Einsätzen einer Berufsfeuerwehr und Verknüpfung mit der digitalen Gebäudedatei einer bundesdeutschen Großstadt

Entsprechend der für die Auswertungen zu Grunde gelegten digitalen Gebäudedatei mit Stand 2007 ergibt sich folgende Grundgesamtheit zum Gebäudebestand der Großstadt:

Tabelle A1.b - 1: Grundgesamtheit der Gebäude aufgeteilt nach Gebäudeklassen

Gebäudeklasse	Anzahl
½	98.032
3	22.298
4	29.354
5	10.103
HH	1.286
GARAGE	16.355
k.A.	860
<b>Summe</b>	<b>178.288</b>

} wurden für die Betrachtungen verwendet

Tabelle A1.b - 2: Prozentuale Verteilung der Gebäude nach Erstellungsjahr und Gebäudeklassen

Erstellungsjahr	k.A.	1/2	3	4	5	HH	GARAGE	Summe
vor 1900	0,6%	3,2%	4,8%	12,9%	8,0%	0,0%	2,1%	5,1%
1900 bis 1945	1,0%	5,5%	6,0%	12,9%	6,8%	0,2%	1,6%	6,5%
1946 bis 1970	3,0%	47,1%	47,3%	41,5%	45,0%	54,7%	23,4%	43,7%
1971 bis 1980	3,3%	9,7%	10,9%	7,3%	11,1%	35,3%	13,8%	10,1%
1981 bis 1990	26,4%	11,6%	9,3%	9,3%	10,8%	3,4%	24,3%	12,1%
1991 bis 2000	29,0%	6,3%	12,2%	7,0%	7,5%	1,2%	18,2%	8,4%
2001 bis 2007	1,4%	5,3%	5,5%	3,9%	4,9%	1,3%	7,0%	5,2%
k.A.	35,3%	11,3%	3,9%	5,1%	5,9%	3,7%	9,6%	9,0%
<b>Anzahl Gebäude</b>	<b>860</b>	<b>98.032</b>	<b>22.298</b>	<b>29.354</b>	<b>10.103</b>	<b>1.286</b>	<b>16.355</b>	<b>178.288</b>

Tabelle A1.b - 3: Prozentuale Anteile der NE klassifiziert nach Größe der Nutzungseinheiten und Gebäudeklasse

Gebäudeklasse	k.A.	NE Ø < 60 m <sup>2</sup>	NE Ø 60 - 90 m <sup>2</sup>	NE Ø 90 - 120 m <sup>2</sup>	NE Ø 120 - 200 m <sup>2</sup>	NE Ø > 200 m <sup>2</sup>	Anzahl NE
3	0,3%	28,6%	42,1%	22,4%	6,3%	0,3%	131.836
4	0,1%	20,5%	45,3%	26,5%	7,1%	0,6%	311.868
5	0,3%	28,3%	40,8%	23,3%	6,8%	0,5%	174.752
HH	0,7%	22,2%	39,9%	32,9%	3,7%	0,5%	55.677
<b>Gesamtanteil</b>	<b>0,2%</b>	<b>24,3%</b>	<b>43,0%</b>	<b>25,4%</b>	<b>6,6%</b>	<b>0,5%</b>	<b>100%</b>
<b>Anzahl NE</b>	<b>1.638</b>	<b>163.574</b>	<b>290.156</b>	<b>171.198</b>	<b>44.236</b>	<b>3.331</b>	<b>674.133</b>

Tabelle A1.b - 4: Entwicklung der Größen von Nutzungseinheiten über das Gebäudealter (Gebäudeklasse 3)

Baujahr	k.A.	NE $\varnothing < 60 \text{ m}^2$	NE $\varnothing 60 - 90 \text{ m}^2$	NE $\varnothing 90 - 120 \text{ m}^2$	NE $\varnothing 120 - 200 \text{ m}^2$	NE $\varnothing > 200 \text{ m}^2$	Summe
vor 1900	4%	41%	30%	16%	8%	1%	100%
1900 bis 1945	0%	25%	36%	28%	10%	1%	100%
1945 bis 1970	0%	38%	40%	16%	5%	0%	100%
1971 bis 1980	0%	31%	31%	31%	7%	0%	100%
1981 bis 1990	0%	10%	54%	28%	8%	0%	100%
1991 bis 2000	0%	12%	65%	18%	4%	0%	100%
2001 bis 2007	0%	7%	43%	39%	10%	1%	100%
k.A.	0%	37%	20%	37%	6%	0%	100%
<b>Summe</b>	<b>0%</b>	<b>29%</b>	<b>42%</b>	<b>22%</b>	<b>6%</b>	<b>0%</b>	<b>100%</b>
<b>Anzahl NE</b>	<b>362</b>	<b>37.761</b>	<b>55.478</b>	<b>29.588</b>	<b>8.256</b>	<b>391</b>	<b>131.836</b>

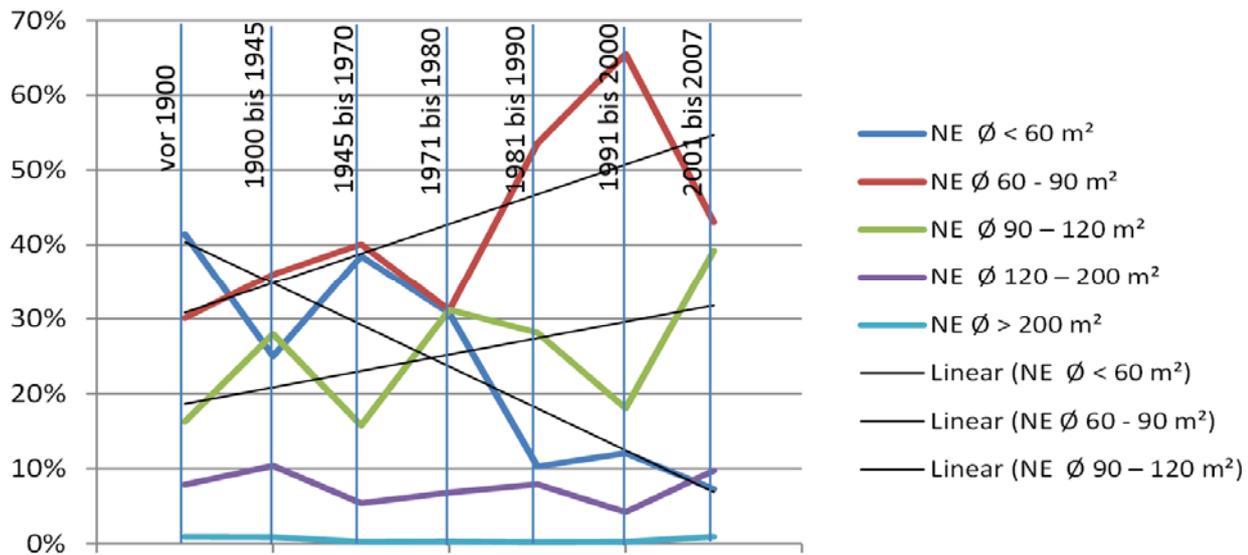


Abbildung A1.b - 1: Darstellung der zeitlichen Entwicklung der Größen von Nutzungseinheiten (Gebäudeklasse 3)

Tabelle A1.b - 5: Entwicklung der Größen von Nutzungseinheiten über das Gebäudealter (Gebäudeklasse 4)

Baujahr	k.A.	NE $\varnothing < 60 \text{ m}^2$	NE $\varnothing 60 - 90 \text{ m}^2$	NE $\varnothing 90 - 120 \text{ m}^2$	NE $\varnothing 120 - 200 \text{ m}^2$	NE $\varnothing > 200 \text{ m}^2$	Summe
vor 1900	0%	17%	36%	31%	15%	1%	100%
1900 bis 1945	0%	10%	45%	28%	15%	2%	100%
1945 bis 1970	0%	25%	49%	21%	4%	0%	100%
1971 bis 1980	0%	34%	25%	34%	6%	0%	100%
1981 bis 1990	0%	10%	53%	32%	4%	0%	100%
1991 bis 2000	0%	10%	61%	24%	5%	0%	100%
2001 bis 2007	0%	5%	44%	42%	10%	0%	100%
k.A.	0%	40%	29%	24%	6%	1%	100%
<b>Summe</b>	<b>0%</b>	<b>21%</b>	<b>45%</b>	<b>26%</b>	<b>7%</b>	<b>1%</b>	<b>100%</b>
<b>Anzahl NE</b>	<b>370</b>	<b>63.966</b>	<b>141.146</b>	<b>82.523</b>	<b>21.990</b>	<b>1.873</b>	<b>311.868</b>

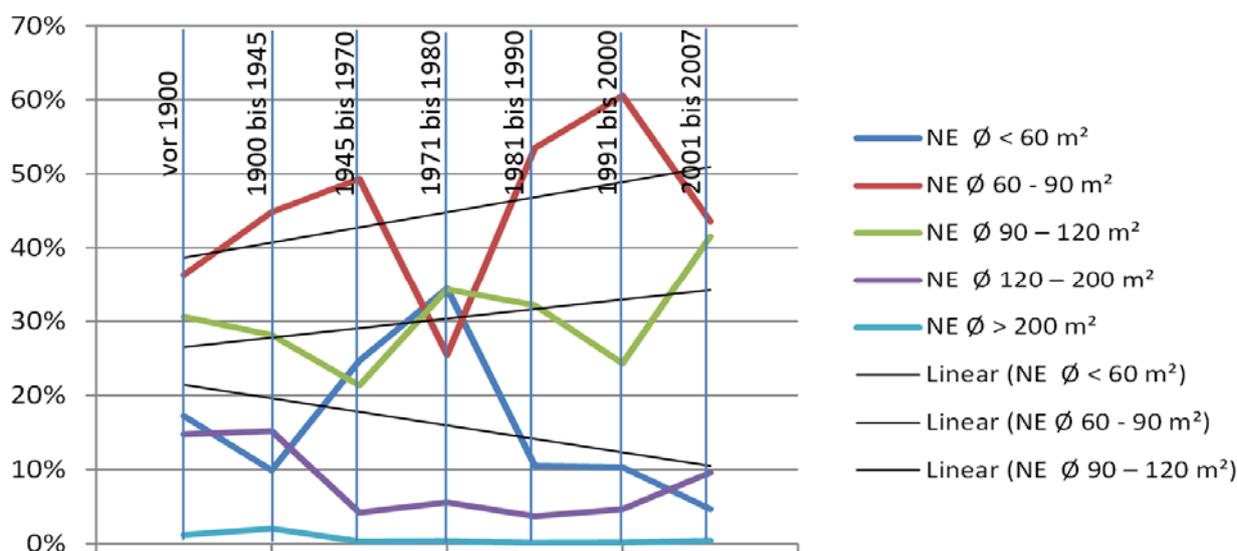


Abbildung A1.b - 2: Darstellung der zeitlichen Entwicklung der Größen von Nutzungseinheiten (Gebäudeklasse 4)

Tabelle A1.b - 6: Entwicklung der Größen von Nutzungseinheiten über das Gebäudealter (Gebäudeklasse 5)

Baujahr	k.A.	NE $\varnothing < 60 \text{ m}^2$	NE $\varnothing 60 - 90 \text{ m}^2$	NE $\varnothing 90 - 120 \text{ m}^2$	NE $\varnothing 120 - 200 \text{ m}^2$	NE $\varnothing > 200 \text{ m}^2$	Summe
vor 1900	0%	10%	22%	31%	35%	1%	100%
1900 bis 1945	0%	7%	26%	31%	32%	4%	100%
1945 bis 1970	0%	33%	44%	19%	4%	0%	100%
1971 bis 1980	0%	38%	33%	26%	3%	0%	100%
1981 bis 1990	0%	13%	46%	36%	6%	0%	100%
1991 bis 2000	0%	11%	63%	23%	3%	0%	100%
2001 bis 2007	0%	11%	51%	31%	7%	0%	100%
k.A.	3%	55%	23%	15%	4%	0%	100%
<b>Summe</b>	<b>0%</b>	<b>28%</b>	<b>41%</b>	<b>23%</b>	<b>7%</b>	<b>0%</b>	<b>100%</b>
<b>Anzahl NE</b>	<b>491</b>	<b>49.466</b>	<b>71.313</b>	<b>40.756</b>	<b>11.910</b>	<b>816</b>	<b>174.752</b>

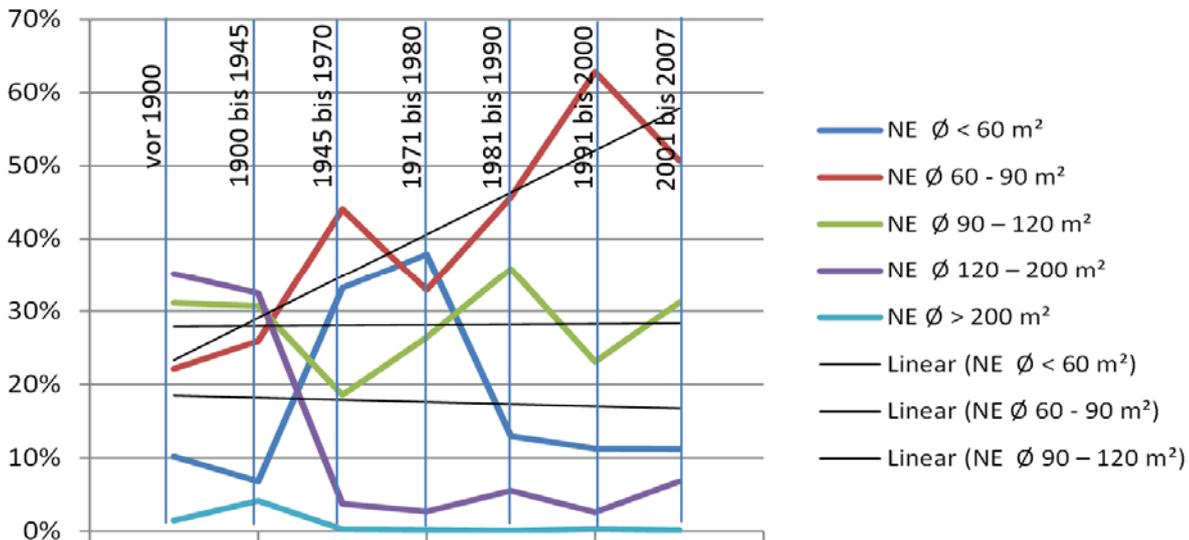


Abbildung A1.b - 3: Darstellung der zeitlichen Entwicklung der Größen von Nutzungseinheiten (Gebäudeklasse 5)

Tabelle A1.b - 7: Entwicklung der Größen von Nutzungseinheiten über das Gebäudealter (Gebäudeklasse 3,4,5)

Baujahr	k.A.	NE $\varnothing < 60 \text{ m}^2$	NE $\varnothing 60 - 90 \text{ m}^2$	NE $\varnothing 90 - 120 \text{ m}^2$	NE $\varnothing 120 - 200 \text{ m}^2$	NE $\varnothing > 200 \text{ m}^2$	Summe
vor 1900	0%	19%	33%	29%	18%	1%	100%
1900 bis 1945	0%	11%	41%	29%	17%	2%	100%
1945 bis 1970	0%	30%	46%	19%	4%	0%	100%
1971 bis 1980	0%	35%	30%	31%	5%	0%	100%
1981 bis 1990	0%	11%	51%	32%	5%	0%	100%
1991 bis 2000	0%	11%	63%	22%	4%	0%	100%
2001 bis 2007	0%	7%	45%	38%	9%	0%	100%
k.A.	1%	44%	25%	23%	6%	0%	100%
<b>Summe</b>	<b>0%</b>	<b>24%</b>	<b>43%</b>	<b>25%</b>	<b>7%</b>	<b>0%</b>	<b>100%</b>
<b>Anzahl NE</b>	<b>1.223</b>	<b>151.193</b>	<b>267.937</b>	<b>152.867</b>	<b>42.156</b>	<b>3.080</b>	<b>618.456</b>

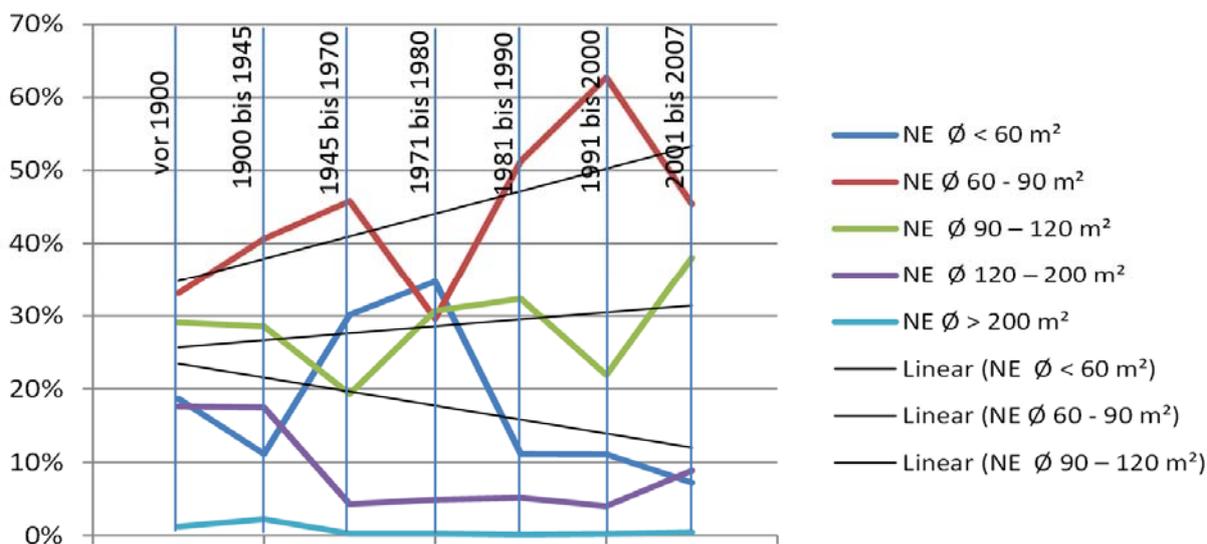


Abbildung A1.b - 4: Darstellung der zeitlichen Entwicklung der Größen von Nutzungseinheiten (Gebäudeklasse 3,4,5)

**A1.c Auswertung der statistischen Veröffentlichungen zu den Feuerwehren der Bundesländer**

Tabelle A1.c-1: Zusammenstellung statistischer Veröffentlichungen zu Brandeinsätzen der Bundesländer im Jahr 2010

2010	Kleinbrand a		Kleinbrand b		Mittelfeuer		Großbrand		Summe	Quelle
Bayern (BY)	3.815	23%	9.957	60%	2.128	13%	671	4%	16.572	(STMI,2010)
Brandenburg (BB)	1.888	29%	3.087	48%	1.089	17%	365	6%	6.430	(MI.BB,2010)
Hamburg (HH)	2.153	54%	1.551	39%	250	6%	23	0,6%	3.978	(BIS.HH,2010)
Hessen (HE)	10.619	58%	5.797	32%	1.403	8%	383	2%	18.203	(MIS.HE,2010)
Niedersachsen (NI)	8.033	40%	7.889	39%	3.004	15%	1.372	6,8%	20.299	(MIS.NI,2010)
Nordrhein-Westfalen (NW)	in Kleinbrand b enthalten		33.687	87%	3.987	10%	1.077	3%	38.752	(MIK.NRW,2010)
Rheinland-Pfalz (RP)	3.508	41%	3.256	38%	1.236	15%	458	5,4%	8.459	(MISI.RP,2010)
Sachsen (SN)	380	40%	517	54%	43	5%	9	1%	950	(BK.SN,2010)
Sachsen-Anhalt (ST)	1.471	28%	2.677	52%	779	15%	238	4,6%	5.166	(MI.ST,2010)
Schleswig-Holstein (SH)	2.670	38%	2.448	35%	1.241	18%	608	9%	6.968	(IM.SH,2010)
Thüringen (TH)	in Kleinbrand b enthalten		2.273	83%	363	13%	114	4,1%	2.751	(IM.TH,2010)

Tabelle A1.c-2: Zusammenstellung statistischer Veröffentlichungen zu Brandeinsätzen der Bundesländer im Jahr 2011

2011	Kleinbrand a		Kleinbrand b		Mittelfeuer		Großbrand		Summe	Quelle
Bayern (BY)	3.299	21%	9.630	63%	1.920	12%	526	3%	15.376	(STMI,2011)
Brandenburg (BB)	1.988	28%	3.512	50%	1.112	16%	390	6%	7.003	(MI.BB,2011)
Hamburg (HH)	5.154	73%	1.577	22%	278	4%	13	0%	7.023	(BIS.HH,2011)
Hessen (HE)	11.966	58%	6.393	31%	1.801	9%	467	2%	20.628	(MIS.HE,2011)
Niedersachsen (NI)	8.982	39%	9.356	41%	3.283	14%	1.474	6%	23.096	(MIS.NI,2011)
Nordrhein-Westfalen (NW)	in Kleinbrand b enthalten		35.095	87%	4.050	10%	1.068	3%	40.214	(MIK.NRW,2011)
Rheinland-Pfalz (RP)	3.394	40%	3.094	37%	1.370	16%	557	7%	8.416	(MISI.RP,2011)
Saarland (SL)	in Kleinbrand b enthalten		2.731	84%	405	13%	101	3%	3.238	(MIKE.SL,2011)
Sachsen (SN)	435	37%	673	57%	73	6%	3	0%	1.185	(BK.SN,2011)
Sachsen-Anhalt (ST)	1.294	23%	3.236	57%	961	17%	227	4%	5.719	(MI.ST,2011)
Schleswig-Holstein (SH)	2.983	38%	2.898	37%	1.363	18%	535	7%	7.780	(IM.SH,2011)
Thüringen (TH)	in Kleinbrand b enthalten		2.574	81%	461	15%	124	4%	3.160	(IM.TH,2011)

Tabelle A1.c-3: Zusammenstellung statistischer Veröffentlichungen zu Brandeinsätzen der Bundesländer im Jahr 2012

2012	Kleinbrand a		Kleinbrand b		Mittelfeuer		Großbrand		Summe	Quelle
Bayern (BY)	3.286	23%	8.843	62%	1.833	13%	385	3%	14.348	(STMI,2012)
Brandenburg (BB)	2.129	31%	3.226	47%	1.200	17%	365	5%	6.921	(MI.BB,2012)
Hamburg (HH)	4.853	76%	1.307	20%	206	3%	13	0%	6.380	(BIS.HH,2012)
Hessen (HE)	11.443	59%	6.033	31%	1.460	8%	441	2%	19.378	(MIS.HE,2012)
Niedersachsen (NI)	7.370	36%	8.754	43%	2.832	14%	1.464	7%	20.421	(MIS.NI,2012)
Nordrhein-Westfalen (NW)	in Kleinbrand b enthalten		32.151	87%	3.914	11%	1.039	3%	37.105	(MIK.NRW,2012)
Rheinland-Pfalz (RP)	3.218	43%	2.826	38%	1.119	15%	373	5%	7.537	(MISI.RP,2012)
Saarland (SL)	in Kleinbrand b enthalten		2.177	81%	411	15%	91	3%	2.680	(MIKE.SL,2012)
Sachsen (SN)	395	43%	475	51%	48	5%	10	1%	929	(BK.SN,2012)
Sachsen-Anhalt (ST)	1.463	26%	2.954	53%	950	17%	243	4%	5.611	(MI.ST,2012)
Schleswig-Holstein (SH)	3.343	43%	2.657	34%	1.230	16%	577	7%	7.808	(IM.SH,2012)
Thüringen (TH)	in Kleinbrand b enthalten		2.547	83%	394	13%	126	4%	3.068	(IM.TH,2012)

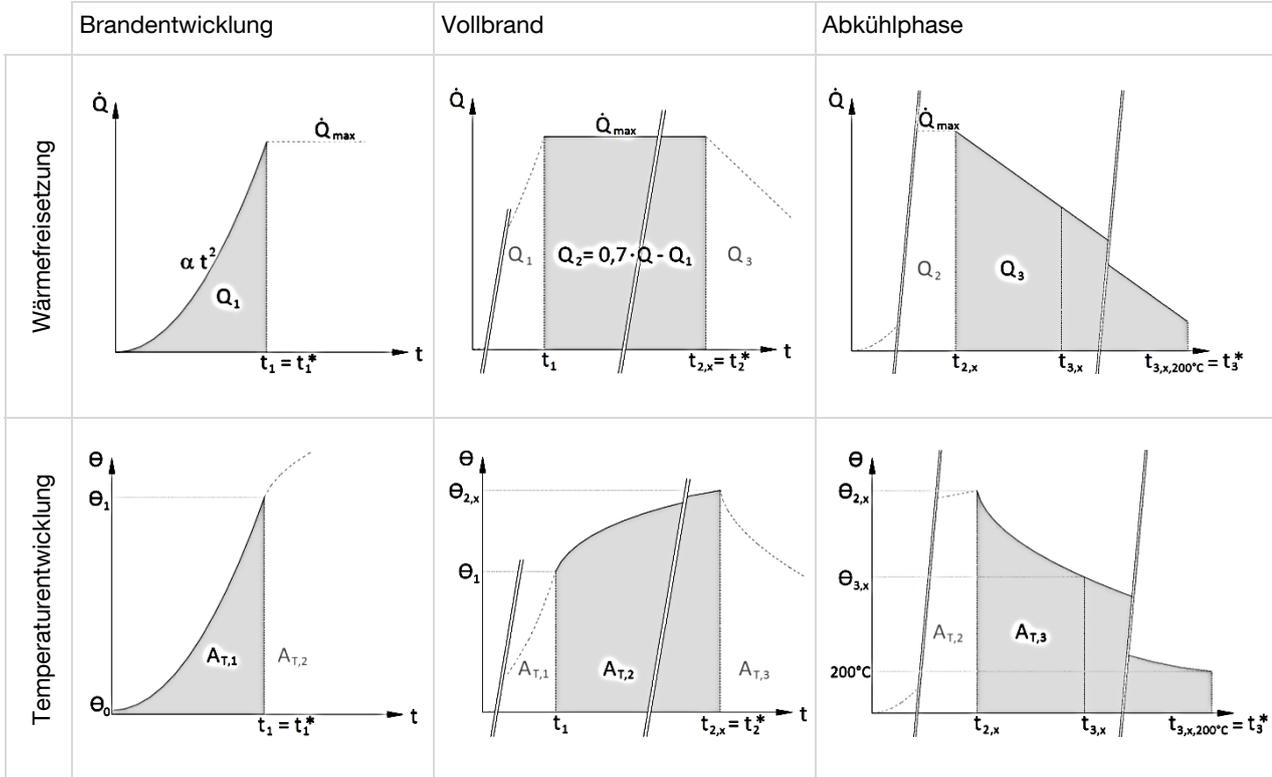
Tabelle A1.c-4: Zusammenfassung statistischer Veröffentlichungen zu Brandeinsätzen der Bundesländer 2010 - 2012

<b>2010 - 2012</b>	<b>Kleinbrand a</b>		<b>Kleinbrand b</b>		<b>Mittelfeuer</b>		<b>Großbrand</b>		<b>Summe</b>	<b>EW</b>	<b>Brände/EW/a</b>
Bayern (BY)	10.400	22%	28.430	61%	5.881	13%	1.582	3%	46.293	12.519.600	1,23E-03
Brandenburg (BB)	6.005	30%	9.825	48%	3.401	17%	1.120	6%	20.351	2.449.500	2,77E-03
Hamburg (HH)	12.160	70%	4.435	26%	734	4%	49	0%	17.378	1.734.300	3,34E-03
Hessen (HE)	34.028	58%	18.223	31%	4.664	8%	1.291	2%	58.206	6.016.500	3,22E-03
Niedersachsen (NI)	24.385	38%	25.999	41%	9.119	14%	4.310	7%	63.813	7.779.000	2,73E-03
Nordrhein-Westfalen (NW)	in Kleinbrand b		100.933	87%	11.951	10%	3.184	3%	116.068	17.554.300	2,20E-03
Rheinland-Pfalz (RP)	10.120	41%	9.176	38%	3.725	15%	1.388	6%	24.409	3.990.300	2,04E-03
Saarland (SL)	in Kleinbrand b		4.908	83%	816	14%	192	3%	5.916	994.300	1,98E-03
Sachsen (SN)	1.210	40%	1.665	54%	164	5%	22	1%	3.061	4.050.200	2,52E-04
Sachsen-Anhalt (ST)	4.228	26%	8.867	54%	2.690	16%	708	4%	16.493	2.259.400	2,43E-03
Schleswig-Holstein (SH)	8.996	40%	8.003	35%	3.834	17%	1.720	8%	22.553	2.806.500	2,68E-03
Thüringen (TH)	in Kleinbrand b		7.394	82%	1.218	14%	364	4%	8.976	2.170.500	1,38E-03

**Anhang 2 zu Abschnitt 7.3 – Verwendete Gleichungssysteme für die Simulationsrechnung**

**A2.a Natürlicher Brandverlauf ohne Flashover und ohne Einfluss der Feuerwehr**

**Tabelle A2-1: Grafische Darstellung des Brandverlaufes für den Fall a)**



Aus DIN EN 1991-1-2 NA Anhang AA zu Grunde liegende und daraus für die Simulationsrechnung zusätzlich abgeleitete Gleichungssysteme:

Ermittlung der Wärmefreisetzungsraten

[A2-1]  $\dot{Q}_{max} = MIN [\dot{Q}_{max,v}; \dot{Q}_{max,f}]$  [MW]

[A2-2]  $\dot{Q}_{max,v} = 1,21 \cdot A_W \cdot \sqrt{h_w}$  [MW]

[A2-3]  $\dot{Q}_{max,f} = 0,25 \cdot A_f$  [MW]

Brandentwicklungsphase

[A2-4]  $t_1 = \sqrt{\frac{1055 \cdot \dot{Q}_{max}}{\alpha}}$  [sec]

[A2-5] Öffnungsfaktor  $O = \frac{A_w \cdot \sqrt{h_w}}{A_t}$  [m<sup>1/2</sup>]

[A2-6] k-Faktor  $k = \sqrt[3]{\left(\frac{\dot{Q}_{max,f}}{A_w \cdot \sqrt{h_w} \cdot A_t \cdot b}\right)}$  [-]

[A2-7]  $\theta_{1,v} = -8,75 \cdot \frac{1}{O} - 0,1 \cdot b + 1175$  [°C]

[A2-8]  $\theta_{1,f} = 24000 \cdot k + 20$  für  $k \leq 0,04$  sonst  $\theta_{1,f} = 980^\circ C$  [°C]

Vollbrandphase

$$[A2-9] \quad t_2 = t_1 + \frac{q_{ref} \cdot A_f^{0,7} \cdot \frac{t_1^3}{3} \cdot \frac{\alpha}{1055}}{\dot{Q}_{max}} \quad [\text{sec}]$$

$$[A2-10] \quad t_{2,x} = t_1 + \frac{q_{fi,k} \cdot A_f^{0,7} \cdot \frac{t_1^3}{3} \cdot \frac{\alpha}{1055}}{\dot{Q}_{max}} \quad [\text{sec}]$$

$$[A2-11] \quad \theta_{2,v} = (0,004 \cdot b - 17) \cdot \frac{1}{0} - 0,4 \cdot b + 2175 \quad \theta_{2,v} \leq 1340^\circ\text{C} \quad [^\circ\text{C}]$$

$$[A2-12] \quad \theta_{2,f} = 33000 \cdot k + 20 \quad \text{für } k \leq 0,04 \quad \text{sonst } \theta_{2,f} = 1340^\circ\text{C} \quad [^\circ\text{C}]$$

$$[A2-13] \quad \theta_{2,x} = (\theta_2 - \theta_1) \cdot \sqrt{\frac{t_{2,x} - t_1}{t_2 - t_1}} + \theta_1$$

Abkühlphase

$$[A2-14] \quad t_3 = t_2 + \frac{q_{ref} \cdot A_f^{0,3 \cdot 2}}{\dot{Q}_{max}} \quad [\text{sec}]$$

$$[A2-15] \quad t_{3,x} = t_{2,x} + \frac{q_{fi,k} \cdot A_f^{0,3 \cdot 2}}{\dot{Q}_{max}} \quad [\text{sec}]$$

$$[A2-16] \quad \theta_{3,v} = -5 \cdot \frac{1}{0} - 0,16 \cdot b + 1060 \quad [^\circ\text{C}]$$

$$[A2-17] \quad \theta_{3,f} = 16000 \cdot k + 20 \quad \text{für } k \leq 0,04 \quad \text{sonst } \theta_{3,f} = 660^\circ\text{C} \quad [^\circ\text{C}]$$

$$[A2-18] \quad \theta_{3,x} = \theta_3 \cdot \frac{\log_{10}\left(\frac{t_{3,x}+1}{60}\right)}{\log_{10}\left(\frac{t_3+1}{60}\right)} \quad [^\circ\text{C}]$$

$$[A2-19] \quad t_{3,x,200^\circ\text{C}} = \left(\frac{200 - \theta_{2,x}}{\theta_{3,x} - \theta_{2,x}}\right)^2 \cdot (t_{3,x} - t_{2,x}) + t_{2,x} \quad [\text{sec}]$$

Ermittlung der Flächen (Flächenintegral) unter der Temperatur-Zeit-Kurve

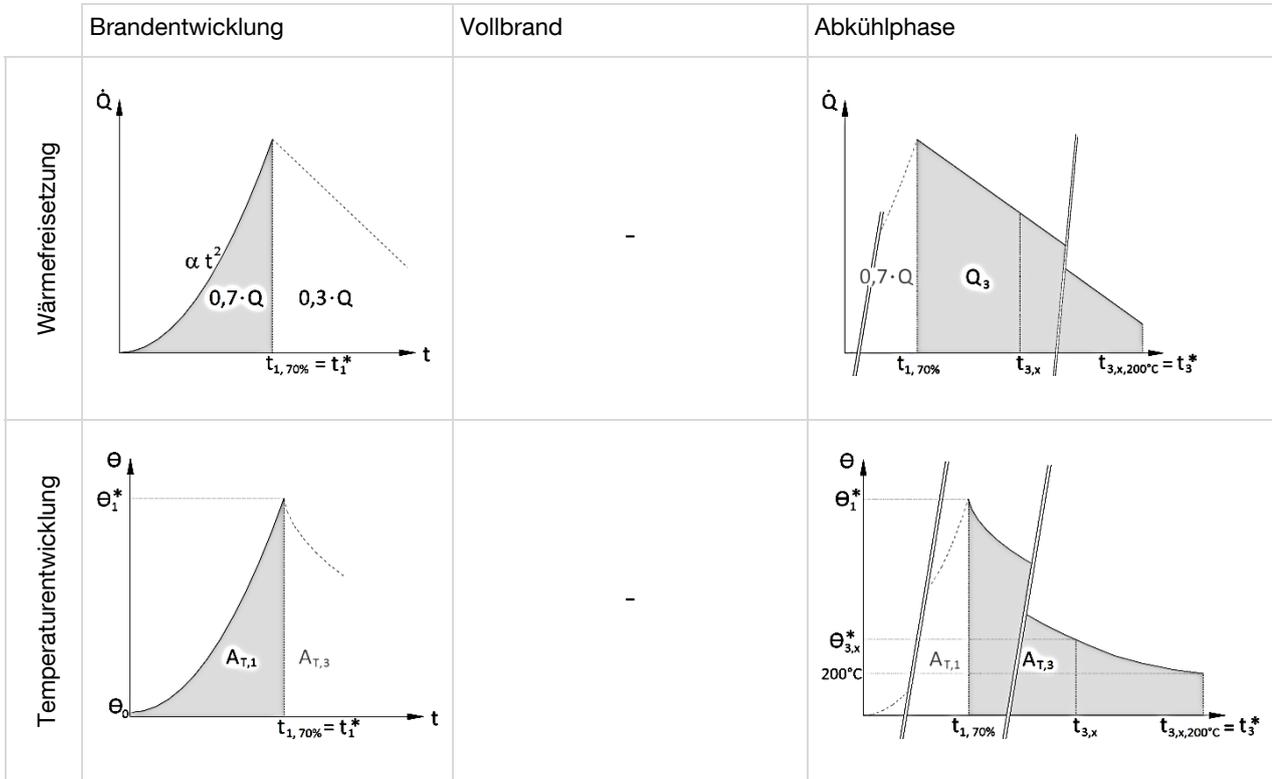
$$[A2-20] \quad A_{T,1} = \frac{(\theta_1 - \theta_0) \cdot t_1}{3} + \theta_0 \cdot t_1 \quad [\text{K} \cdot \text{sec}]$$

$$[A2-21] \quad A_{T,2} = (\theta_2 - \theta_1) \cdot \frac{2 \cdot (t_{2,x} - t_1) \cdot \sqrt{\frac{(t_{2,x} - t_1)}{(t_2 - t_1)}}}{3} + \theta_1 \cdot (t_{2,x} - t_1) \quad [\text{K} \cdot \text{sec}]$$

$$[A2-22] \quad A_{T,3} = (\theta_{3,x} - \theta_{2,x}) \cdot \frac{2 \cdot (t_{3,x,200^\circ\text{C}} - t_{2,x}) \cdot \sqrt{\frac{(t_{3,x,200^\circ\text{C}} - t_{2,x})}{(t_{3,x} - t_{2,x})}}}{3} + \theta_{2,x} \cdot (t_{3,x,200^\circ\text{C}} - t_{2,x}) \quad [\text{K} \cdot \text{sec}]$$

**A2.b Natürlicher Brandverlauf ohne Flashover mit Umsetzung von 70% der Brandlast in der Brandentwicklungsphase und ohne Einfluss der Feuerwehr**

**Tabelle A2-2: Grafische Darstellung des Brandverlaufes für den Fall b)**



**Brandentwicklungsphase**

[A2-23] 
$$t_{1,70\%} = \sqrt[3]{\frac{q_{f,i,k} \cdot A_f \cdot 0,7 \cdot 3}{\alpha}}$$
 [sec]

[A2-24] 
$$\theta_1^* = \frac{(\theta_1 - \theta_0)}{t_1^2} \cdot t_{1,70\%}^2 + \theta_0$$
 [°C]

**Abkühlphase**

[A2-25] 
$$t_{3,x} = t_{1,70\%} + \frac{q_{f,i,k} \cdot A_f \cdot 0,3 \cdot 2}{\dot{Q}_{max}}$$
 [sec]

[A2-26] 
$$\theta_{3,x} = \theta_3 \cdot \frac{\log_{10}\left(\frac{t_{3,x}+1}{60}\right)}{\log_{10}\left(\frac{t_3}{60}+1\right)}$$
 [°C]

[A2-27] 
$$t_{3,x,200^\circ C} = \left(\frac{200 - \theta_1^*}{\theta_{3,x} - \theta_1^*}\right)^2 \cdot (t_{3,x} - t_{1,70\%}) + t_{1,70\%}$$
 [sec]

**Ermittlung der Flächen (Flächenintegral) unter der Temperatur-Zeit-Kurve**

[A2-28] 
$$A_{T,1} = \frac{(\theta_1 - \theta_0)}{t_1^2} \cdot \frac{t_{1,70\%}^3}{3} + \theta_0 \cdot t_{1,70\%}$$
 [K·sec]

$$[A2-29] \quad A_{T,3} = (\theta_{3,x} - \theta_1^*) \cdot \frac{2 \cdot (t_{3,x,200^\circ\text{C}} - t_{1,70\%}) \cdot \sqrt{\frac{(t_{3,x,200^\circ\text{C}} - t_{1,70\%})}{(t_{3,x} - t_{1,70\%})}}}{3} + \theta_1^* \cdot (t_{3,x,200^\circ\text{C}} - t_{1,70\%})$$

**A2.c Natürlicher Brandverlauf ohne Flashover mit Umsetzung von 70% der Brandlast in der Brandentwicklungsphase und Einfluss der Feuerwehr**

**Tabelle A2-3: Grafische Darstellung des Brandverlaufes für den Fall c)**

	Brandentwicklung	Vollbrand	Abkühlphase
Wärmefreisetzung		-	
Temperaturentwicklung		-	

Brandentwicklungs- und Abkühlphase

wie in Fall b)

Ermittlung der Flächen (Flächenintegral) unter der Temperatur-Zeit-Kurve

$$[A2-30] \quad A_{T,3} = (\theta_{3,x} - \theta_1^*) \cdot \frac{2 \cdot (t_{Lösch} - t_{1,70\%}) \cdot \sqrt{\frac{(t_{Lösch} - t_{1,70\%})}{(t_{3,x} - t_{1,70\%})}}}{3} + \theta_1^* \cdot (t_{Lösch} - t_{1,70\%}) \quad [\text{K} \cdot \text{sec}]$$

**A2.d Natürlicher Brandverlauf ohne Flashover mit Einfluss der Feuerwehr in der Brandentwicklungsphase**

**Tabelle A2-4: Grafische Darstellung des Brandverlaufes für den Fall d)**

	Brandentwicklung	Vollbrand	Abkühlphase
Wärmefreisetzung		-	-
Temperaturentwicklung		-	-

**Brandentwicklungsphase**

[A2-31]  $t_{L\ddot{o}sch} = t_{Detektion} + t_{Meldung} + t_{Einsatz}$  [sec]

[A2-32]  $\theta_{1}^* = \frac{(\theta_1 - \theta_0)}{t_1^2} \cdot t_{L\ddot{o}sch}^2 + \theta_0$  [°C]

Ermittlung der Flächen (Flächenintegral) unter der Temperatur-Zeit-Kurve

[A2-33]  $A_{T,1} = \frac{(\theta_1 - \theta_0)}{t_1^2} \cdot \frac{t_{L\ddot{o}sch}^3}{3} + \theta_0 \cdot t_{L\ddot{o}sch}$  [K·sec]

A2.e Natürlicher Brandverlauf ohne Flashover mit Einfluss der Feuerwehr in der Vollbrandphase

Tabelle A2-5: Grafische Darstellung des Brandverlaufes für den Fall e)

	Brandentwicklung	Vollbrand	Abkühlphase
Wärmefreisetzung			-
Temperaturentwicklung			-

Brandentwicklungsphase

wie im Fall a)

Vollbrandphase

[A2-31]  $t_{L\ddot{o}s} = t_{Detektion} + t_{Meldung} + t_{Einsatz}$  [sec]

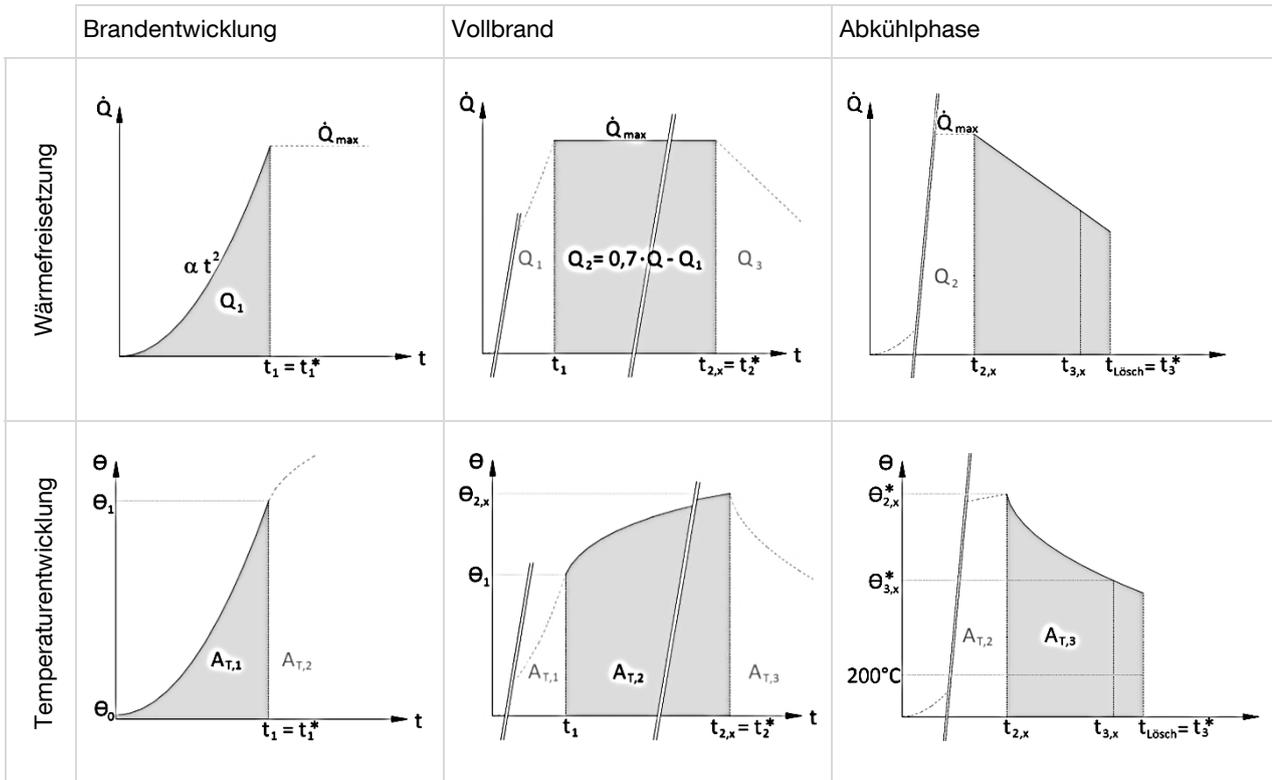
[A2-34]  $\theta_{2,x}^* = (\theta_2 - \theta_1) \cdot \sqrt{\frac{t_{L\ddot{o}s} - t_1}{t_2 - t_1}} + \theta_1$  [°C]

Ermittlung der Flächen (Flächenintegral) unter der Temperatur-Zeit-Kurve

[A2-35]  $A_{T,2} = (\theta_2 - \theta_1) \cdot \frac{2 \cdot (t_{L\ddot{o}s} - t_1) \cdot \sqrt{\frac{(t_{L\ddot{o}s} - t_1)}{(t_2 - t_1)}}}{3} + \theta_1 \cdot (t_{L\ddot{o}s} - t_1)$  [K·sec]

A2.f Natürlicher Brandverlauf ohne Flashover mit Einfluss der Feuerwehr in der Abkühlphase

Tabelle A2-6: Grafische Darstellung des Brandverlaufes für den Fall f)



Brandentwicklungsphase und Vollbrandphase

wie im Fall a)

Abkühlphase

$$[A2-31] \quad t_{L\ddot{o}s\ddot{c}h} = t_{Detektion} + t_{Meldung} + t_{Einsatz} \quad [sec]$$

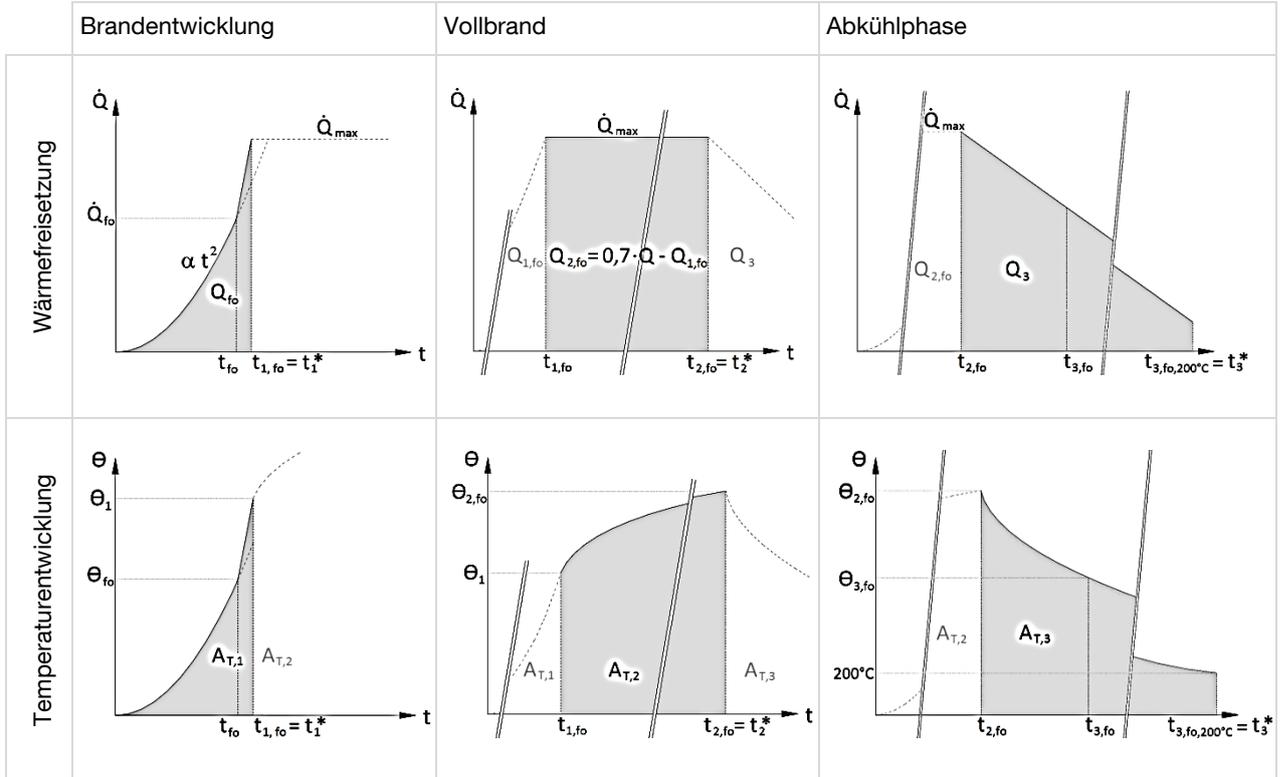
$$[A2-36] \quad \theta_{L\ddot{o}s\ddot{c}h} = (\theta_{3,x} - \theta_{2,x}) \cdot \sqrt{\frac{t_{L\ddot{o}s\ddot{c}h} - t_{2,x}}{t_{3,x} - t_{2,x}}} + \theta_{2,x} \quad [^\circ C]$$

Ermittlung der Flächen (Flächenintegral) unter der Temperatur-Zeit-Kurve

$$[A2-37] \quad A_{T,3} = (\theta_{3,x} - \theta_{2,x}) \cdot \frac{2 \cdot (t_{L\ddot{o}s\ddot{c}h} - t_{2,x}) \cdot \sqrt{\frac{(t_{L\ddot{o}s\ddot{c}h} - t_{2,x})}{(t_{3,x} - t_{2,x})}}}{3} + \theta_{2,x} \cdot (t_{L\ddot{o}s\ddot{c}h} - t_{2,x}) \quad [K \cdot sec]$$

A2.g Natürlicher Brandverlauf mit Flashover ohne Einfluss der Feuerwehr

Tabelle A2-7: Grafische Darstellung des Brandverlaufes für den Fall g)



Wärmefreisetzung bei Beginn des Flashovers und Anstieg

[A2-38]  $\dot{Q}_{fo} = 0,0078 \cdot A_t + 0,378 \cdot A_W \cdot \sqrt{h_w}$  [MW]

[A2-39]  $\dot{Q} = \dot{Q}_{fo} + (t - t_{fo}) \cdot v_{fo}$  [MW]

[A2-40]  $v_{fo} = 261.000 \cdot \alpha + 21$  für  $\alpha > 1,1 \cdot 10^{-5}$  [kW/sec]

[A2-41]  $v_{fo} = 271,95 \cdot \alpha^{0,2122}$  für  $\alpha \leq 1,1 \cdot 10^{-5}$  [kW/sec]

Brandentwicklungsphase

[A2-42]  $t_{fo} = \sqrt{\frac{1055 \cdot \dot{Q}_{fo}}{\alpha}}$  [sec]

[A2-43]  $t_{1,fo} = \left( \frac{\dot{Q}_{max} - \dot{Q}_{fo}}{v_{fo}} \right) + t_{fo}$  [sec]

[A2-44]  $Q_{1,fo} = \frac{t_{fo}^3}{3} \cdot \frac{\alpha}{1055} + \left( \frac{\dot{Q}_{max} + \dot{Q}_{fo}}{2} \right) \cdot (t_{1,fo} - t_{fo})$  [MJ]

[A2-45]  $\theta_{fo} = \frac{(\theta_1 - \theta_0)}{t_1^2} \cdot t_{fo}^2 + \theta_0$  [°C]

Vollbrandphase

$$[A2-46] \quad Q_{2,fo} = q_{fi,k} \cdot A_f \cdot 0,7 - Q_{1,fo} \quad [\text{MJ}]$$

$$[A2-47] \quad t_{2,fo} = t_{1,fo} + \frac{q_{fi,k} \cdot A_f \cdot 0,7 - Q_{1,fo}}{\dot{Q}_{max}} \quad [\text{sec}]$$

$$[A2-48] \quad \theta_{2,fo} = (\theta_2 - \theta_1) \cdot \sqrt{\frac{t_{2,fo} - t_{1,fo}}{t_2 - t_1}} + \theta_1 \quad [^\circ\text{C}]$$

Abkühlphase

$$[A2-49] \quad t_{3,fo} = t_{2,fo} + \frac{q_{fi,k} \cdot A_f \cdot 0,3 \cdot 2}{\dot{Q}_{max}} \quad [\text{sec}]$$

$$[A2-50] \quad \theta_{3,fo} = \theta_3 \cdot \frac{\log_{10}\left(\frac{t_{3,fo}}{60} + 1\right)}{\log_{10}\left(\frac{t_3}{60} + 1\right)} \quad [^\circ\text{C}]$$

$$[A2-51] \quad t_{3,fo,200^\circ\text{C}} = \left(\frac{200 - \theta_{2,fo}}{\theta_{3,fo} - \theta_{2,fo}}\right)^2 \cdot (t_{3,fo} - t_{2,fo}) + t_{2,fo} \quad [\text{sec}]$$

Ermittlung der Flächen (Flächenintegral) unter der Temperatur-Zeit-Kurve

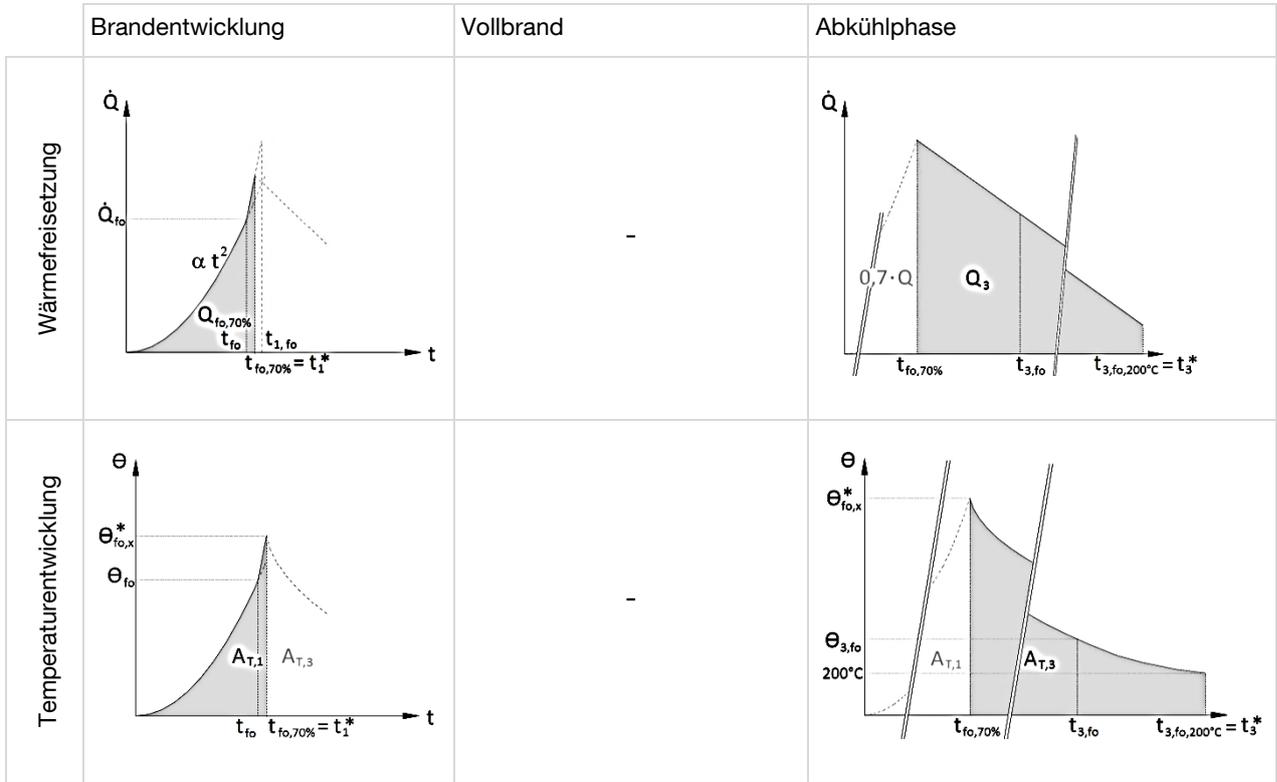
$$[A2-52] \quad A_{T,1} = \frac{(\theta_1 - \theta_0)}{t_1^2} \cdot \frac{t_{fo}^3}{3} + \theta_0 \cdot t_{fo} + \left(\frac{\theta_1 + \theta_{fo}}{2}\right) \cdot (t_{1,fo} - t_{fo}) \quad [\text{K} \cdot \text{sec}]$$

$$[A2-53] \quad A_{T,2} = (\theta_2 - \theta_1) \cdot \frac{2 \cdot (t_{2,fo} - t_{1,fo}) \cdot \sqrt{\frac{(t_{2,fo} - t_{1,fo})}{(t_2 - t_1)}}}{3} + \theta_1 \cdot (t_{2,fo} - t_{1,fo}) \quad [\text{K} \cdot \text{sec}]$$

$$[A2-54] \quad A_{T,3} = (\theta_{3,fo} - \theta_{2,fo}) \cdot \frac{2 \cdot (t_{3,fo,200^\circ\text{C}} - t_{2,fo}) \cdot \sqrt{\frac{(t_{3,fo,200^\circ\text{C}} - t_{2,fo})}{(t_{3,fo} - t_{2,fo})}}}{3} + \theta_{2,fo} \cdot (t_{3,fo,200^\circ\text{C}} - t_{2,fo}) \quad [\text{K} \cdot \text{sec}]$$

**A2.h Natürlicher Brandverlauf mit Flashover und Umsetzung von 70% der Brandlast in der Brandentwicklungsphase ohne Einfluss der Feuerwehr**

**Tabelle A2-8: Grafische Darstellung des Brandverlaufes für den Fall h)**



**Brandentwicklungsphase**

[A2-55] 
$$t_{fo,70\%} = \sqrt{\left(\frac{1000 \cdot Q_{fo}}{v_{fo}}\right)^2 - \frac{2000 \cdot (0,7 \cdot Q - Q_{fo})}{v_{fo}}} - \frac{1000 \cdot Q_{fo}}{v_{fo}} + t_{fo}$$
 [sec]

[A2-56] 
$$\theta_{fo,x}^* = \frac{(\theta_{1,fo} - \theta_{fo}) \cdot (t_{fo,70\%} - t_{fo})}{(t_{1,fo} - t_{fo})} + \theta_{fo}$$
 [°C]

**Abkühlphase**

[A2-57] 
$$t_{3,fo,70\%} = t_{fo,70\%} + \frac{q_{fi,k} \cdot A_f \cdot 0,3 \cdot 2}{\dot{Q}_{max}}$$
 [sec]

[A2-58] 
$$\theta_{3,fo,70\%} = \theta_3 \cdot \frac{\log_{10}\left(\frac{t_{3,fo,70\%} + 1}{60}\right)}{\log_{10}\left(\frac{t_3 + 1}{60}\right)}$$
 [°C]

[A2-59] 
$$t_{3,fo,70\%,200^\circ C} = \left(\frac{200 - \theta_{fo,x}^*}{\theta_{3,fo,70\%} - \theta_{fo,x}^*}\right)^2 \cdot (t_{3,fo,70\%} - t_{fo,70\%}) + t_{fo,70\%}$$
 [sec]

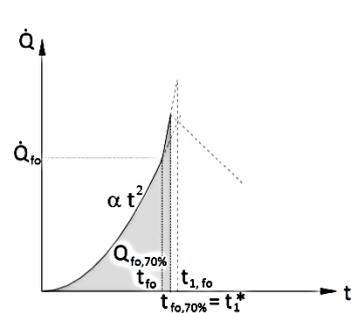
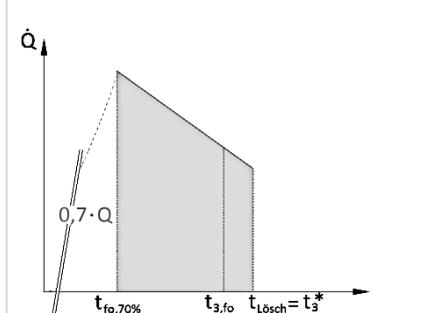
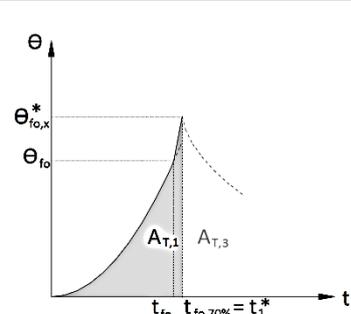
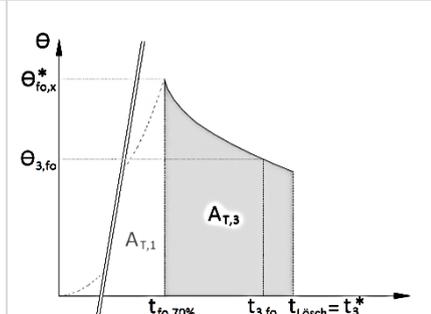
Ermittlung der Flächen (Flächenintegral) unter der Temperatur-Zeit-Kurve

$$[A2-60] \quad A_{T,1} = \frac{(\theta_1 - \theta_0)}{t_1^2} \cdot \frac{t_{fo}^3}{3} + \theta_0 \cdot t_{fo} + \left( \frac{\theta_{fo,x} + \theta_{fo}}{2} \right) \cdot (t_{fo,70\%} - t_{fo}) \quad [K \cdot \text{sec}]$$

$$[A2-61] \quad A_{T,3} = (\theta_{3,fo,70\%} - \theta_{fo,x}^*) \cdot \frac{2 \cdot (t_{3,fo,70\%,200^\circ C} - t_{fo,70\%}) \cdot \sqrt{\frac{(t_{3,fo,70\%,200^\circ C} - t_{fo,70\%})}{(t_{3,fo} - t_{fo,70\%})}}}{3} + \theta_{fo,x}^* \cdot (t_{3,fo,70\%,200^\circ C} - t_{fo,70\%}) \quad [K \cdot \text{sec}]$$

**A2.i Natürlicher Brandverlauf mit Flashover und Umsetzung von 70% der Brandlast in der Brandentwicklungsphase und Einfluss der Feuerwehr**

**Tabelle A2-9: Grafische Darstellung des Brandverlaufes für den Fall i)**

	Brandentwicklung	Vollbrand	Abkühlphase
Wärmefreisetzung		-	
Temperaturentwicklung		-	

Brandentwicklungs- und Abkühlphase

wie im Fall g)

Ermittlung der Flächen (Flächenintegral) unter der Temperatur-Zeit-Kurve

$$[A2-62] \quad A_{T,3} = (\theta_{3,fo,70\%} - \theta_{fo,x}^*) \cdot \frac{2 \cdot (t_{L\ddot{o}s\text{ch}} - t_{fo,70\%}) \cdot \sqrt{\frac{(t_{L\ddot{o}s\text{ch}} - t_{fo,70\%})}{(t_{3,fo,70\%} - t_{fo,70\%})}}}{3} + \theta_{fo,x}^* \cdot (t_{L\ddot{o}s\text{ch}} - t_{fo,70\%})$$

A2.j Natürlicher Brandverlauf mit Flashover und Einfluss der Feuerwehr in der Flashoverphase

Tabelle A2-10: Grafische Darstellung des Brandverlaufes für den Fall j)

	Brandentwicklung	Vollbrand	Abkühlphase
Wärmefreisetzung		-	-
Temperaturentwicklung		-	-

Brandentwicklungsphase

[A2-31]  $t_{L\ddot{o}s\ddot{c}h} = t_{Detektion} + t_{Meldung} + t_{Einsatz}$  [sec]

[A2-63]  $\theta_{fo,x}^{**} = \frac{(\theta_{1,fo} - \theta_{fo}) \cdot (t_{L\ddot{o}s\ddot{c}h} - t_{fo})}{(t_{1,fo} - t_{fo})} + \theta_{fo}$  [°C]

Ermittlung der Flächen (Flächenintegral) unter der Temperatur-Zeit-Kurve

[A2-64]  $A_{T,1} = \frac{(\theta_1 - \theta_0)}{t_1^2} \cdot \frac{t_{fo}^3}{3} + \theta_0 \cdot t_{fo} + \left( \frac{\theta_{fo,x}^{**} + \theta_{fo}}{2} \right) \cdot (t_{L\ddot{o}s\ddot{c}h} - t_{fo})$  [K·sec]

**A2.k Natürlicher Brandverlauf mit Flashover und Einfluss der Feuerwehr in der Vollbrandphase**

**Tabelle A2-11: Grafische Darstellung des Brandverlaufes für den Fall k)**

	Brandentwicklung	Vollbrand	Abkühlphase
Wärmefreisetzung			-
Temperaturentwicklung			-

Brandentwicklungsphase

wie im Fall f)

Vollbrandphase

[A2-31]  $t_{L\ddot{o}s\ddot{c}h} = t_{Detektion} + t_{Meldung} + t_{Einsatz}$  [sec]

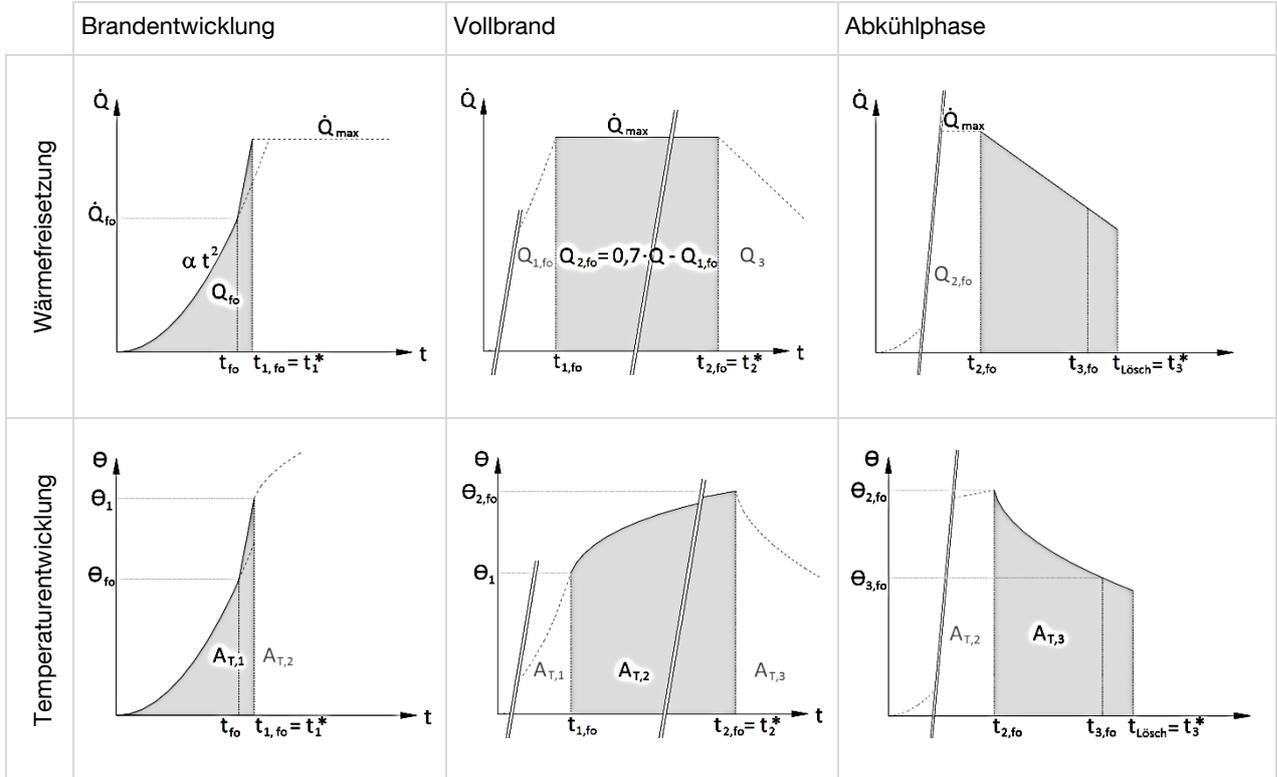
[A2-65]  $\theta_{2,fo}^* = (\theta_2 - \theta_1) \cdot \sqrt{\frac{t_{L\ddot{o}s\ddot{c}h} - t_{1,fo}}{t_2 - t_1}} + \theta_1$  [°C]

Ermittlung der Flächen (Flächenintegral) unter der Temperatur-Zeit-Kurve

[A2-66]  $A_{T,2} = (\theta_2 - \theta_1) \cdot \frac{2 \cdot (t_{L\ddot{o}s\ddot{c}h} - t_{1,fo}) \cdot \sqrt{\frac{(t_{L\ddot{o}s\ddot{c}h} - t_{1,fo}}{(t_2 - t_1))}}}{3} + \theta_1 \cdot (t_{L\ddot{o}s\ddot{c}h} - t_{1,fo})$  [K·sec]

A2.1 Natürlicher Brandverlauf mit Flashover und Einfluss der Feuerwehr in der Abkühlphase

Tabelle A2-12: Grafische Darstellung des Brandverlaufes für den Fall I)



Brandentwicklungsphase und Vollbrandphase

wie im Fall g)

Abkühlphase

[A2-31]  $t_{L\ddot{o}s\ddot{c}h} = t_{Detektion} + t_{Meldung} + t_{Einsatz}$  [sec]

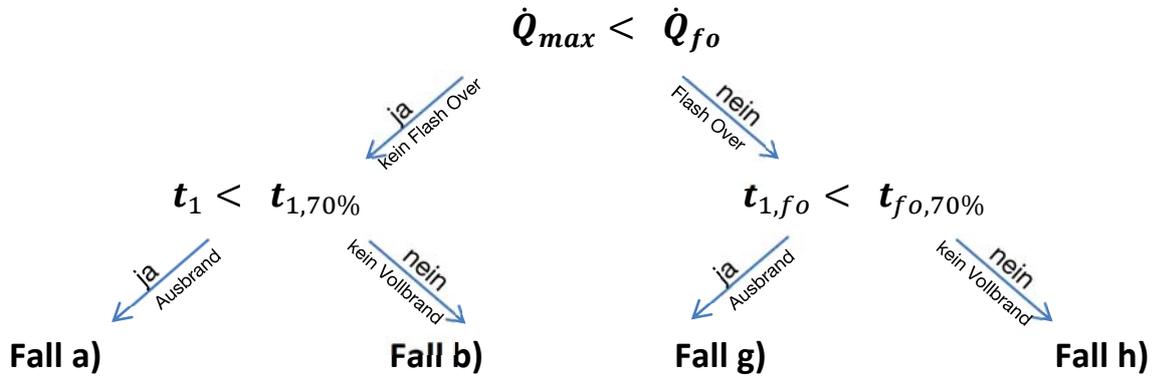
[A2-67]  $\theta_{3,x^*} = (\theta_{3,fo} - \theta_{2,fo}) \cdot \sqrt{\frac{t_{L\ddot{o}s\ddot{c}h} - t_{2,fo}}{t_{3,fo} - t_{2,fo}}} + \theta_{2,fo}$  [°C]

Ermittlung der Flächen (Flächenintegral) unter der Temperatur-Zeit-Kurve

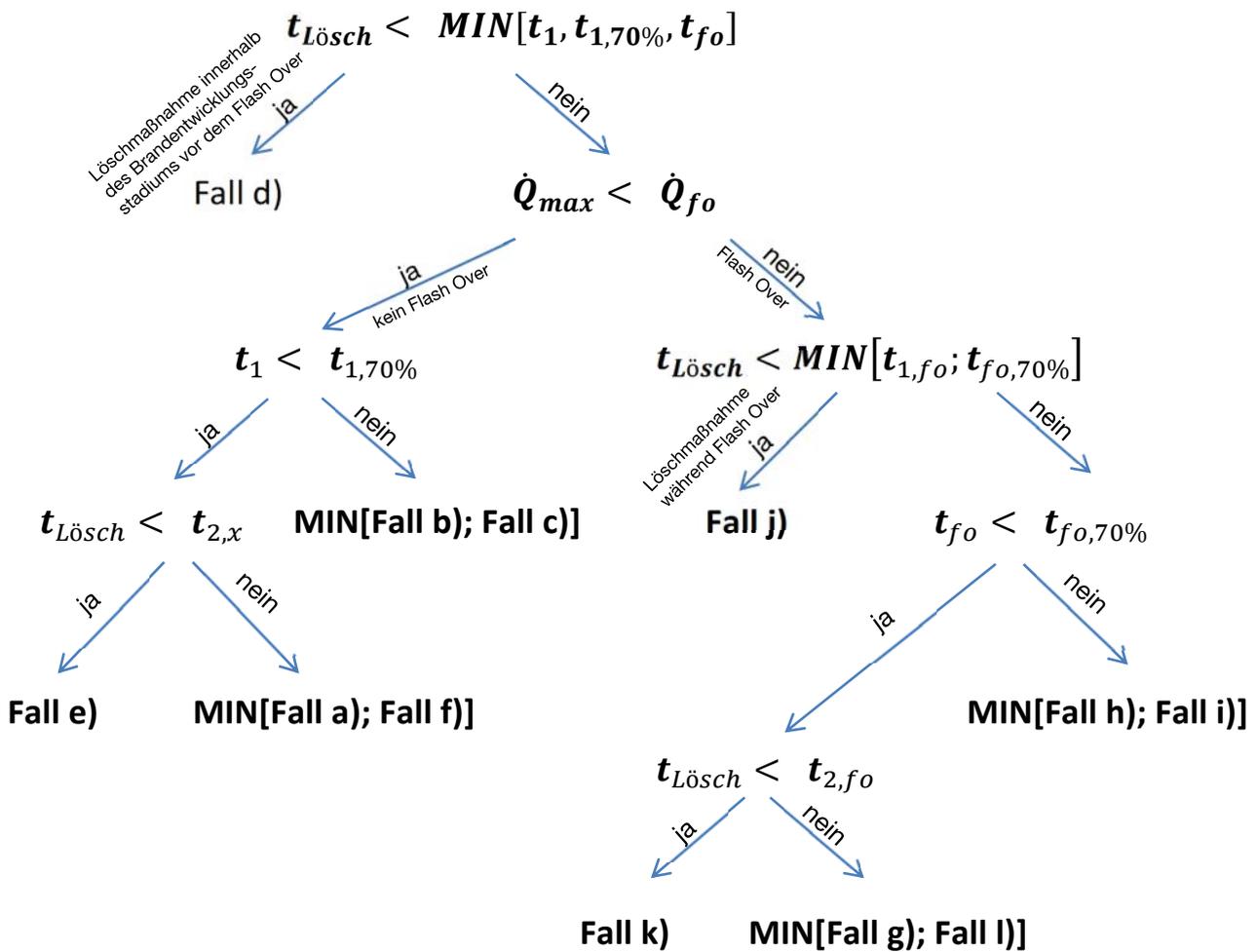
[A2-68]  $A_{T,3} = (\theta_{3,fo} - \theta_{2,fo}) \cdot \frac{2 \cdot (t_{L\ddot{o}s\ddot{c}h} - t_{2,fo}) \cdot \sqrt{\frac{t_{L\ddot{o}s\ddot{c}h} - t_{2,fo}}{t_{3,fo} - t_{2,fo}}}}{3} + \theta_{2,fo} \cdot (t_{L\ddot{o}s\ddot{c}h} - t_{2,fo})$  [K·sec]

A2.m Ereignisbaum zu den Varianten von Brandverläufen

Variante ohne Feuerwehreinsatz



Variante mit Feuerwehreinsatz



## Anhang 3 zu Abschnitt 0 – Verwendete Gleichungen für die Simulationsrechnung

### A3.a Abbildungsverzeichnis zu Anhang 3:

- Abbildung A3-1: *Diagramm Versagenswahrscheinlichkeit für Öffnungsflächenverhältnis  $A_f/2$  und max. berücksichtigtes Brandausmaß Zimmerbrand*
- Abbildung A3-2: *Diagramm Versagenswahrscheinlichkeit für Öffnungsflächenverhältnis  $A_f/2$  und max. berücksichtigtes Brandausmaß ausgedehnter Zimmerbrand*
- Abbildung A3-3: *Diagramm Versagenswahrscheinlichkeit für Öffnungsflächenverhältnis  $A_f/2$  und max. berücksichtigtes Brandausmaß Wohnungsbrand*
- Abbildung A3-4: *Diagramm Versagenswahrscheinlichkeit für Öffnungsflächenverhältnis  $A_f/2$  ohne Löscheinsatz der Feuerwehr*
- Abbildung A3-5: *Diagramm Sensitivitätsanalyse für Öffnungsflächenverhältnis  $A_f/2$*
- 
- Abbildung A3-6: *Diagramm Versagenswahrscheinlichkeit für Öffnungsflächenverhältnis  $A_f/4$  und max. berücksichtigtes Brandausmaß Zimmerbrand*
- Abbildung A3-7: *Diagramm Versagenswahrscheinlichkeit für Öffnungsflächenverhältnis  $A_f/4$  und max. berücksichtigtes Brandausmaß ausgedehnter Zimmerbrand*
- Abbildung A3-8: *Diagramm Versagenswahrscheinlichkeit für Öffnungsflächenverhältnis  $A_f/4$  und max. berücksichtigtes Brandausmaß Wohnungsbrand*
- Abbildung A3-9: *Diagramm Versagenswahrscheinlichkeit für Öffnungsflächenverhältnis  $A_f/4$  ohne Löscheinsatz der Feuerwehr*
- Abbildung A3-10: *Diagramm Sensitivitätsanalyse für Öffnungsflächenverhältnis  $A_f/4$*
- 
- Abbildung A3-11: *Diagramm Versagenswahrscheinlichkeit für Öffnungsflächenverhältnis  $A_f/6$  und max. berücksichtigtes Brandausmaß Zimmerbrand*
- Abbildung A3-12: *Diagramm Versagenswahrscheinlichkeit für Öffnungsflächenverhältnis  $A_f/6$  und max. berücksichtigtes Brandausmaß ausgedehnter Zimmerbrand*
- Abbildung A3-13: *Diagramm Versagenswahrscheinlichkeit für Öffnungsflächenverhältnis  $A_f/6$  und max. berücksichtigtes Brandausmaß Wohnungsbrand*
- Abbildung A3-14: *Diagramm Versagenswahrscheinlichkeit für Öffnungsflächenverhältnis  $A_f/6$  ohne Löscheinsatz der Feuerwehr*
- Abbildung A3-15: *Diagramm Sensitivitätsanalyse für Öffnungsflächenverhältnis  $A_f/6$*
- 
- Abbildung A3-16: *Diagramm Versagenswahrscheinlichkeit für Öffnungsflächenverhältnis  $A_f/8$  und max. berücksichtigtes Brandausmaß Zimmerbrand*
- Abbildung A3-17: *Diagramm Versagenswahrscheinlichkeit für Öffnungsflächenverhältnis  $A_f/8$  und max. berücksichtigtes Brandausmaß ausgedehnter Zimmerbrand*
- Abbildung A3-18: *Diagramm Versagenswahrscheinlichkeit für Öffnungsflächenverhältnis  $A_f/8$  und max. berücksichtigtes Brandausmaß Wohnungsbrand*
- Abbildung A3-19: *Diagramm Versagenswahrscheinlichkeit für Öffnungsflächenverhältnis  $A_f/8$  ohne Löscheinsatz der Feuerwehr*
- Abbildung A3-20: *Diagramm Sensitivitätsanalyse für Öffnungsflächenverhältnis  $A_f/8$*

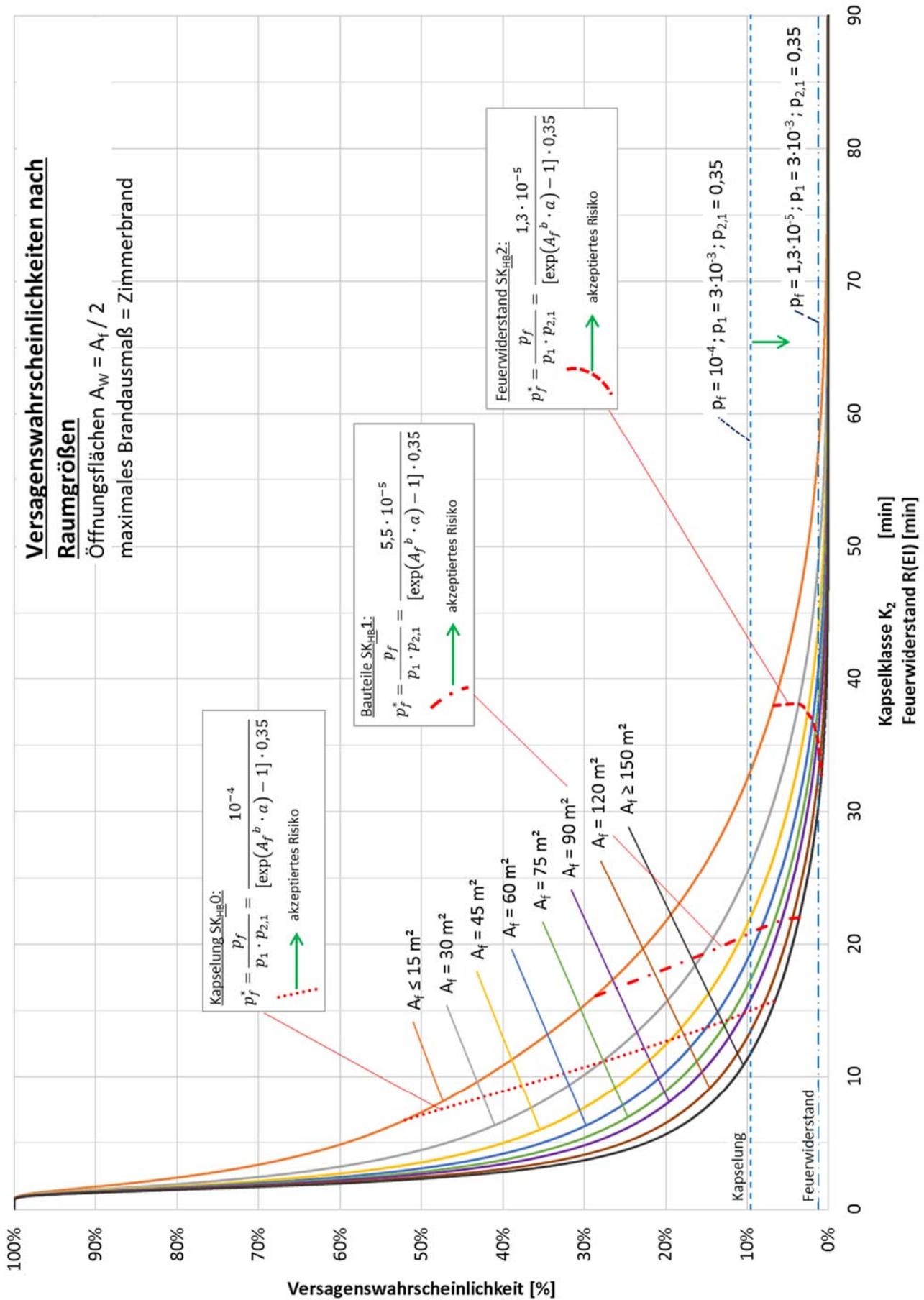


Abbildung A3-1: Diagramm Versagenswahrscheinlichkeit für Öffnungsflächenverhältnis  $A_f/2$  und max. berücksichtigtes Brandausmaß Zimmerbrand

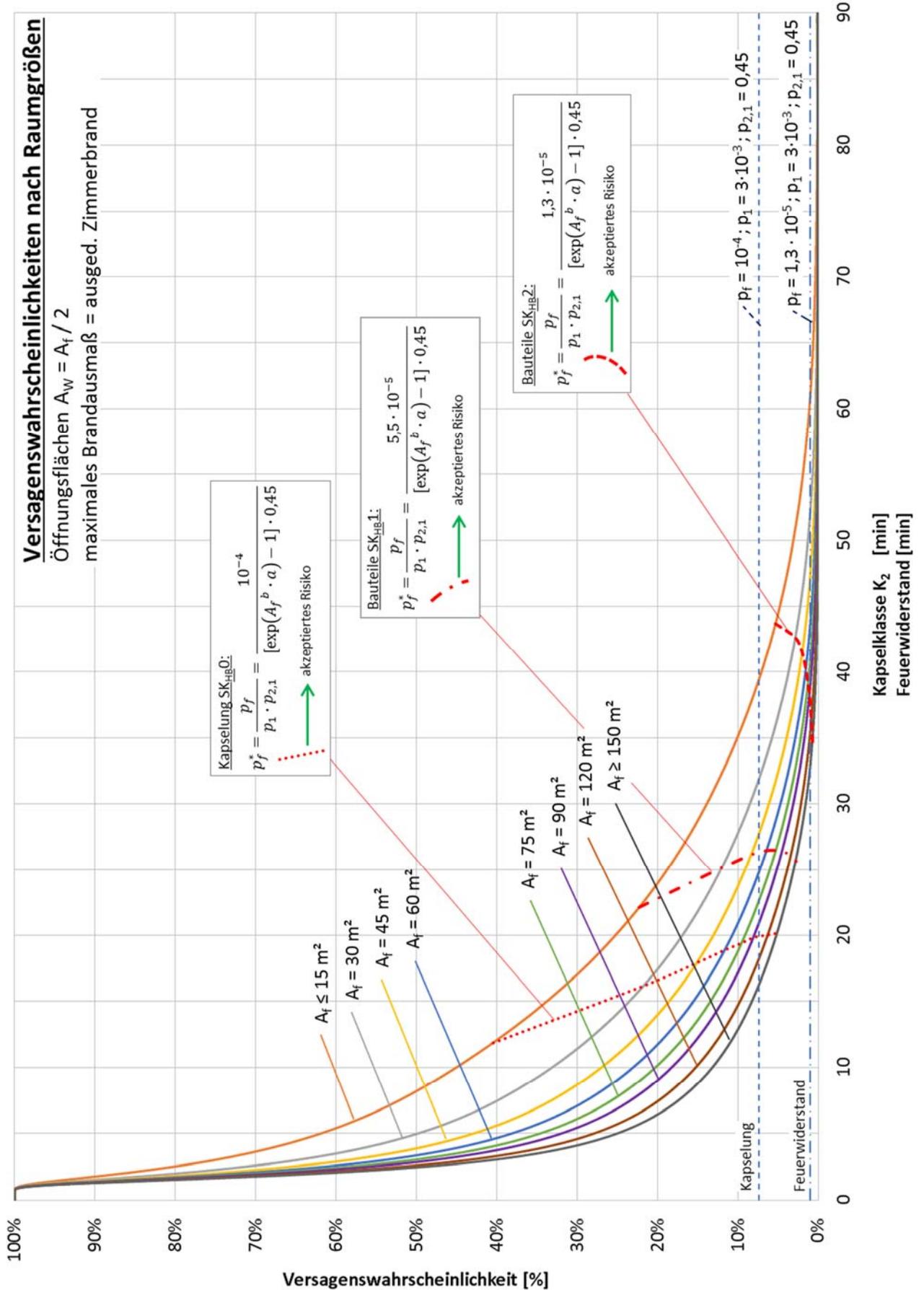


Abbildung A3-2: Diagramm Versagenswahrscheinlichkeit für Öffnungsflächenverhältnis  $A_f / 2$  und max. berücksichtigtes Brandausmaß ausgedehnter Zimmerbrand

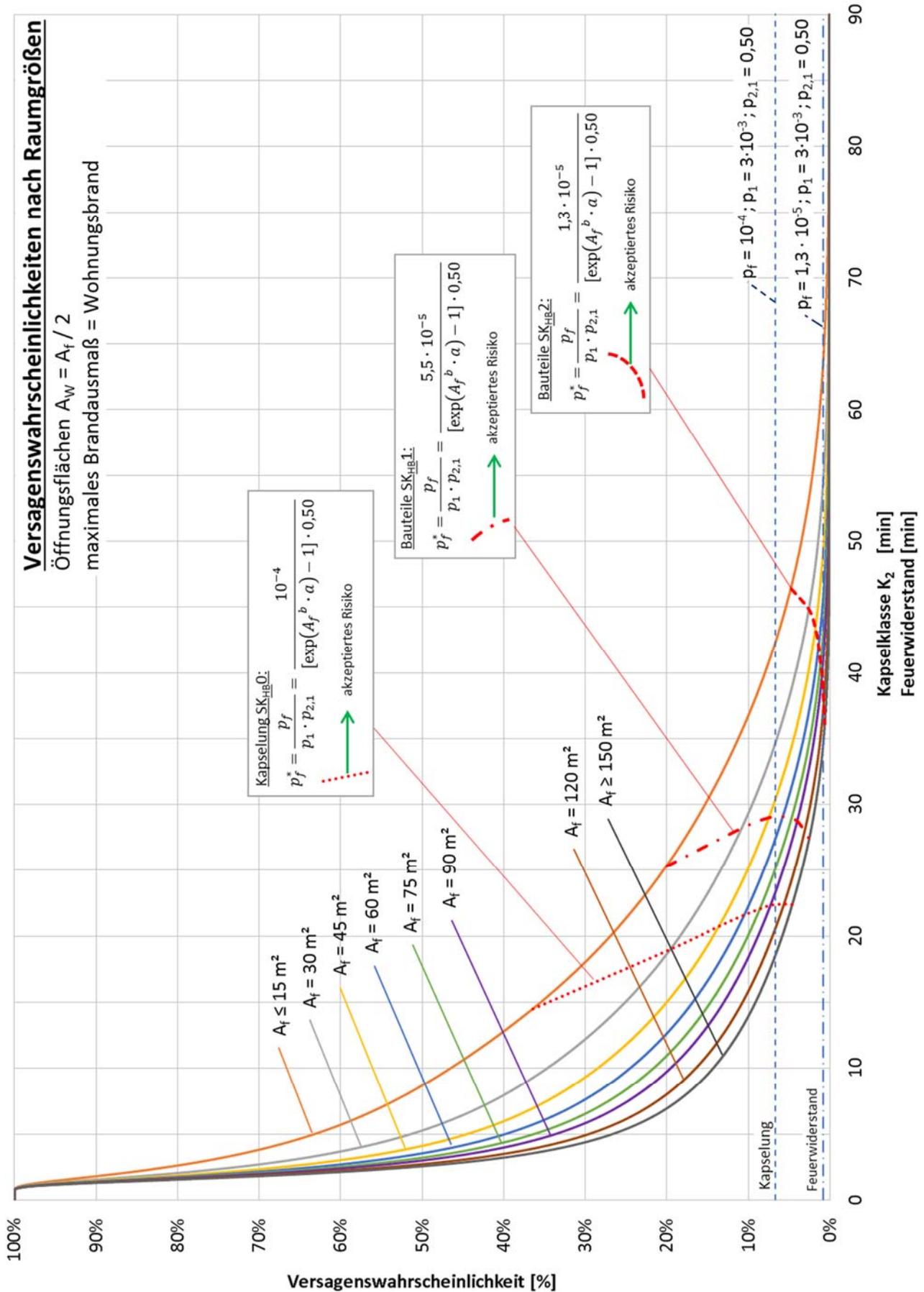


Abbildung A3-3: Diagramm Versagenswahrscheinlichkeit für Öffnungsflächenverhältnis  $A_f/2$  und max. berücksichtigtes Brandausmaß Wohnungsbrand

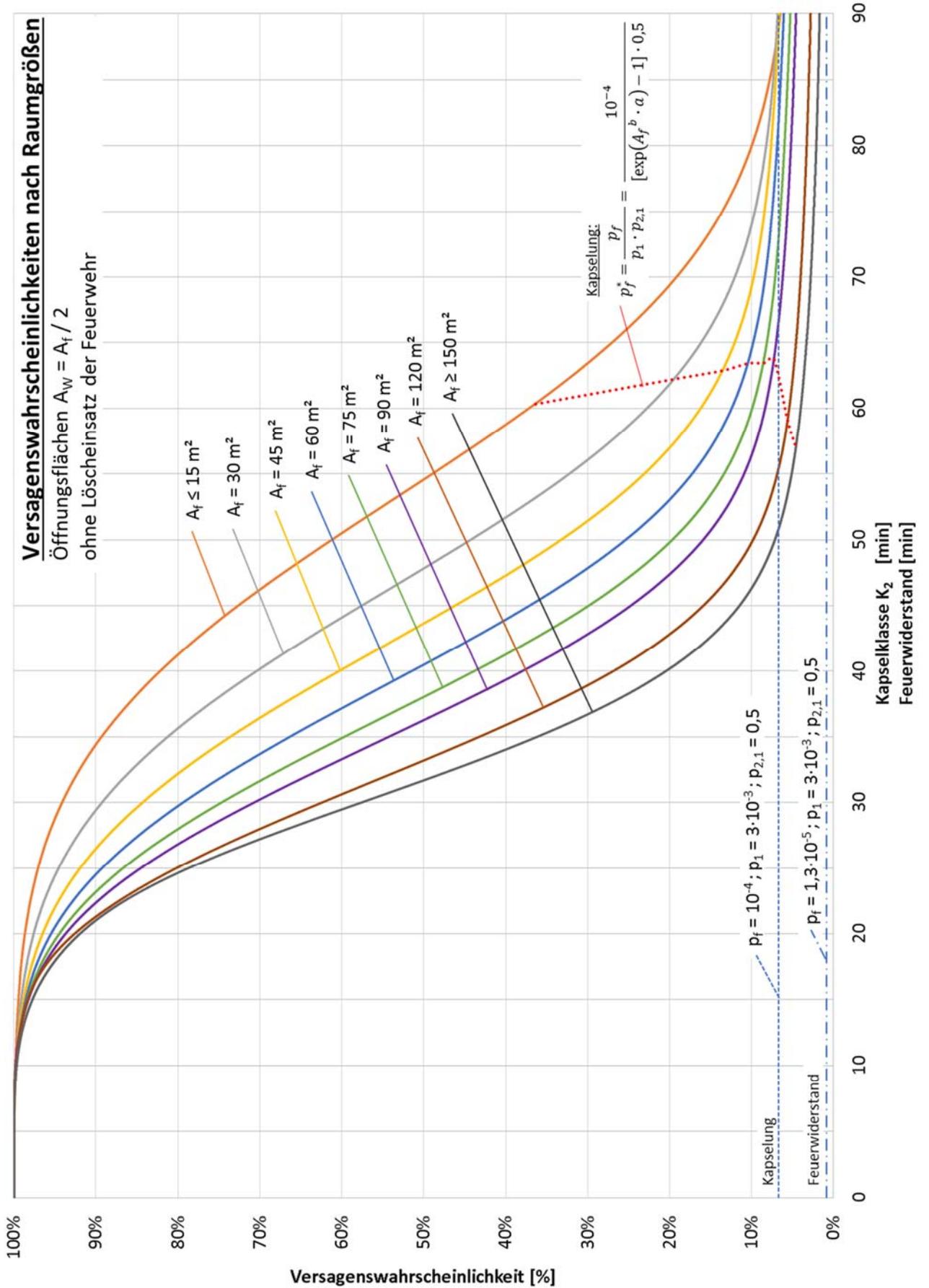


Abbildung A3-4: Diagramm Versagenswahrscheinlichkeit für Öffnungsflächenverhältnis  $A_f/2$  ohne Löscheinsatz der Feuerwehr

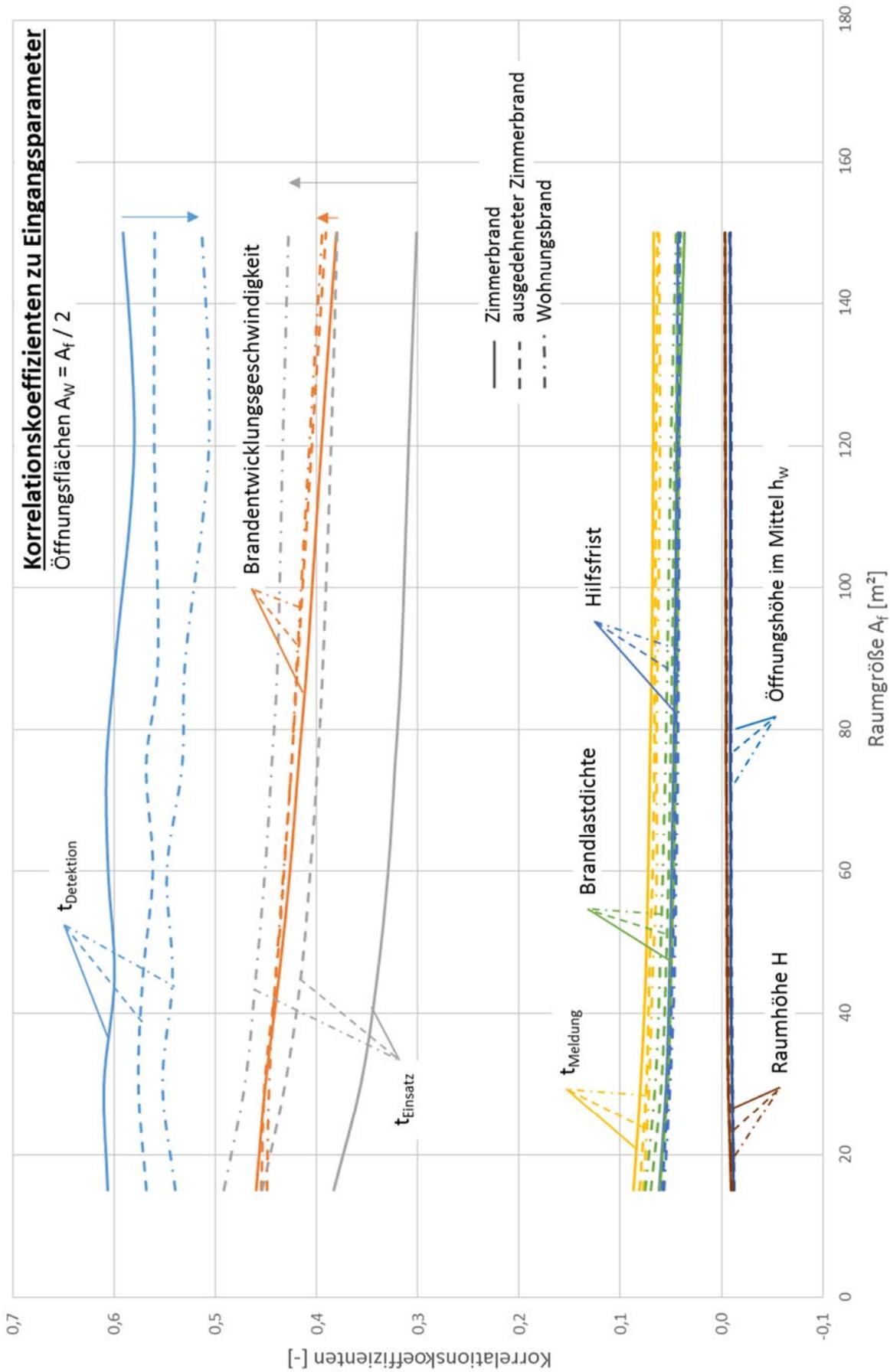


Abbildung A3-5: Diagramm Sensitivitätsanalyse für Öffnungsflächenverhältnis  $A_f/2$

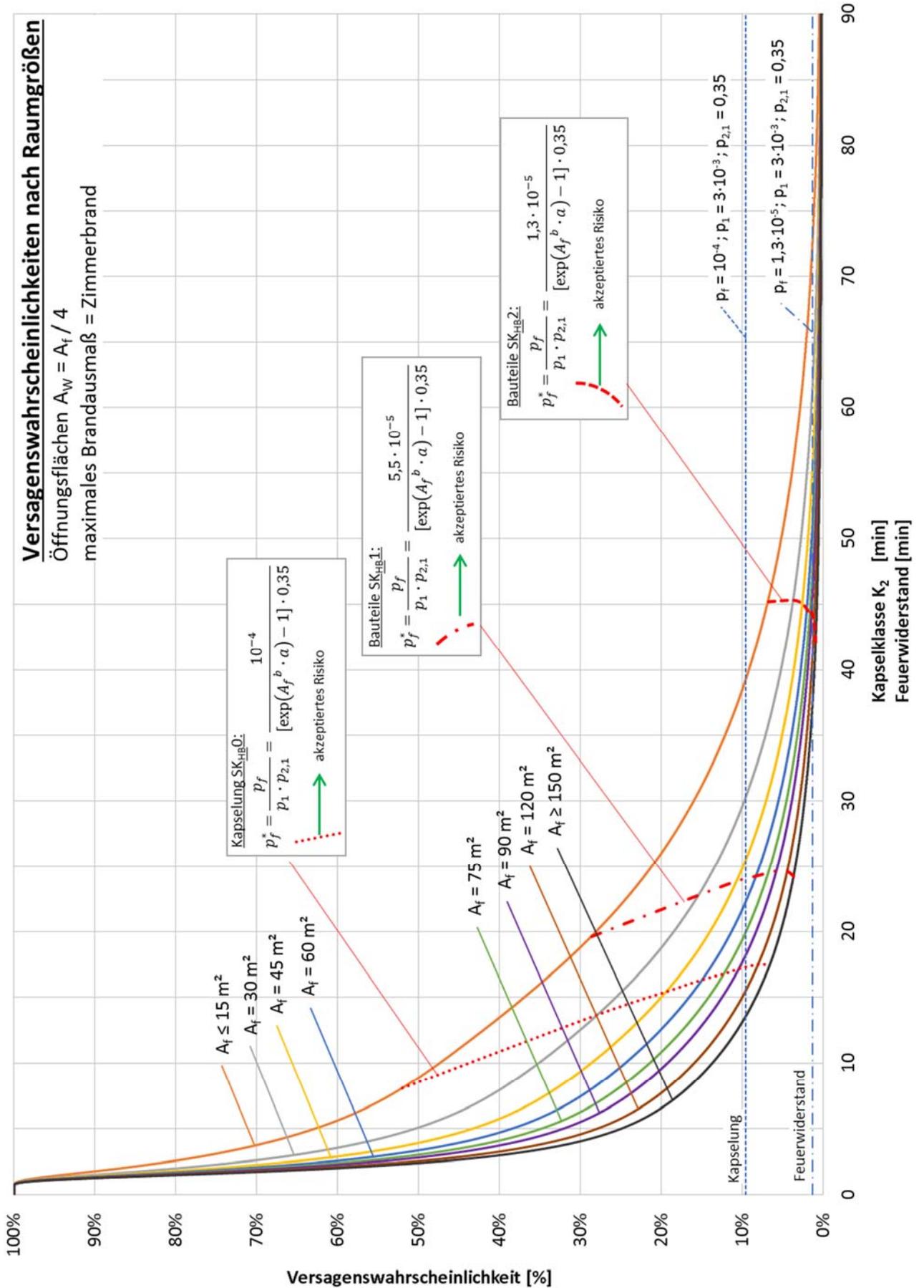


Abbildung A3-6: Diagramm Versagenswahrscheinlichkeit für Öffnungsflächenverhältnis  $A_f/4$  und max. berücksichtigtes Brandausmaß Zimmerbrand

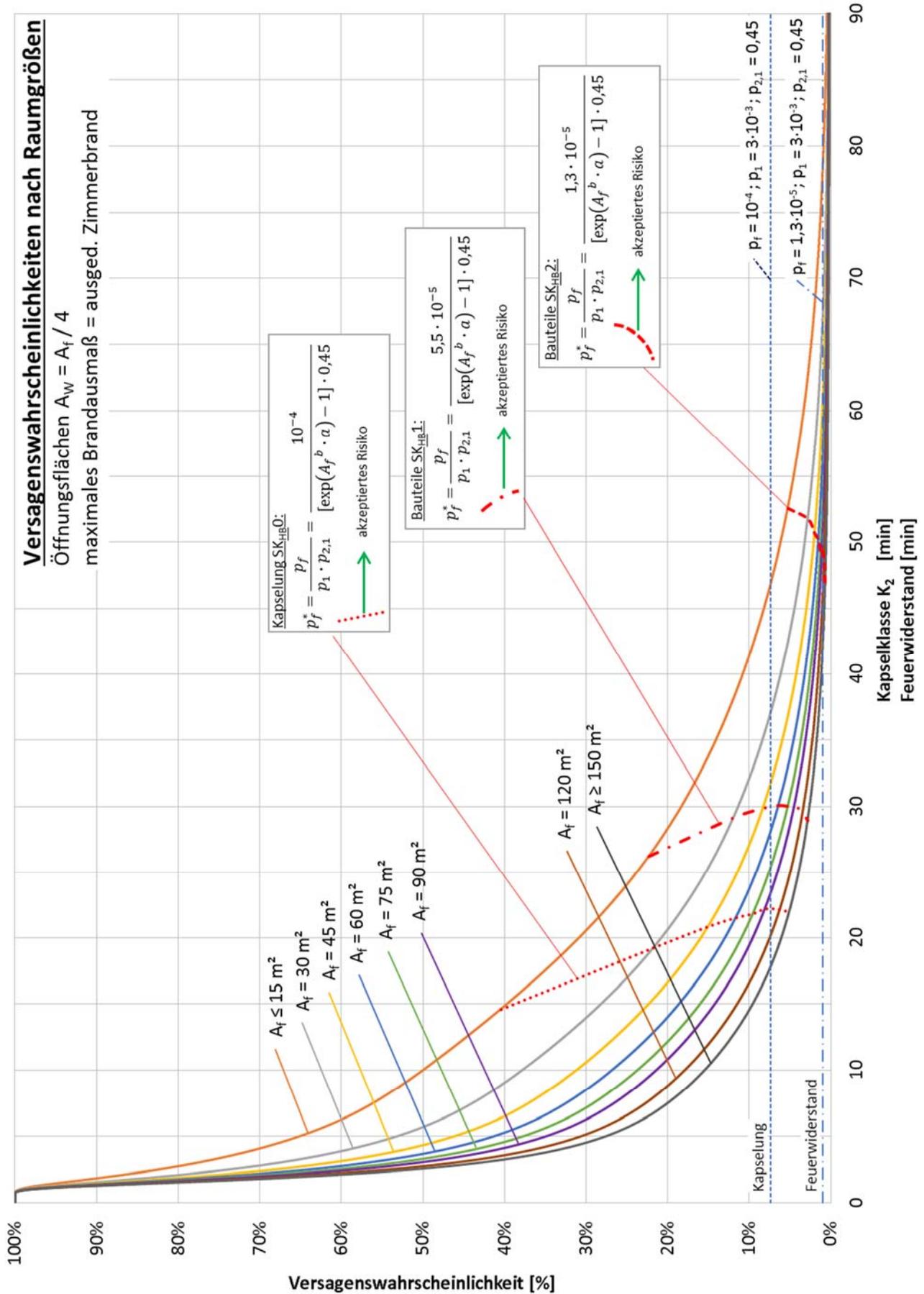


Abbildung A3-7: Diagramm Versagenswahrscheinlichkeit für Öffnungsflächenverhältnis  $A_f/4$  und max. berücksichtigtes Brandausmaß ausgedehnter Zimmerbrand

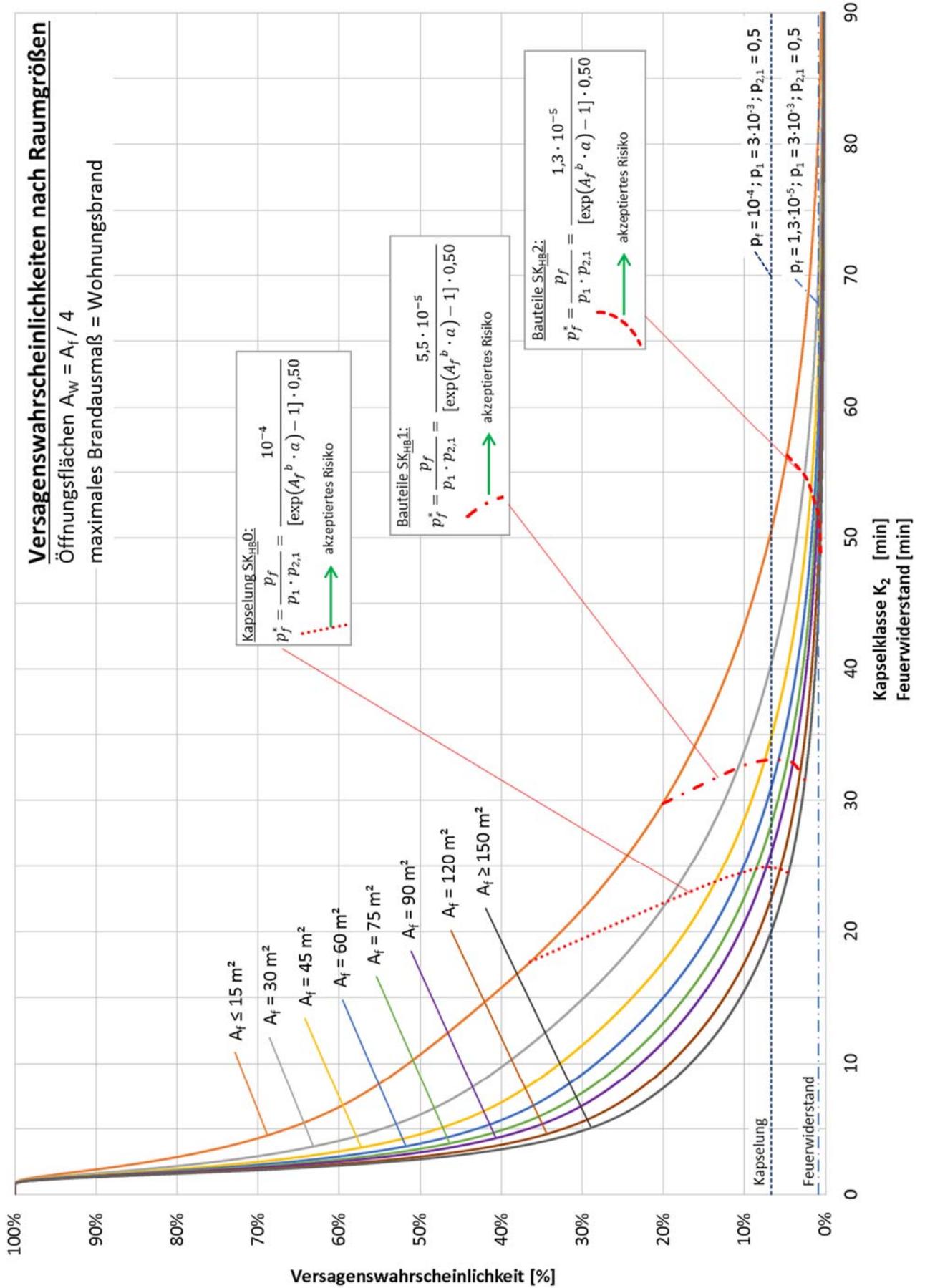


Abbildung A3-8: Diagramm Versagenswahrscheinlichkeit für Öffnungsflächenverhältnis  $A_f / 4$  und max. berücksichtigtes Brandausmaß Wohnungsbrand

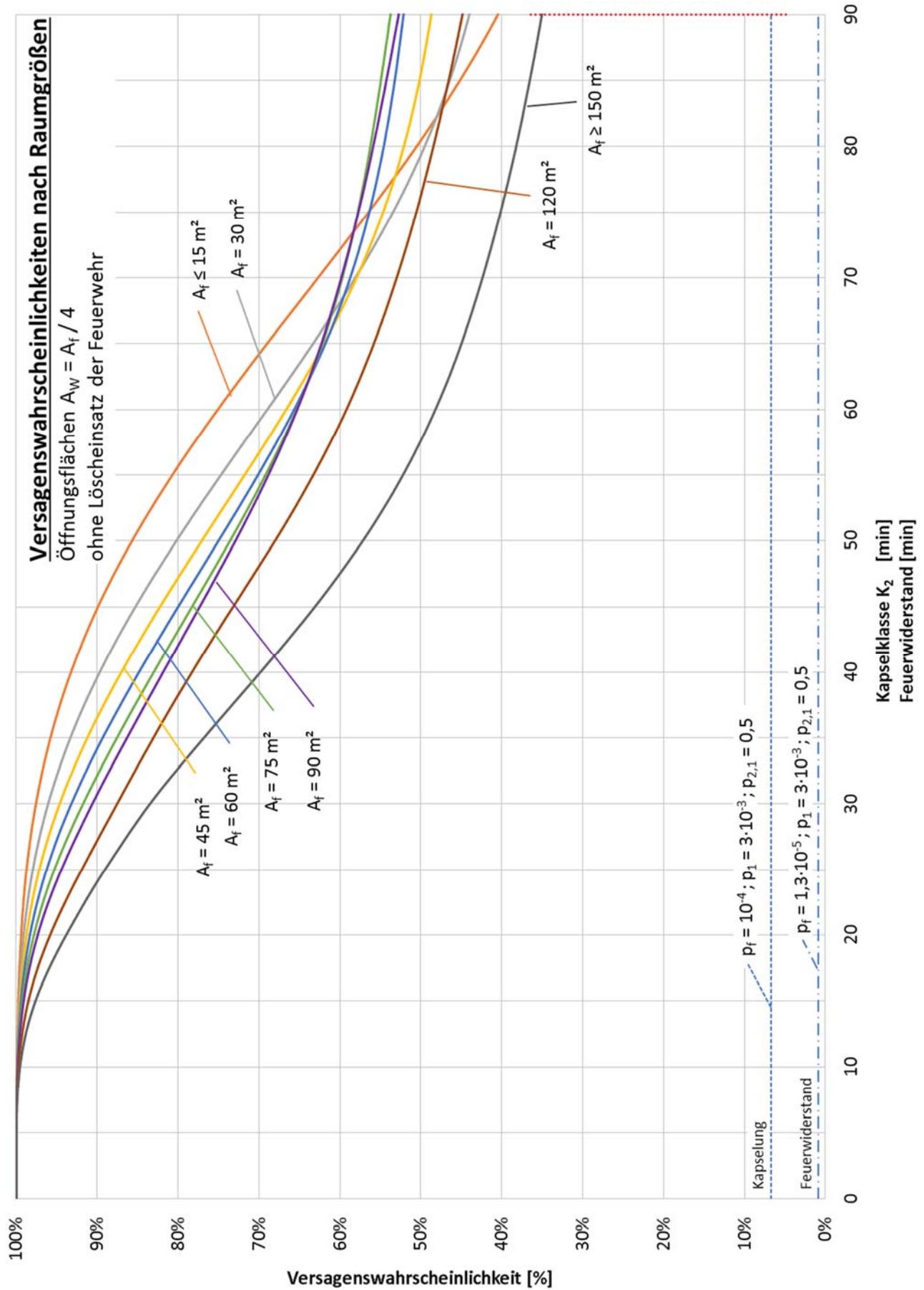


Abbildung A3-9: Diagramm Versagenswahrscheinlichkeit für Öffnungsflächenverhältnis  $A_f/4$  ohne Löscheinsatz der Feuerwehr

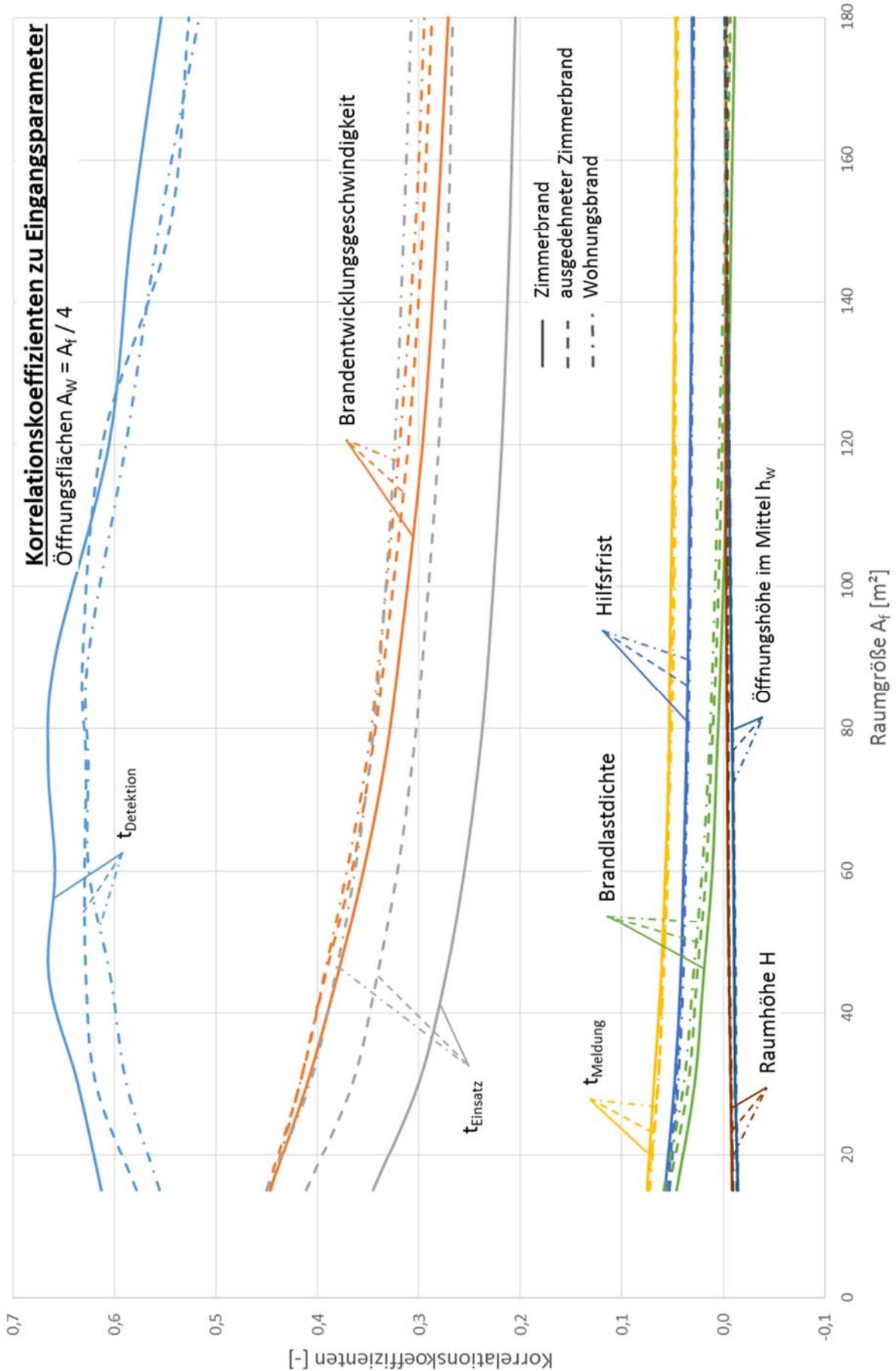


Abbildung A3-10: Diagramm Sensitivitätsanalyse für Öffnungsflächenverhältnis  $A_f/4$

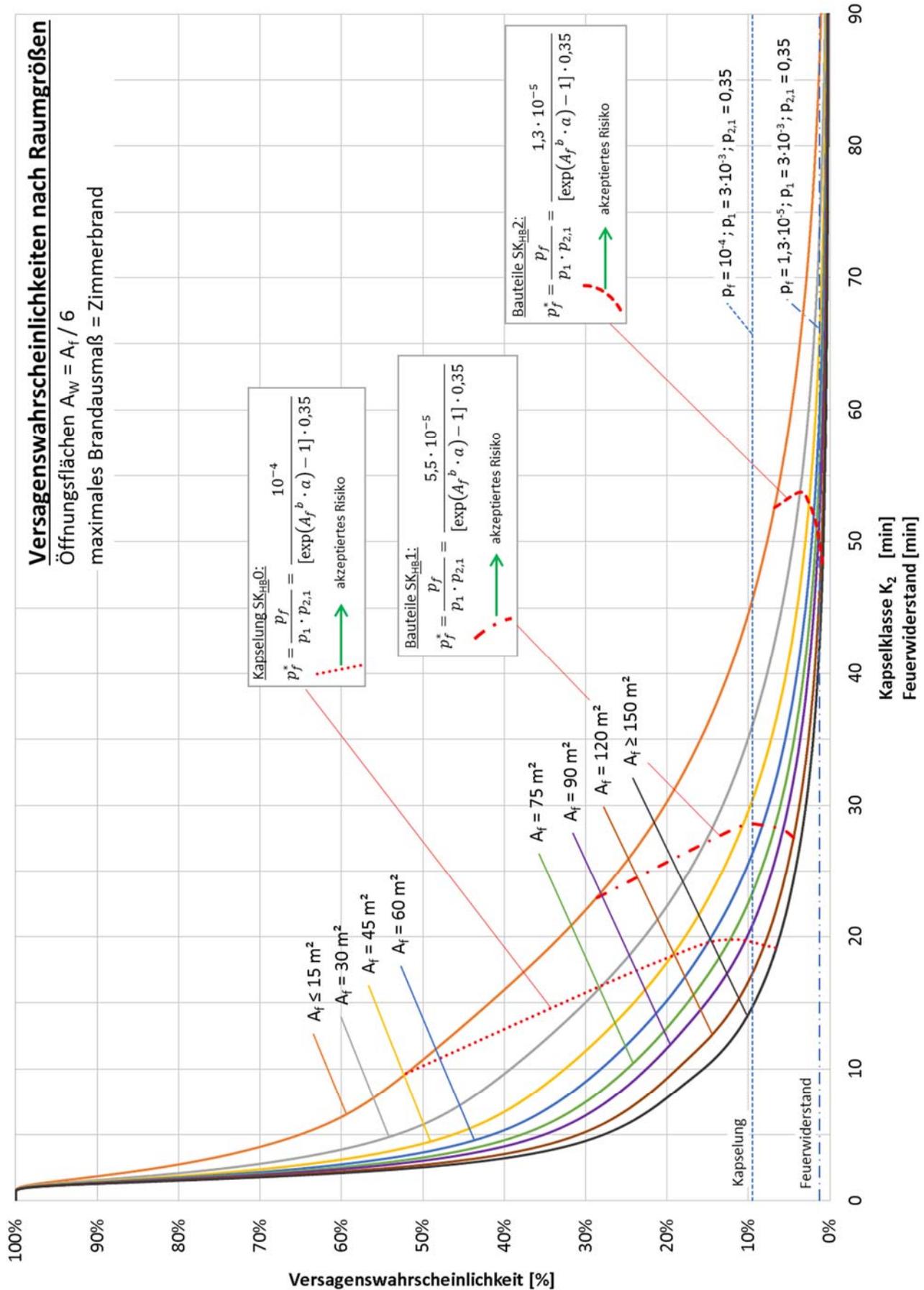


Abbildung A3-11: Diagramm Versagenswahrscheinlichkeit für Öffnungsflächenverhältnis  $A_f/6$  und max. berücksichtigtes Brandausmaß Zimmerbrand

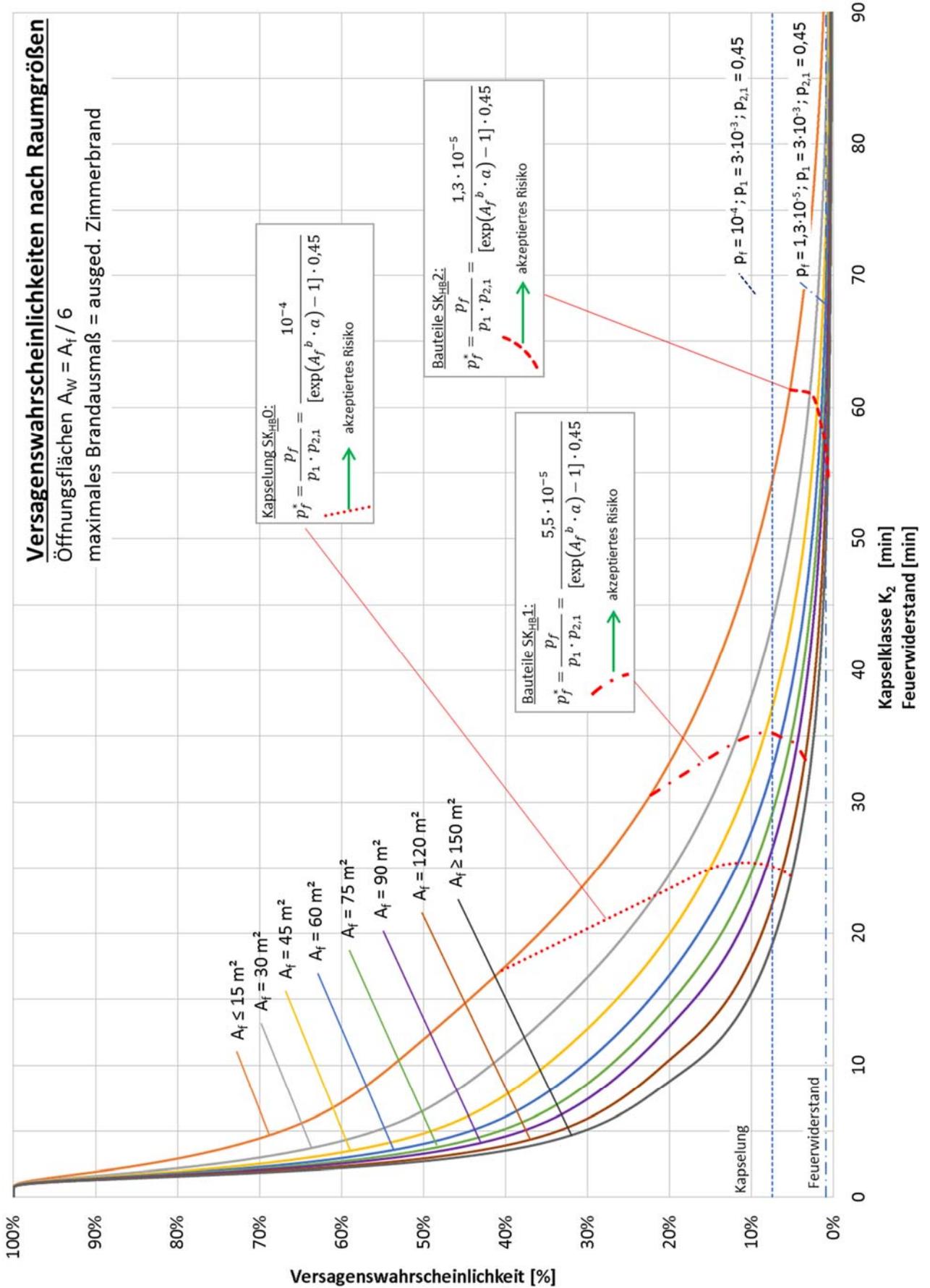


Abbildung A3-12: Diagramm Versagenswahrscheinlichkeit für Öffnungsflächenverhältnis  $A_f/6$  und max. berücksichtigtes Brandausmaß ausgedehnter Zimmerbrand

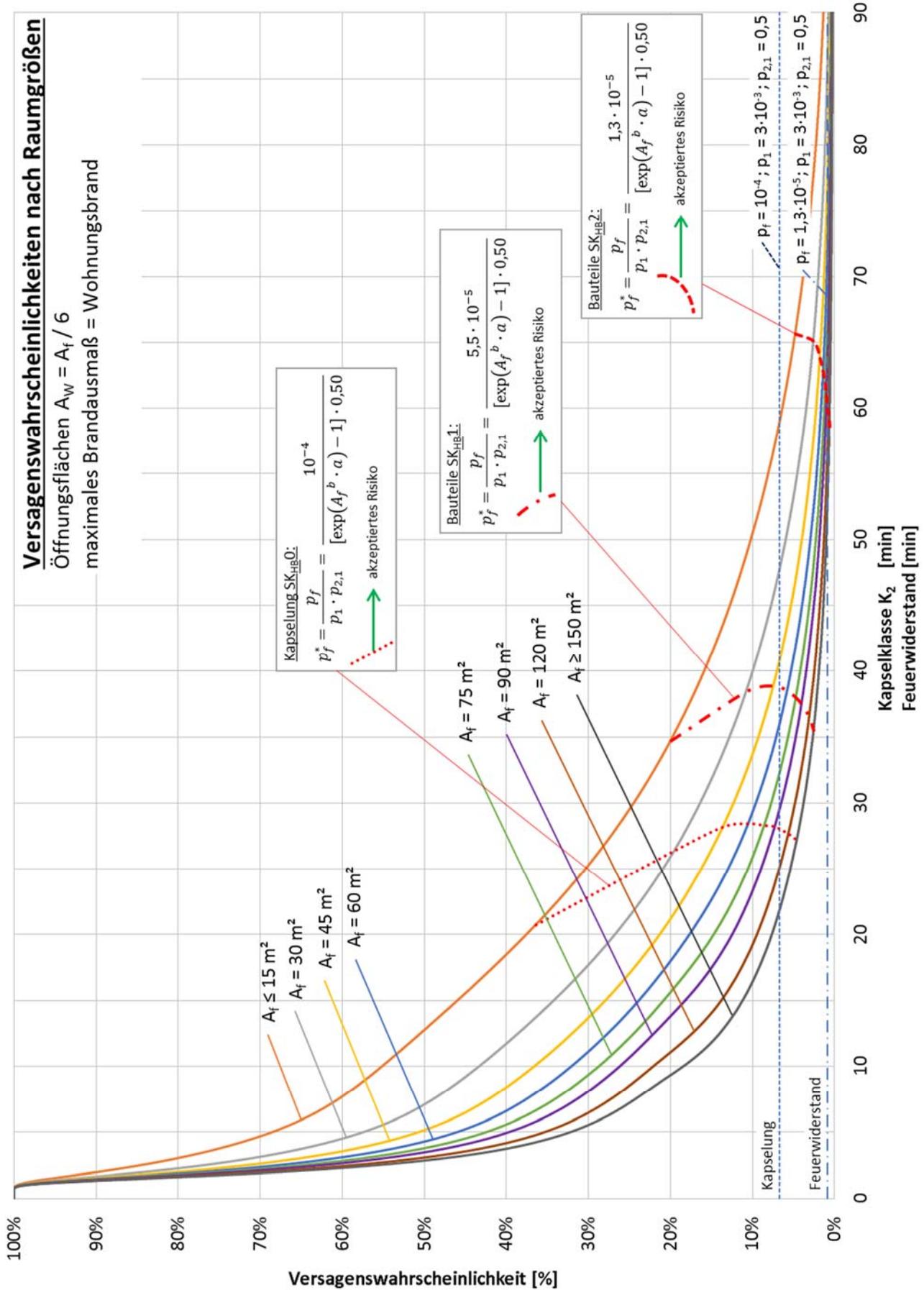


Abbildung A3-13: Diagramm Versagenswahrscheinlichkeit für Öffnungsflächenverhältnis  $A_f/6$  und max. berücksichtigtes Brandausmaß Wohnungsbrand

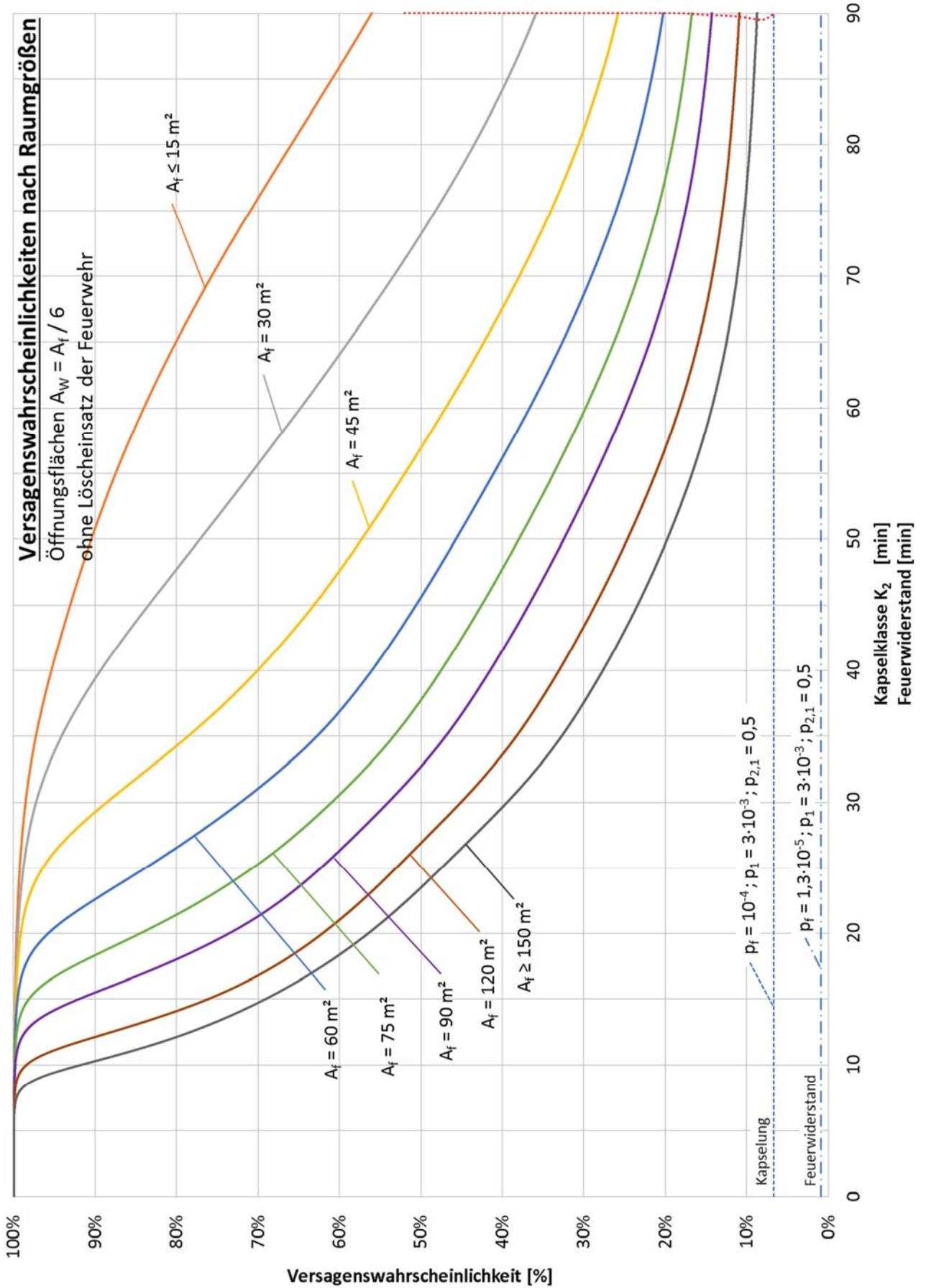


Abbildung A3-14: Diagramm Versagenswahrscheinlichkeit für Öffnungsflächenverhältnis  $A_f/6$  ohne Löscheinsatz der Feuerwehr

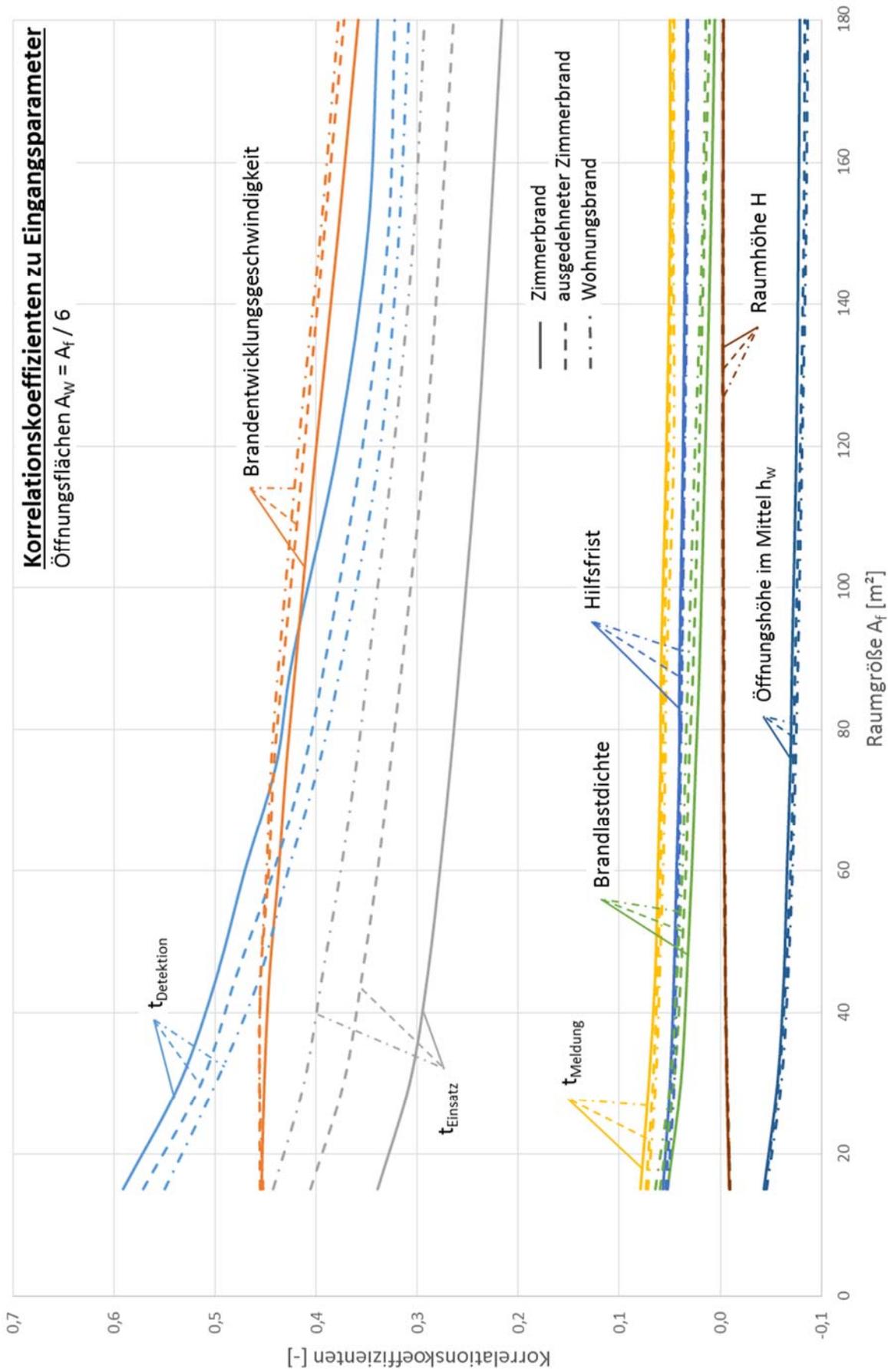


Abbildung A3-15: Diagramm Sensitivitätsanalyse für Öffnungsflächenverhältnis  $A_f/6$

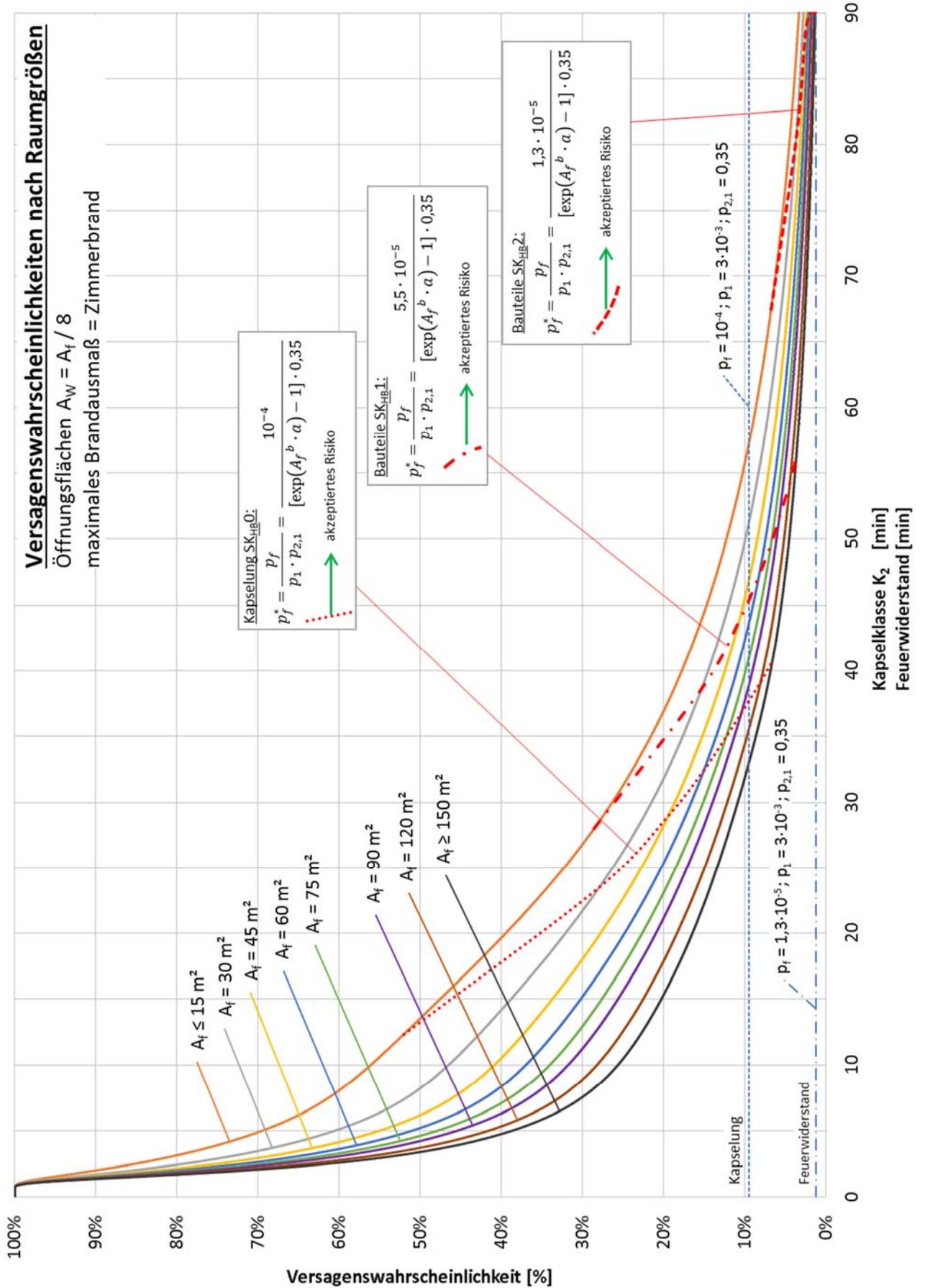


Abbildung A3-16: Diagramm Versagenswahrscheinlichkeit für Öffnungsflächenverhältnis  $A_f/8$  und max. berücksichtigtes Brandausmaß Zimmerbrand

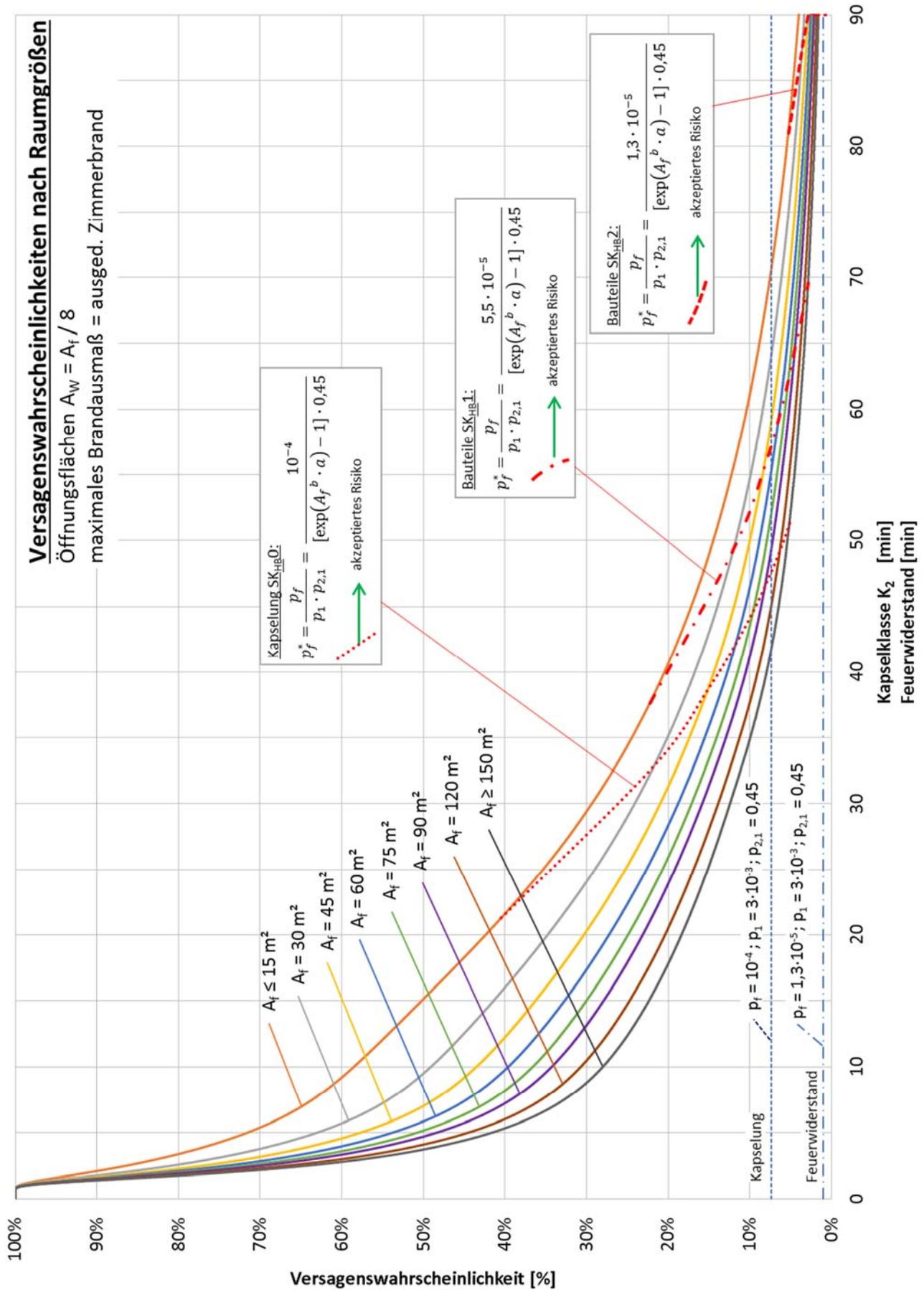


Abbildung A3-17: Diagramm Versagenswahrscheinlichkeit für Öffnungsflächenverhältnis  $A_f/8$  und max. berücksichtigtes Brandausmaß ausgedehnter Zimmerbrand

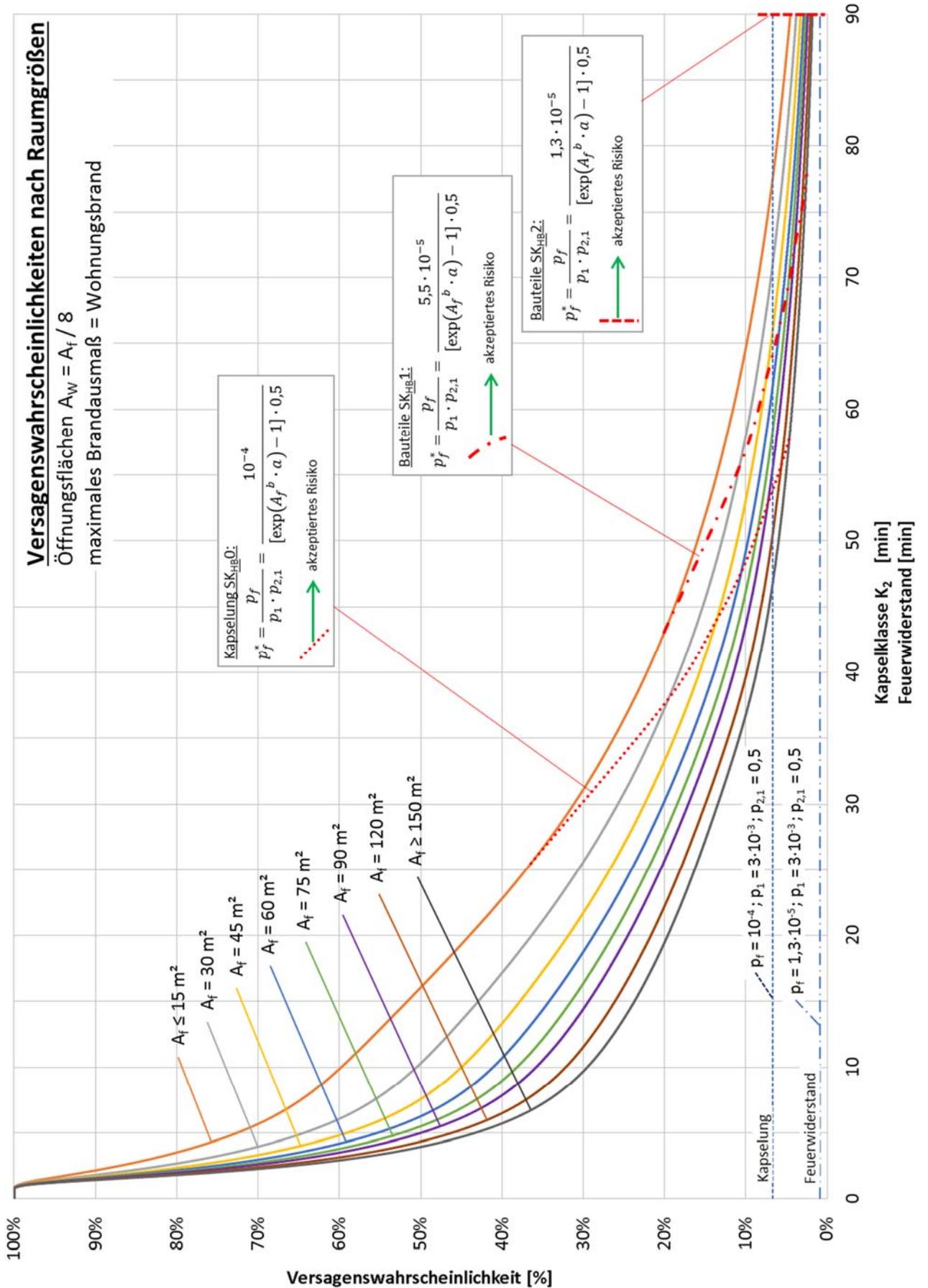


Abbildung A3-18: Diagramm Versagenswahrscheinlichkeit für Öffnungsflächenverhältnis  $A_f/8$  und max. berücksichtigtes Brandausmaß Wohnungsbrand

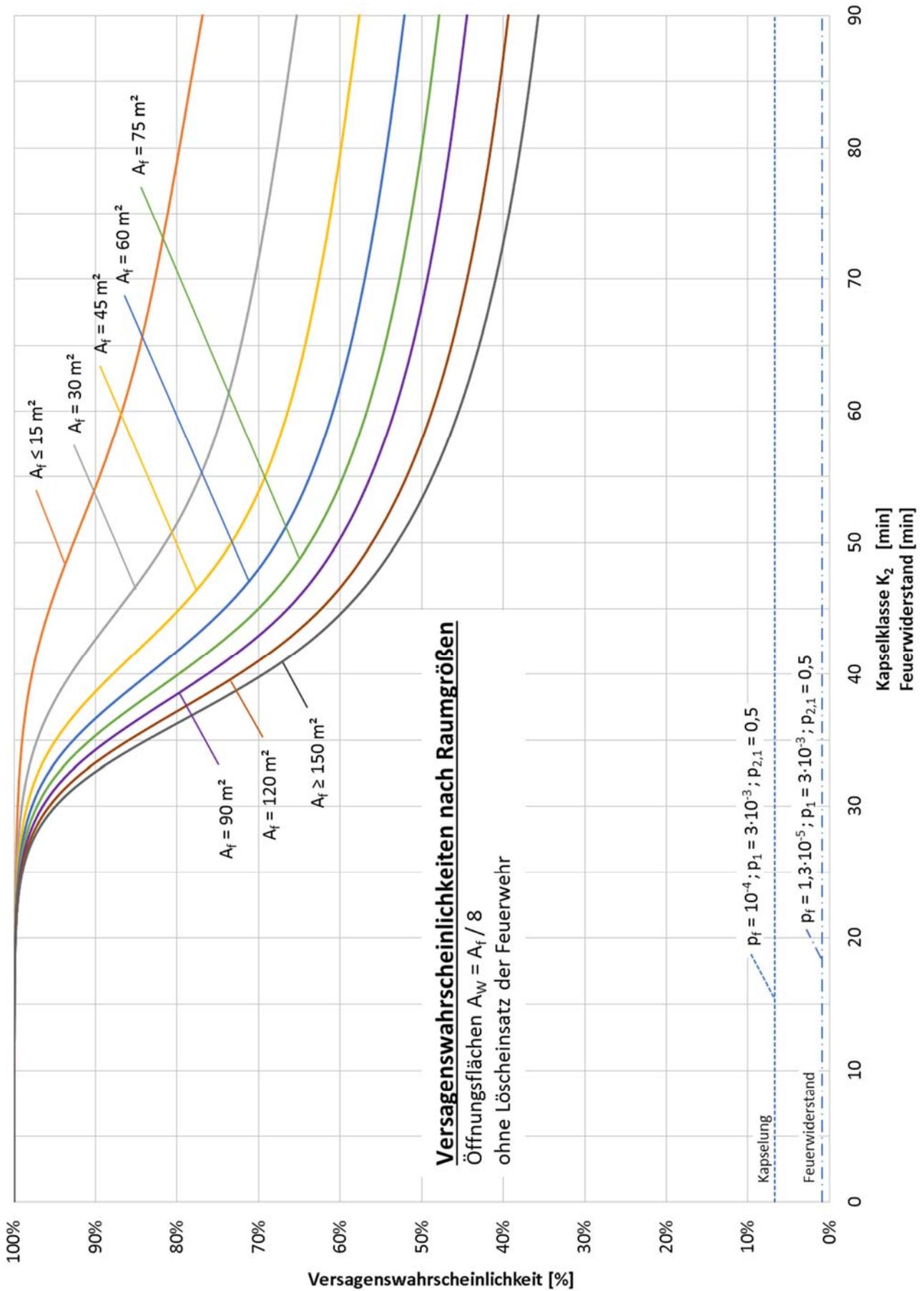


Abbildung A3-19: Diagramm Versagenswahrscheinlichkeit für Öffnungsflächenverhältnis  $A_f/8$  ohne Löscheinsatz der Feuerwehr

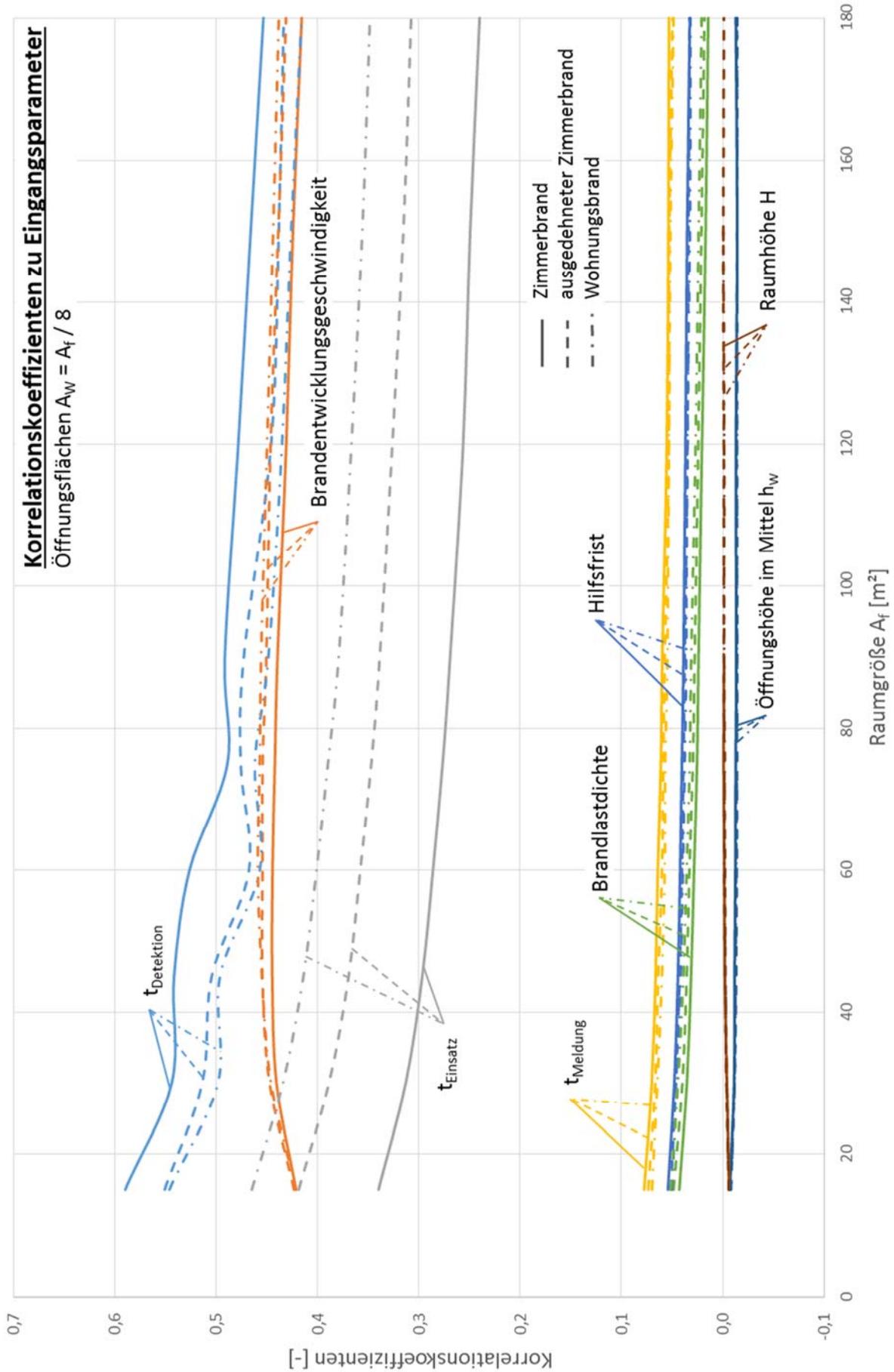


Abbildung A3-20: Diagramm Sensitivitätsanalyse für Öffnungsflächenverhältnis  $A_f/8$