Brandschutzplanung mit ingenieurwissenschaftlichen Methoden
Paul Frey

Paul Frey

Brandschutzplanung mit ingenieurwissenschaftlichen Methoden

2., leicht überarbeitete Auflage

Basellandschaftliche GebäudeVersicherung

Paul Frey

Brandschutzplanung mit ingenieurwissenschaftlichen Methoden

Paul Frey

Brandschutzplanung mit ingenieurwissenschaftlichen Methoden

2., leicht überarbeitete Auflage

Basellandschaftliche GebäudeVersicherung

Autor

Dipl. Ing. FH Paul Frey
Master of Engineering (vorbeugender Brandschutz)
Stv. Leiter Brandschutz-Inspektorat
Basellandschaftliche Gebäudeversicherung
paul.frey@bgv.ch

Herausgeberin

Basellandschaftliche Gebäudeversicherung
Gräubernstrasse 18, CH-4410 Liestal
Tel +41 (0)61 927 11 11, Fax +41 (0)61 927 12 12
bgv@bgv.ch
www.bgv.ch

In Kommission bei

Schwabe AG, Basel
www.schwabe.ch

Blätterkatalog

www.bgv.ch/ingenieurmethoden

Grafik und Fotografie

Dundjerski, Verkauf & Design
Schanzstrasse 6, CH-8196 Wil

Herstellung

Schwabe AG, Basel/Muttenz

Bindearbeiten

Grollimund AG
Industriestrasse 4, CH-4153 Reinach

ISBN 978-3-906819-00-6

© Basellandschaftliche Gebäudeversicherung, Liestal
1. Auflage 2014
2., leicht überarbeitete Auflage 2015

Alle Rechte, auch die des Nachdrucks von Auszügen, vorbehalten. Jede Verwertung ist ohne schriftliche Zustimmung der Basellandschaftlichen Gebäudeversicherung unzulässig. Dies gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronische Systeme.

Haftungsausschluss

Der Umgang mit dem dargebotenen Inhalt dieses Handbuches, der mit grosser Sorgfalt und nach bestem Wissen zusammengestellt wurde, erfolgt in eigener Kompetenz und Verantwortung. Autor und Herausgeberin können deshalb für mögliche Schäden, die durch die Benutzung und Anwendung des vorliegenden Handbuches entstehen, nicht haftbar gemacht werden.

Vorwort

Der Brandschutzplanung stehen heute ingenieurwissenschaftliche Methoden zur Verfügung, die auf algebraischen und numerischen Modellen beruhen. Aufgrund ihrer Komplexität sind in Gebäuden stattfindende Brandereignisse nicht oder nur partikulär analytisch fassbar, sodass die mathematischen Modelle stets empirische Komponenten aufweisen. Weil aussagekräftige, belastbare statistische Daten von Gebäudebränden derzeit nicht abrufbar sind, werden im Brandschutzentwurf probabilistische Modelle kaum verwendet.

Dieses Handbuch ist aus dem Studium einer umfangreichen Sammlung von Publikationen, die vornehmlich ausländische Normen, Richtlinien, Forschungsarbeiten, Fachbücher und Fachzeitschriften umfasst, hervorgegangen. Es soll die Verständigung unter den sich mit ingenieurwissenschaftlichen Methoden befassenden Brandschutzfachleuten erleichtern und einen Beitrag an die Sicherstellung oder gar Verbesserung der Belastbarkeit und Akzeptanz von mit solchen Methoden produzierten Ergebnissen leisten.

Im Brandschutzwesen gewinnen mit den Bauproduktelassen des Bundes, welche die Bauproduktrichtlinie der Europäischen Union (EU) umsetzen, und mit den Anfang 2005 in Kraft gesetzten Brandschutzvorschriften der Vereinigung Kantonaler Feuerversicherungen (VKF) die ingenieurwissenschaftlichen Methoden an Bedeutung. Derzeit werden bei nach schweizerischem Brandschutzrecht entworfenen Gebäuden die ingenieurwissenschaftlichen Methoden hauptsächlich zur objektspezifischen Bemessung der Entrauchung angewendet. Deshalb bildet das vorliegende Handbuch nicht nur den momentanen Stand des internationalen Wissens betreffend die im Brandschutzwesen angewandten ingenieurwissenschaftlichen Methoden ab, sondern thematisiert auch wesentliche Aspekte der Rauch- und Wärmeabzugsanlagen (RWA).

Dieses Handbuch beschreibt die in der leistungsorientierten Brandschutzplanung anfallenden Arbeitsschritte und liefert eine Anleitung, wie sich die allgemeinen Schutzziele der schweizerischen Brandschutzvorschriften mithilfe von funktionalen Schutzzielen und von Planungszielen konkretisieren lassen. Im Weiteren wird dargelegt, wie sich Brand- und Personensicherheitsberechnungen durchführen lassen, wobei der Entwicklung von Szenarien, der Feststellung von Leistungskriterien und den diesbezüglich relevanten Zeiträumen sowie der Darstellung von Kenngrössen und Bestimmungsgleichungen besondere Beachtung geschenkt wird. Ein Überblick über die verfügbaren Brand- und Evakuierungsmodelle sowie Kriterienkataloge zur Qualitätssicherung und zur Dokumentation runden das Handbuch ab.

Den folgenden Firmen und Institutionen, die mit ihren Kommentaren und Verbesserungsvorschlägen zum Inhalt dieses Handbuches wertvolle Beiträge leisteten, sei für ihr Engagement gedankt:

AFC Air Flow Consulting AG in Zürich

Amstein + Walthert AG in Zürich

BDS Security Design AG in Bern

Brandschutzconsult GmbH & Co. KG in Ettenheim (Deutschland)

Braun Brandsicherheit AG in Winterthur

ECA Etablissement d'assurance contre l'incendie et les éléments naturels du canton de Vaud in Pully

Eidgenössische Technische Hochschule, Institut für Baustatik und Konstruktion in Zürich

Ernst Basler + Partner AG in Zollikon

Gruner AG in Basel

Hautle Anderegg + Partner AG in Bern

Zugunsten der besseren Lesbarkeit wird in dieser Dokumentation für alle Personen nur die männliche Form verwendet. Selbstverständlich beziehen sich alle Personenbezeichnungen immer auf die weibliche und männliche Form.

Für Anregungen und Wünsche betreffend Weiterentwicklung des Handbuches, aber auch für Kritik, ist der Autor stets dankbar.

Basellandschaftliche Gebäudeversicherung

Brandschutz-Inspektorat

Paul Frey

Liestal, im Februar 2014

Vorwort zur 2., leicht überarbeiteten Auflage

Ein Jahr nach Erscheinen der 1. Auflage des Handbuches „Brandschutzplanung mit ingenieurwissenschaftlichen Methoden“ wurde ein Nachdruck erforderlich.

In der vorliegenden 2., leicht überarbeiteten Auflage wurden geringfügige sprachliche Anpassungen vorgenommen, Begriffe und Symbole vereinheitlicht und bei den zahlreichen Diagrammen von Tabelle 23 Beschriftungen korrigiert.

Basellandschaftliche Gebäudeversicherung

Brandschutz-Inspektorat

Paul Frey

Liestal, im Juni 2015

Inhaltsverzeichnis

TEIL I Brandschutzingenieurmethoden

1	**Grundlagen**	**11**
1.1	Geltungsbereich	11
1.2	Zielsetzung und Zweck	11
1.3	Zielgruppen	11
1.4	Inhalt und Abgrenzung	11
1.5	Literatur	11
1.6	Voraussetzungen	12
1.7	Abweichungen	12
1.8	Gesetzliche Grundlagen	12
1.9	Brandschutzkonzepte	13
1.10	Prozesskette der leistungsorientierten Brandschutzplanung	13
1.11	Berechnungskonzept-Stufen	18
1.12	Bemessungs-/Nachweisstrategie	18
2	**Allgemeine und funktionale Schutzziele, Planungsziele, Leistungskriterien**	**20**
2.1	Allgemeine Schutzziele	20
2.2	Funktionale Schutzziele, Planungsziele	20
2.3	Leistungskriterien	22
2.3.1	Allgemeines	22
2.3.2	Leistungskriterien zur Beurteilung der Personensicherheit	22
2.3.3	Leistungskriterien zur Beurteilung der Einsatzbedingungen für die Interventionskräfte	22
2.3.4	Leistungskriterien zur Beurteilung des Sachwertschutzes	22
2.3.5	Leistungskriterien der VKF-Brandschutzvorschriften	23
2.3.6	Gewährleistungsdauer der Leistungskriterien zur Beurteilung der Sicherheit von Personen	23
2.3.7	Erfüllungsgrad der Leistungskriterien	24
3	**Verfahren zur Risikobeurteilung**	**24**
3.1	Grundlagen	24
3.1.1	Risikoorientierte Brandschutzplanung	24
3.1.2	Begriffe	24
3.1.3	Risikobeurteilung	26
3.1.4	Risikoermittlung	26
3.1.5	Risikoanalyse	26
3.1.6	Risikobewertung	27
3.2	Verfahren zur Risikobeurteilung	27
3.3	Auswahl und Vergleich der Verfahren zur Risikobeurteilung	34
4	**Brandsicherheitsberechnungen**	**35**
4.1	Brandphasen	35
4.2	Brandszenarien	38
4.3	Bemessungsbrandszenarien	42

4.4	Systematische Auswahl von Brandszenarien und Bemessungsbrand-szenarien	43
4.5	Brandverläufe	46
4.6	Bemessungsbrände	48
4.7	Wirkungen von Massnahmen des technischen und abwehrenden Brandschutzes auf den Brandverlauf	48
4.8	Kenngrössen und Bestimmungsgleichungen zur Quantifizierung des Brandverlaufs	54
4.9	Kenngrössen zur Quantifizierung der thermischen Eigenschaften von Stoffen	58
5	**Brandmodelle**	**59**
5.1	Typen von Brandmodellen	59
5.2	Analyse von Brandphänomenen mit mathematisch deterministischen Brandmodellen	59
5.3	Charakterisierung der mathematisch deterministischen Brandmodelle	59
5.4	Entwicklung von Bemessungsbränden	66
5.5	Anwendung der Feldmodelle	121
6	**Personensicherheitsberechnungen**	**128**
6.1	Wirkung des Brandrauches auf Personen	128
6.2	Planungsziele und Leistungskriterien zur Beurteilung der Personen-sicherheit	137
6.3	Extinktionskoeffizient	141
6.4	Verfügbare Evakuierungsdauer (ASET)	144
6.5	Erforderliche Evakuierungsdauer (RSET)	144
6.6	Detektionsdauer	144
6.7	Alarmierungsdauer	144
6.8	Reaktionsdauer	145
6.9	Fluchtdauer	149
6.10	Strategie zum Nachweis der Personensicherheit	153
6.11	Evakuierungsstrategien, Evakuierungsszenarien	153
6.12	Kenngrössen und Bestimmungsgleichungen zur Quantifizierung von Brandrauch und Erkennungsweite	154
6.13	Kenngrössen zur Charakterisierung einer Population	158
7	**Evakuierungsmodelle**	**158**
7.1	Typen von Evakuierungsmodellen	158
7.2	Anwendungsgrundsätze	159
7.3	Charakterisierung der Evakuierungsmodelle	159
7.4	Charakterisierung der Individualmodelle	163
7.5	Eingabedaten für Individualmodelle	167
8	**Qualitätssicherung**	**168**
8.1	Überprüfung der Plausibilität und Schlüssigkeit von Ergebnissen	168
8.2	Bewertung von Unsicherheiten und Fehlern	168
8.2.1	Quellen von Unsicherheiten und Fehlern	168

8.2.2 Methoden zur Analyse von Unsicherheiten und Fehlern 168
8.3 Bewertung von Simulationsmodellen 169
8.4 Sicherheitsfaktoren, Sicherheitszuschläge 170
8.5 Kriterienkataloge zur Überprüfung der Qualität von Berechnungen 170

9 Dokumentation 174
9.1 Allgemeines 174
9.2 Inhalt, Aufbau 174
9.3 Darstellungen 175
9.4 Kriterienkataloge zur Erstellung von Dokumentationen 176

TEIL II Anwendung von Brandschutzingenieurmethoden

10 Anwendungsfelder von Brandschutzingenieurmethoden 187
10.1 Allgemeines 187
10.2 Schweizerisches Bauprodukterecht 187
10.3 VKF-Brandschutzvorschriften 187
10.4 Anwendungsmöglichkeiten von Evakuierungsberechnungen nach den VKF-Brandschutzvorschriften 191

11 Rauch- und Wärmeabzugsanlagen 191
11.1 Allgemeines 191
11.2 Prinzipien der Rauch- und Wärmeableitung 192
11.2.1 Entlüftung 192
11.2.2 Verdünnung 192
11.2.3 Strömungsbeeinflussung 192
11.3 VKF-Brandschutzrichtlinie „RWA“ (VKF-BSR 22-03) 195
11.4 Nationale und internationale Normen, Richtlinien und technische Regeln 195
11.5 Komponenten von RWA 201
11.6 Bemessung von RWA 202
11.7 Spezielle Aspekte der Bemessung, der Ausführung und des Betriebs von RWA 202

TEIL III Verzeichnisse

12 Verzeichnisse 215
12.1 Quellenverzeichnis 215
12.2 Tabellenverzeichnis 223
12.3 Abbildungsverzeichnis 225
12.4 Begriffsverzeichnis 228
12.5 Abkürzungsverzeichnis 231
12.6 Stichwortverzeichnis 232

Anhang 239

Teil I

Brandschutzingenieur-methoden

1 Grundlagen

1.1 Geltungsbereich

Die Ausführungen des vorliegenden Handbuches beziehen sich auf

- die Planung und Bewertung der Brandsicherheit von Gebäuden,
- die Bewertung der Sicherheit von sich in Gebäuden befindenden Personen und
- die Bemessung von Rauch- und Wärmeabzugsanlagen (RWA)

mithilfe eines leistungsorientierten Ansatzes und des damit verbundenen Arbeitsablaufs.

1.2 Zielsetzung und Zweck

Das vorliegende Handbuch verfolgt das Ziel, den aktuellen internationalen Stand von Wissenschaft und Technik zu den ingenieurwissenschaftlichen Methoden im Brandschutzwesen in übersichtlicher Form der Praxis zur Verfügung zu stellen. Dazu mussten in vornehmlich ausländischen Normen, Richtlinien, Forschungsarbeiten, Fachbüchern und Fachzeitschriften vorzufindende Informationen und Daten analysiert, interpretiert, verglichen und in einer Synthese zusammengeführt werden. Hiermit soll ein Beitrag an

- die Verständigung unter den an der leistungsorientierten Brandschutzplanung beteiligten Personen,
- die Förderung der Anwendung und Akzeptanz von ingenieurwissenschaftlichen Methoden im Brandschutzwesen,
- die Entwicklung von einheitlichen Anwendungsgrundlagen,
- eine wirkungsvolle Qualitätssicherung, welche die Erzeugung von belastbaren Ergebnissen bewirkt,

geleistet werden.

1.3 Zielgruppen

Dieses Handbuch richtet sich vornehmlich an qualifizierte Fachleute von Ingenieur-, Planungs- und Beratungsunternehmen sowie von Behörden und Versicherungen. Deren Kenntnisse und Erfahrungen im vorbeugenden Brandschutz, in Brandphysik, Brandchemie, Bautechnik, Simulationstechnik und anderen relevanten Fachgebieten sollten der Tragweite und Komplexität der jeweiligen Aufgabenstellung entsprechen.

1.4 Inhalt und Abgrenzung

Die aus der internationalen Brandschutzforschung gewonnenen technisch-wissenschaftlichen Erkenntnisse werden nach den folgenden Aspekten aufbereitet:

- Beschreibung des Planungsprozesses;
- Konkretisierung der von den VKF-Brandschutzvorschriften definierten allgemeinen Schutzziele mithilfe von funktionalen Schutzzielen und von Planungszielen;
- Bestimmung von Leistungskriterien und der brandschutztechnisch relevanten Zeiträume;
- Entwicklung von Brand- und Evakuierungsszenarien;
- Festlegung der bemessenden, d.h. für die Dimensionierung massgebenden Szenarien;
- Typisierung und Auswahl von deterministischen Modellen zur Bewertung von Brandschutzkonzepten;
- Durchführung von Qualitätssicherungsmassnahmen;
- Anfertigung von Dokumentationen;
- Feststellung der im schweizerischen Bauprodukterecht und in den VKF-Brandschutzvorschriften beschriebenen Anwendungsfelder für ingenieurwissenschaftliche Methoden;
- Hinweise zur Planung, Bemessung und Realisierung von RWA (als ein mögliches Anwendungsfeld der Brandschutzingenieurmethoden).

Das Handbuch vermag das Folgende nicht zu leisten:

- die Beschreibung von Handlungsanweisungen im Sinne von zwingend anzuwendenden Vorgaben;
- die Entwicklung neuer Modelle, Verfahren und Regeln;
- die Erstellung und Dokumentation von Brandschutzkonzepten;
- die Thematisierung
  - von Brand- und Rauchversuchen an physikalischen Modellen (Modellversuche) oder an ausgeführten Objekten (Realversuche),
  - von Rauchschutz-Druckanlagen (RDA),
  - der statischen Bemessung von Tragwerken und Bauteilen unter Brandbeanspruchung,
  - von probabilistischen Modellen (weil sie in Ermangelung aussagekräftiger statistischer Daten für die Entwicklung von Brandschutzentwürfen bis auf absehbare Zeit kaum Anwendung finden);
- die Berücksichtigung extremer Ereignisse, wie Paniksituationen, Brandanschläge, das gleichzeitige Auftreten von mehreren Brandentstehungsorten oder der Ausfall von Einrichtungen und Anlagen des baulichen oder technischen Brandschutzes (was im Rahmen spezieller Sicherheitskonzepte zu untersuchen wäre);
- die Erhebung des Anspruchs auf Vollständigkeit.

1.5 Literatur

Vorzugsweise werden die Inhalte dieses Handbuches der Primär- bzw. Originalliteratur, also Forschungsarbeiten und Dokumenten mit bindendem Charakter, wie Normen, Richtlinien und Merkblättern, entnommen. Aus praktikablen Gründen wird auf die Sekundär- und Tertiärliteratur zurückgegriffen, sofern

- die Primärliteratur nicht in einer leicht zugänglichen Publikation vorliegt;
- Arbeiten auf Literaturrecherchen basieren;

- im vorliegenden Handbuch die allgemeine Akzeptanz bzw. Verbreitung einer Meinung oder Empfehlung kundgetan werden soll.

Um Urheberrechte nicht zu verletzen und Inhalte nachvollzieh- und überprüfbar zu halten, wird dem Zitieren und Belegen grosse Beachtung geschenkt. Zugunsten einer guten Lesbarkeit werden Vorgehen und Form wie folgt gewählt:

- Im Allgemeinen wird sinngemäss zitiert.
- Inhalte von Normen, Richtlinien und Merkblättern werden in der Regel wörtlich zitiert, wobei auf eine spezielle Kennzeichnung, wie z.B. mit Anführungs- und Schlusszeichen, verzichtet wird.
- Die Quellenangabe für sinngemässe und wörtliche Zitate erfolgt stets am Satz- oder Abschnittsende in Form des sogenannten Kurzbeleges (Index mit Seitenangabe).
- Übernommene Tabellen, Grafiken, Darstellungen und Fotografien werden im Tabellenverzeichnis (vgl. Kapitel 12.2) und im Abbildungsverzeichnis (vgl. Kapitel 12.3) mithilfe des Kurzbeleges gekennzeichnet (Index mit Seitenangabe).
- Die genauen Angaben zu den Quellen lassen sich mithilfe des Indexes im Quellenverzeichnis von Kapitel 12.1 nachschlagen.
- Literatur, die lediglich zwecks weiterführender Information erwähnt wird, wird am Ende der betreffenden Textstelle mit kursiv geschriebenen Indizes gekennzeichnet. Dabei entfällt die Angabe von Seitenzahlen.
- Ferner wird beim Index in der Regel auf die Seitenangabe verzichtet, wenn
  - zitierte Textstellen von Normen, Richtlinien und Merkblättern vorteilhafter mithilfe eines Paragrafen, Artikels oder einer Ziffer referenzierbar sind;
  - ein in einem Periodikum publizierter Fachartikel nur wenige Seiten umfasst (wobei in diesem Fall die Seitenangabe des Periodikums im Quellenverzeichnis zu finden ist).

1.6 Voraussetzungen

Im Rahmen der Anwendung von ingenieurwissenschaftlichen Methoden müssen geeignete Qualitätssicherungsmassnahmen geplant und umgesetzt werden. Diesbezüglich sei auf Kapitel 8 verwiesen.

Werden Daten aus Publikationen benutzt, so müssen die an diese Daten gekoppelten Randbedingungen mit denjenigen des konkreten Anwendungsfalls verglichen werden.

Im vorliegenden Handbuch aufgeführte Tabellenwerte sind als Richtwerte zu verstehen und keinesfalls als normative Vorgaben.

Massgebend für das Anwenden von Normen, Richtlinien, Verordnungen, Regelwerken, Merkblättern etc. ist deren Fassung mit dem neusten Ausgabedatum, die bei der jeweilig herausgebenden Institution erhältlich ist.

1.7 Abweichungen

Auch im Brandschutzwesen öffnen sich die Anwendungsfelder für ingenieurwissenschaftliche Methoden, und laufend stehen neue wissenschaftlich abgesicherte Erkenntnisse zur Verfügung, die sich in Rechenmodelle integrieren lassen.

Deshalb sind Abweichungen von den Empfehlungen dieses Handbuches selbstverständlich möglich, sofern diese durch Theorie oder Versuche ausreichend begründet werden oder wenn neue Entwicklungen und Erkenntnisse diese rechtfertigen.

Im Weiteren kann bei Modellen oder Daten vom Anwendungs- bzw. Gültigkeitsbereich abgewichen werden, wenn die Konsequenzen analysiert werden.

1.8 Gesetzliche Grundlagen

Schweizerisches Bauprodukterecht

Das schweizerische Bauprodukterecht, bestehend aus dem Bauproduktegesetz und der Bauprodukteverordnung, setzt zusammen mit der Interkantonalen Vereinbarung zum Abbau technischer Handelshemmnisse (IVTH) die Bauproduktericht-linie der Europäischen Union (EU) um.

Rechtlicher Bestandteil der bilateralen Abkommen mit der EU und des schweizerischen Bauprodukterechts sind die Richtlinie 89/106/EWG des Rates vom 21.12.1988 und das von dieser Richtlinie referenzierte Grundlagendokument „Wesentliche Anforderungen“ Nr. 2, „Brandschutz“, vom 28.02.1994. *[1] [2]*

Das EU-Grundlagendokument „Wesentliche Anforderungen“ Nr. 2, „Brandschutz“, bezeichnet die Methoden des Brandschutzingenieurwesens als geeignete Verfahren

- zur Bewertung des erforderlichen Brandsicherheitsniveaus und
- zur Bemessung und Berechnung der notwendigen Schutzmassnahmen.

Die nach dem schweizerischen Bauprodukterecht vorgesehenen Anwendungsmöglichkeiten von ingenieurwissenschaftlichen Methoden werden in Kapitel 10.2 beschrieben.

Schweizerische Brandschutzvorschriften

Das vorliegende Handbuch hat folgenden Bezug zu den VKF-Brandschutzvorschriften, Ausgabe 2003: Es

- leistet im Rahmen der in den VKF-Brandschutzvorschriften festgelegten Anwendungsmöglichkeiten von ingenieurwissenschaftlichen Methoden Hilfestellung für die Auswahl von Berechnungsverfahren und Eingangsdaten sowie für die Bewertung und Überprüfung der Plausibilität von Berechnungsergebnissen;
- nimmt die Festlegung von Artikel 57 der VKF-Brandschutznorm (VKF-BSN 1-03) auf, der die Anforderung an die Erstellung und die Betriebsbereitschaft von Einrichtungen für den technischen Brandschutz – im Speziellen für RWA – definiert; [3]
- ergänzt den Geltungsbereich der VKF-Brandschutzrichtlinie „Rauch- und Wärmeabzugsanlagen“ (VKF-BSR 22-03) im Sinne von Ziffer 1, Absatz 2 sowie Ziffer 3.9 um die Bemessung, die Ausführung und den Betrieb von

RWA. Während die VKF-Brandschutzrichtlinie betreffend RWA festlegt, **wann** und **wo** in Bauten und Anlagen Massnahmen für den Abzug von Rauch und Wärme im Brandfall vorzukehren sind (VKF-BSR 22-03, Ziffer 1, Absatz 1), versucht das vorliegende Handbuch aufzuzeigen, **wie** die normativen Vorgaben, unter Berücksichtigung des derzeitigen internationalen Wissensstandes, umgesetzt werden können. [4]

Auf die von den schweizerischen Brandschutzvorschriften spezifizierten Anwendungsmöglichkeiten für ingenieurwissenschaftliche Methoden wird in Kapitel 10.3 eingegangen.

1.9 Brandschutzkonzepte

Brandschutzkonzepte bilden die Grundlage für die Anwendung von ingenieurwissenschaftlichen Methoden. Ingenieurwissenschaftliche Methoden sind stets an ein Brandschutzkonzept gebunden, denn nur ein solches führt dazu, dass die Brandsicherheit und die dazugehörenden Massnahmen im Rahmen einer ganzheitlichen Betrachtung ermittelt bzw. festgelegt werden. [5], S. 38

Aufbau und Inhalt von Brandschutzkonzepten

Ein Brandschutzkonzept ist das Ergebnis eines methodischen Vorgehens, das in der Regel aus den folgenden Schritten besteht:

- Erstellung einer Liegenschafts- und Gebäudeanalyse (Lage, Geometrie, Nutzung);
- Identifikation der öffentlich-rechtlichen, privatrechtlichen und betriebswirtschaftlichen Schutzziele;
- Beurteilung des Brandrisikos mit einer (meist qualitativen) Ermittlung, Analyse und Bewertung von objektbezogenen Risiken;
- Entwicklung von objektspezifischen und optimal aufeinander abgestimmten Massnahmen des vorbeugenden (baulichen, technischen, betrieblichen) und abwehrenden Brandschutzes.

Hinsichtlich Inhalte und Umfang von Brandschutzkonzepten bestehen unterschiedliche Auffassungen. Brandschutzkonzepte müssen jedoch mindestens jene Angaben enthalten, die für die Gesamtbewertung der brandschutztechnischen Massnahmen und für die Nachvollziehbarkeit der Schlussfolgerungen erforderlich sind.

Die Erstellung von Brandschutzkonzepten ist nicht Gegenstand dieses Handbuches. Für detailliertere Informationen sei auf die Fachliteratur und auf die entsprechenden Richtlinien und Dokumente verwiesen. *[5] [6] [7] [8]*

Arten von Brandschutzkonzepten

Standard-Brandschutzkonzepte

Standard-Brandschutzkonzepte bestehen aus einer übersichtlichen und klaren Beschreibung der zur Anwendung gelangenden Massnahmen der VKF-Brandschutzvorschriften. Dabei werden die gesetzlich vorgeschriebenen, qualitativ formulierten Schutzziele pauschal berücksichtigt.

Bei Abweichungen von den Vorschriften werden, als Nachweis der gleichwertigen Schutzzielerreichung, die Kompensationsmassnahmen in der Regel mithilfe einer verbalen Argumentation dargestellt und schlüssig begründet. Es können aber auch rechnerische Nachweise geführt werden.

Leistungsorientierte Brandschutzkonzepte mit Methoden des Brandschutzingenieurwesens

Wird der Brandschutz für ein Bauprojekt mithilfe von ingenieurwissenschaftlichen Methoden entworfen, so müssen die allgemeinen Schutzziele, unter Berücksichtigung der gesetzlich vorgeschriebenen Sicherheitsinteressen, objektspezifisch definiert werden. Eine algebraische oder numerische Behandlung setzt zudem voraus, dass die allgemeinen Schutzziele durch die Festlegung von funktionalen Schutzzielen und von Planungszielen konkretisiert und mit entsprechenden Leistungskriterien verglichen werden können.

1.10 Prozesskette der leistungsorientierten Brandschutzplanung

Die leistungsorientierte, auf ingenieurwissenschaftlichen Methoden basierende Brandschutzplanung lässt sich in die in Abbildung 1 dargestellten Prozessschritte gliedern. Dabei sind diejenigen Prozessschritte, die den Schwerpunkt des vorliegenden Handbuches bilden, mit einer Umrandung hervorgehoben. [9], S. 3-17; [10], S. 21-25

Ergänzend zeigt Abbildung 2 die in der präskriptiven Brandschutzplanung abzuarbeitenden Prozessschritte.

Obwohl die leistungsorientierte Brandschutzplanung nur ein eingebundener Teil des Gesamtprozesses „Bauplanung – Baurealisierung – Gebäudebetrieb“ ist, sollte sie, zwecks Erzielung einer hohen Planungsflexibilität und eines optimalen Kosten-Nutzen-Verhältnisses, möglichst früh initialisiert werden. Ausserdem bedingen Planungsakzeptanz und -erfolg eine Übereinstimmung der Sichtweisen aller Projektbeteiligten während der ganzen Projektdauer.

1. Prozessschritt: Festlegung des Projektrahmens

Zu Beginn einer leistungsorientierten Brandschutzplanung sollte der Projektrahmen definiert werden, indem beispielsweise

- die Projektorganisation;
- die Projektbeteiligten, wie
  - Gebäudeeigentümer, -nutzer und -verwalter,
  - Architekt,
  - Fachplaner,
  - Brandschutzexperte,
  - Behördenvertreter,
  - Versicherungen,

  mit ihren Anschriften, Funktionen, Verantwortlichkeiten und Qualifikationen;
- die Sichtweisen, Wünsche und Vorschläge der Projektbeteiligten;
- die Entwurfsabsichten und -vorgaben;
- das Zeit- und Kostenbudget;
- der Projektperimeter (Raum, Gebäudeteil, Gebäude, Umgebung);
- die Lage des Gebäudes oder Gebäudeteils;
- die Anzahl, Fläche und Höhe der Geschosse;

- die Betriebseinrichtungen, Einrichtungsgegenstände und brennbaren Stoffe;
- die industriellen Prozesse;
- die Nutzung der Räumlichkeiten;
- die persönlichen Merkmale der Gebäudenutzer;
- die massgebenden gesetzlichen Vorschriften (Normen, Richtlinien etc.);
- die Flucht- und Rettungswege

ermittelt und dokumentiert werden.

Hierbei sollten kritische betriebs- oder kostenrelevante Annahmen und Vorgaben, die für das Funktionieren eines Brandschutzkonzeptes unabdingbar sind und während der Lebensdauer eines Gebäudes beibehalten werden müssen, hervorgehoben und in einer gesonderten Liste festgehalten werden, wie z.B.

- örtliche und mengenmässige Begrenzung von Brandlasten,
- Limitierung von Personenzahlen,
- vorgegebene Massnahmen des technischen, betrieblichen oder abwehrenden Brandschutzes.

2. Prozessschritt: Identifikation der allgemeinen Schutzziele

Unter Berücksichtigung der Randbedingungen des zuvor definierten Projektes identifizieren und priorisieren die Projektbeteiligten die allgemeinen Schutzziele bzw. die Schutzinteressen. Letztere haben ihren Ursprung in den rechtsgültigen VKF-Brandschutzvorschriften (öffentlich- oder privatrechtliche Sphäre) oder darüber hinausgehend in einer Übereinkunft der Projektbeteiligten (betriebswirtschaftliche Sphäre). Diesbezüglich sei auf Kapitel 2.1 verwiesen.

3. Prozessschritt: Festlegung der funktionalen Schutzziele und der Planungsziele

Die allgemeinen Schutzziele erfordern eine Konkretisierung und Spezifizierung, damit diese für die ingenieurwissenschaftlichen Methoden zugänglich werden und sich schliesslich objektspezifische Brandschutzmassnahmen entwickeln lassen. Die im Zuge dieses Prozessschrittes verbal formulierten funktionalen Schutzziele müssen einer deterministischen oder probabilistischen Quantifizierung zugänglich sein, sodass jedes funktionale Schutzziel in mindestens ein bewertbares Planungsziel überführt werden kann (vgl. Kapitel 2.2).

4. Prozessschritt: Feststellung der Leistungskriterien und der brandschutztechnisch relevanten Zeiträume

Um die Effizienz eines Brandschutzentwurfs bewerten bzw. die Erfüllung der Planungsziele überprüfen zu können, müssen den diesen zugeordneten technischen Grössenwerten handfeste Grenzwerte oder akzeptierte Wertebereiche – sogenannte Leistungskriterien – gegenübergestellt werden (vgl. Kapitel 2.3 und 6.2).

Im Weiteren sind die brandschutztechnisch relevanten Zeiträume, während der die Leistungskriterien erfüllt sein müssen, zu bestimmen.

5. Prozessschritt: Entwicklung von Brand-/Evakuierungsszenarien und Ermittlung der bemessenden Szenarien

Zur Beschreibung möglicher Brandereignisse müssen Szenarien entwickelt werden, welche die Eigenschaften und Merkmale des Brandes, des Gebäudes und – falls die Gesundheit und das Leben von Menschen eine Rolle spielen – der Gebäudenutzer erfassen. Die zahlreichen, theoretisch unendlich vielen Brandszenarien werden durch Kombinationen und Eliminationen systematisch auf eine handhabbare und auf die Planungsziele fokussierte Menge an Bemessungsbrandszenarien reduziert. Hierfür lassen sich die Verfahren zur Risikobeurteilung verwenden (vgl. Kapitel 3 und 4).

Analog müssen bei Evakuierungsberechnungen Evakuierungsszenarien und eine Auswahl von bemessenden Evakuierungsszenarien erzeugt werden (vgl. Kapitel 3 und 6).

6. Prozessschritt: Entwicklung von Grobkonzepten

Es folgt die Entwicklung von einem oder mehreren Grobkonzepten, die ein Bündel an bau-, betriebs- und brandschutztechnischen Massnahmen umfassen und, bei Belastung mit den Bemessungsbrandszenarien, die Anforderungen der Planungsziele und der Leistungskriterien mutmasslich zu erfüllen vermögen.

In Abhängigkeit des Untersuchungsgegenstandes lassen sich Grobkonzepte auf den folgenden Stufen erstellen:

- Subsystem (z.B. zur Bestimmung der Wirksamkeit eines NRWG),
- System (z.B. zur Bemessung einer RWA),
- Gebäude (z.B. zum Nachweis der Brandsicherheit eines Gebäudes).

7. Prozessschritt: Bewertung der Grobkonzepte mit adäquaten Methoden und Modellen inkl. Qualitätssicherung

Mithilfe einer geeigneten Rechenmethode werden die erarbeiteten Grobkonzepte hinsichtlich der relevanten Bemessungsbrandszenarien bewertet und auf die Erfüllung der Leistungskriterien überprüft.

Der Bewertungsprozess gliedert sich in die folgenden drei Schritte:

1. Schritt: Bestimmung der Rechenmethode und der hierfür erforderlichen qualifizierten, verifizierten und validierten Werkzeuge (Modelle, Software etc.);

2. Schritt: Durchführung der Berechnung;

3. Schritt: Überprüfung der Ergebnisse auf Unsicherheiten und Fehler mit geeigneten Methoden.

Genügen die Grobkonzepte den Leistungskriterien nicht, so können die folgenden iterativen Wege eingeschlagen werden:

1. Option: Modifikation der Grobkonzepte;

2. Option: Modifikation der Brand-/Evakuierungsszenarien bzw. der das Gebäude, die Gebäudenutzung oder den Brand betreffenden Einflussgrössen;

3. Option: Modifikation der Planungsziele.

Betreffend Auswahl geeigneter Methoden, Modelle und Qualitätssicherungsmassnahmen sei auf die Kapitel 5, 7 und 8 verwiesen.

8. Prozessschritt: Wahl des Brandschutzkonzeptes

Resultiert aus der Bewertung der Grobkonzepte nur ein von allen Projektbeteiligten akzeptiertes Konzept, so stellt dieses den endgültigen Brandschutzentwurf dar. Bei mehreren Möglichkeiten ist eine weitere Bewertung erforderlich, die beispielsweise

- die Wirtschaftlichkeit,
- den Unterhalt,
- den Gebrauch,
- den Montageaufwand,
- die Lieferbarkeit von Systemen und Materialien

in Erwägung ziehen kann.

9. Prozessschritt: Erstellung des Schlussberichtes

Der Schlussbericht über die leistungsorientierte Brandschutzplanung sollte aus den folgenden Teilen bestehen:

- Bericht über die Planungsgrundlagen, der die Voranalyse-Phase dokumentiert,
- Bericht über die evaluierte und genehmigte Brandschutzplanung, der die Analyse-Phase dokumentiert,
- Brandschutzplänen, Ausführungsplänen, Ausschreibungsunterlagen,
- Dokumentation der Abweichungen von der Brandschutzplanung und der Tests,
- Anleitung über den Gebäudebetrieb und Unterhalt brandschutztechnischer Anlagen.

Diesbezüglich sei auf Kapitel 9 verwiesen.

10. Prozessschritt: Realisierung des Bauprojektes

Bei der Umsetzung der leistungsorientierten Brandschutzplanung sollte darauf geachtet werden, dass Abweichungen von der genehmigten Planung gemeldet und dokumentiert werden. Bedeutsame Abweichungen sollten von den Projektbeteiligten bewertet und bewilligt und im Schlussbericht berücksichtigt werden.

Bau- und Anlagenteile müssen der von der Brandschutzplanung geforderten Qualität entsprechen, was bestätigt oder attestiert werden sollte.

11. Prozessschritt: Brandschutzmanagement und Brandschutzkontrolle

Ein während der Lebensdauer eines Gebäudes praktiziertes wirkungsvolles Brandschutzmanagement und wiederkehrende unabhängige Brandschutzkontrollen gewährleisten die dauerhafte Einhaltung der in der Brandschutzplanung getroffenen Annahmen, die Wirksamkeit der vorgegebenen Massnahmen und die Brandsicherheit im Allgemeinen.

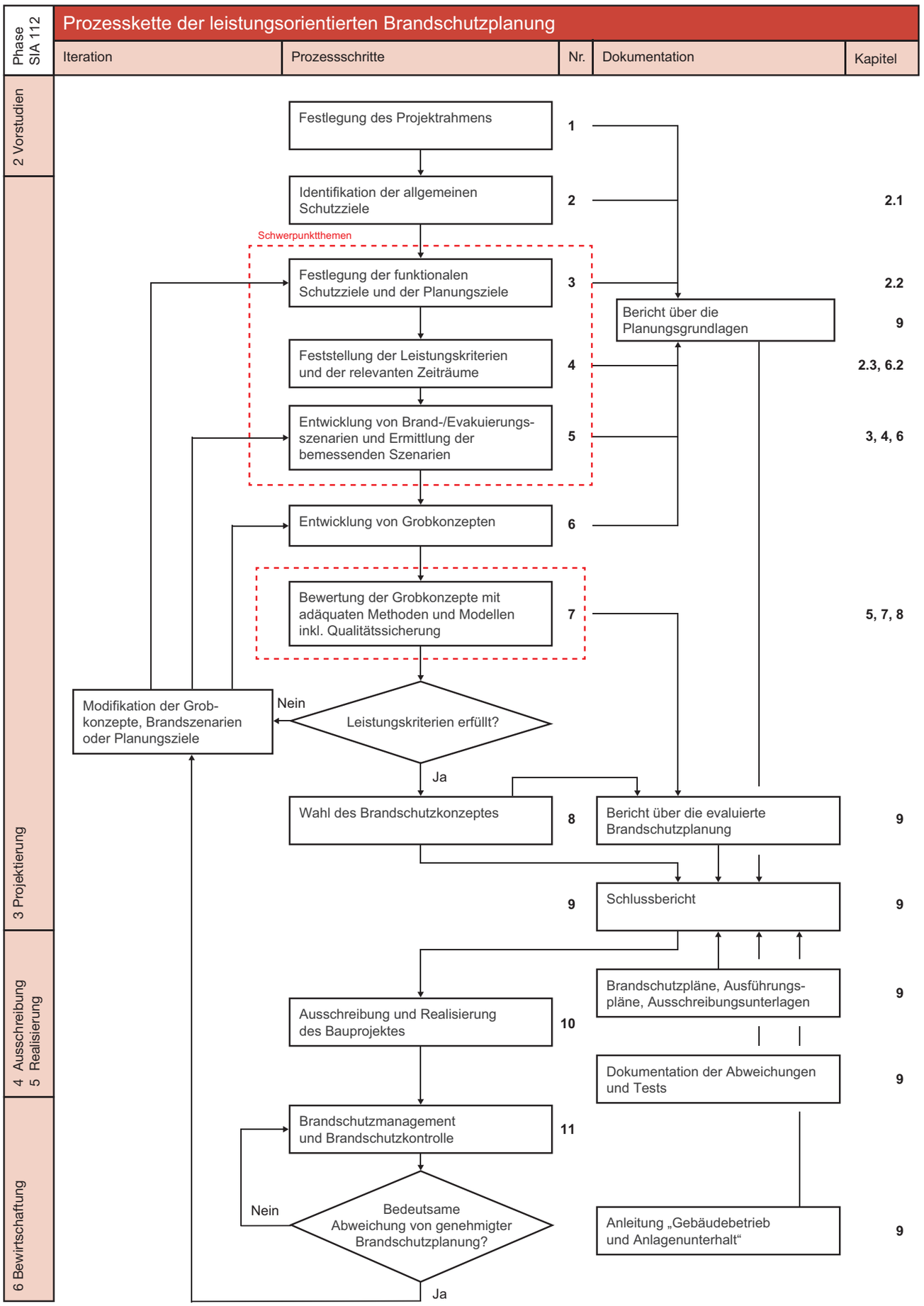


Abb. 1: Prozesskette der leistungsorientierten Brandschutzplanung

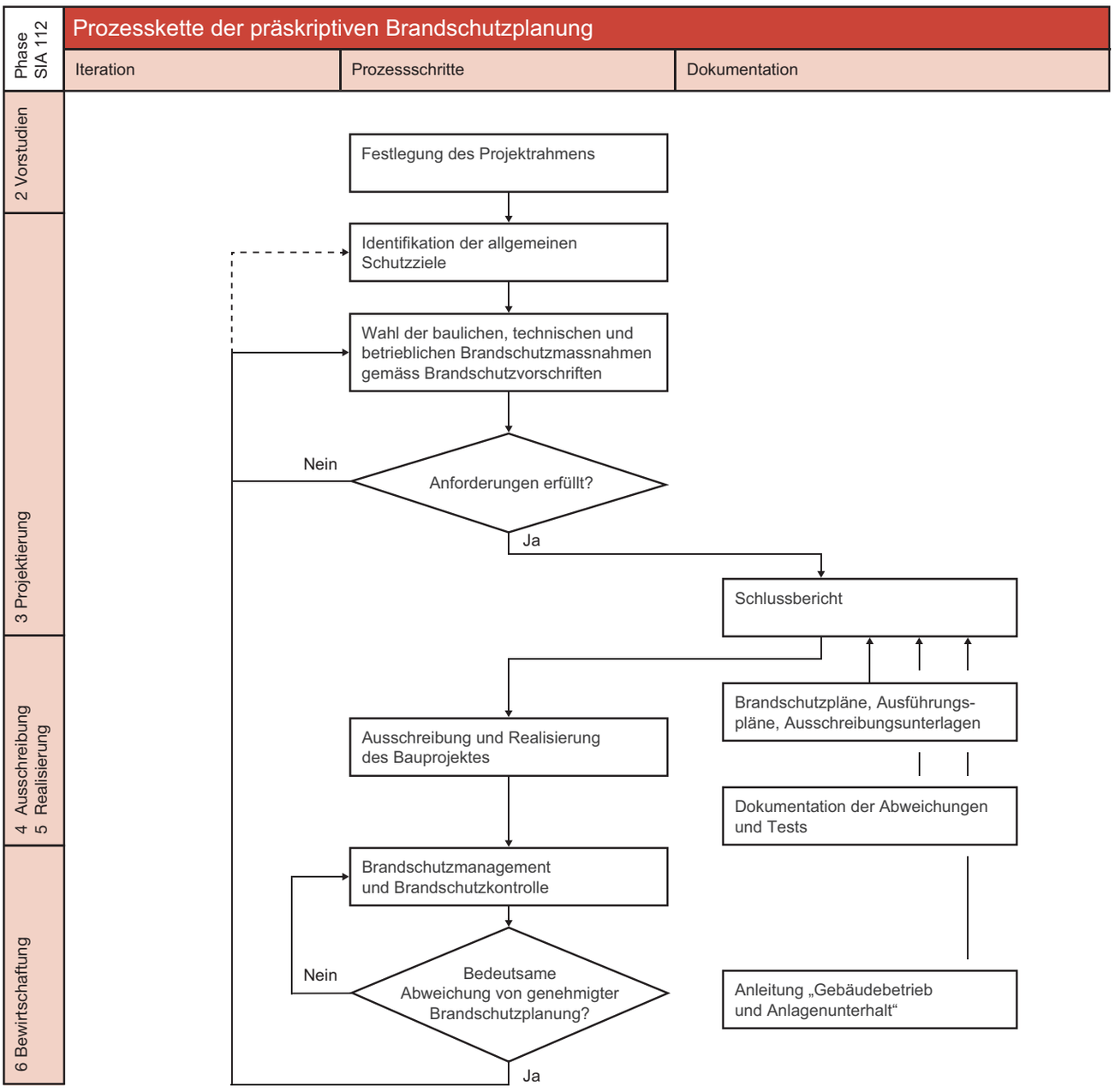


Abb. 2: Prozesskette der präskriptiven Brandschutzplanung

1.11 Berechnungskonzept-Stufen

Brandschutztechnische Berechnungen, worunter

- sowohl **Nachweise** zur Überprüfung der Erfüllung von Leistungskriterien,
- als auch **Bemessungen** zur Entwicklung von zulässigen Brandschutzlösungen

zu verstehen sind, lassen sich – in Anlehnung an SN EN 1991-1-2 (Eurocode 1) – drei verschiedenen konzeptionellen Stufen zuordnen. Diese unterscheiden sich nach der angewandten Methode und somit nach dem erforderlichen Arbeitsaufwand, der Aussagekraft von Ergebnissen und den mitberechneten Sicherheitsreserven.

Konzept-Stufe 1: Berechnungen mithilfe tabellarischer Werte

In der niedrigsten Stufe erfolgt die brandschutztechnische Bemessung mithilfe von Tabellenwerken, womit sich lediglich Bauteile oder brandschutztechnische Anlagen für Einzelräume analysieren lassen.

Konzept-Stufe 2: Berechnungen mithilfe vereinfachter Rechenverfahren

Zu den Verfahren der nächsthöheren Konzept-Stufe zählen die algebraischen Modelle (Handrechnungen, rechnerische Näherungsverfahren). Mit solchen Verfahren lassen sich einzelne Teile von Bauwerken oder brandschutztechnische Anlagen für einfache Raumkonfigurationen bemessen.

Konzept-Stufe 3: Berechnungen mithilfe allgemeiner Rechenverfahren

Zu den allgemeinen Rechenverfahren gehören die numerischen Modelle, die stets eine EDV-Unterstützung bedingen und sich auf gesamte Bauwerke oder auf brandschutztechnische Anlagen für komplexe Raumkonfigurationen anwenden lassen. Dabei können die Geometrie, die Nutzungsansprüche, die thermischen und mechanischen Einwirkungen leistungsabhängig festgelegt werden. [11], S. 8

In Tabelle 1 werden die drei Konzept-Stufen anhand ihrer Vorteile, Nachteile und Verfahren charakterisiert.

1.12 Bemessungs-/Nachweisstrategie

Die Leistungsfähigkeit einer einzelnen Brandschutzmassnahme oder auch eines umfassenden Brandschutzkonzeptes lässt sich mithilfe des folgenden leistungsorientierten Ansatzes ingenieurmässig bemessen/nachweisen:

Für die brandschutztechnisch relevanten Zeiträume müssen die aus jedem allgemeinen Schutzziel abgeleiteten Planungsziele, in quantitativer Hinsicht, den entsprechenden Leistungskriterien genügen.

Dabei wird ein mit algebraischen oder numerischen Modellen für das jeweilige Planungsziel ermittelter Rechenwert mit einem für dieses Planungsziel konsensual festgelegten Grenzwert oder Wertebereich – dem sogenannten Leistungskriterium – verglichen und auf Zulässigkeit überprüft.

Konzept-Stufen für brandschutztechnische Berechnungen				
Kriterium		**Konzept-Stufe 1**	**Konzept-Stufe 2**	**Konzept-Stufe 3**
Vorteile		Standardisiertes Vorgehen Hohe Akzeptanz durch weite Verbreitung Eindeutige Ergebnisse Geringer Arbeitsaufwand Interpolation von Werten EDV-Unterstützung entfällt Kein Spezialistenwissen erforderlich	Standardisierte Verfahren Behebung von Nachweislücken und Einschränkungen der Stufe-1-Verfahren Wirtschaftliche Optimierung möglich Kostengünstige EDV (oder Handrechnungen)	Analyse von Bauteilen, Bauwerksteilen oder Gesamtbauwerken mit beliebiger Geometrie Für komplexe Fragestellungen geeignet Definition von beliebigen Szenarien Realitätsnahe Nachweise Realisierung von massgeschneiderten Lösungen Gute wirtschaftliche Optimierungsmöglichkeiten Objektspezifische Festlegung der Sicherheitsreserven
Nachteile		Anwendbarkeit auf standardisierte Fälle begrenzt Vorgegebene, eng gesetzte Anwendungsgrenzen In der Regel hohe Sicherheitsreserven (Wirtschaftlichkeit!?) Keine Optimierungsmöglichkeiten	Anwendung auf Einzelbauteile beschränkt Mittlerer Arbeitsaufwand Szenarien sind vordefiniert Vorgegebene, relativ eng gesetzte Anwendungsgrenzen Gewandtheit im Umgang mit Normen unablässig	Grosser Arbeitsaufwand Beschaffung sehr vieler Eingabedaten Fundiertes Fachwissen erforderlich (Spezialisten) Ergebnisse erfordern eine Interpretation Anschaffungs-/Betriebskosten für EDV (Soft-/Hardware)
Verfahren (Beispiele)	**Tragwerk**	Bemessungstabellen für Bauteile, z.B. zu finden in • DIN 4102-4 • Eurocodes 2 oder 6	Bestimmung von Mindestquerschnittsabmessungen nach den Eurocodes	Analyse der thermischen und mechanischen Einwirkungen auf Tragwerke nach Eurocode 1 mithilfe von Computerprogrammen
	RWA	RWA-Bemessung nach • DIN 18232-2 (NRWA) • DIN 18232-5 (MRWA)	Bemessung von Entrauchungssystemen nach • VDI 6019 Blatt 2 • TRVB S 125 • NFPA 92B	Bemessung von Entrauchungssystemen mithilfe von • Zonenmodellen • Feldmodellen
	Evakuierung	Festgelegte Anforderungen an • die Mindestbreiten von Gängen, Treppen und Ausgängen • die Längen von Flucht- und Rettungswegen	Evakuierungsberechnungen mithilfe von Handformeln	Evakuierungssimulation mithilfe von Individualmodellen

Tab. 1: Konzept-Stufen für brandschutztechnische Berechnungen

2 Allgemeine und funktionale Schutzziele, Planungsziele, Leistungskriterien

2.1 Allgemeine Schutzziele

Die in VKF-Brandschutznorm, Artikel 9 definierten allgemeinen Schutzziele widerspiegeln das gesellschaftliche Schutzinteresse und beschreiben, **warum** etwas erreicht werden soll. Sie lassen sich einer öffentlich-rechtlichen, einer privatrechtlichen sowie einer betriebswirtschaftlichen Sphäre zuordnen. [5], S. 66-67

Die Schutzinteressen der öffentlich-rechtlichen und privatrechtlichen Sphäre sind in Form von Art und Menge der vorgeschriebenen Massnahmen in den Brandschutzvorschriften der VKF verankert und legen das gesellschaftspolitisch vorgegebene Mass an Brandsicherheit fest. Zumindest bei Neubauprojekten sind diese nicht verhandelbar.

Die Schutzinteressen der betriebswirtschaftlichen Sphäre ergeben sich aus den privaten Interessen der Gebäudeeigentümer, -nutzer und/oder -verwalter.

Schutzinteressen der öffentlich-rechtlichen Sphäre und der privatrechtlichen Sphäre

- Schutz des Lebens und der Gesundheit von Menschen,
- Schutz von Bauwerken (Tragfähigkeit),
- Schutz von Sachwerten (Gebäude),
- Schutz der Nachbarschaft,
- Schutz der Umwelt,
- Schutz von Kulturgütern,
- Gewährleistung der Einsatzmöglichkeiten und Sicherheit der Einsatzkräfte.

Schutzinteressen der betriebswirtschaftlichen Sphäre

- Schutz von Sachwerten (Mobiliar, Produktionsmittel, Stoffe und Waren),
- Schutz von Archiven (Daten, Akten, Bücher),
- Bewahrung der Versicherbarkeit und der Kreditwürdigkeit,
- Vermeidung bzw. Begrenzung der Betriebsunterbrechung,
- Optimierung von Versicherungsprämien,
- Vermeidung von straf- und zivilrechtlicher Haftung,
- Bewahrung einer hohen Reputation.

2.2 Funktionale Schutzziele, Planungsziele

Von den allgemeinen Schutzzielen bzw. Schutzinteressen ausgehend, erfordert die ingenieurmässige Brandschutzplanung die verbale Formulierung von funktionalen Schutzzielen. Mit diesem Planungsschritt werden aus jedem Schutzinteresse in der Regel mehrere funktionale Anforderungen abgeleitet, die von der Brandschutzplanung bzw. von den Elementen des baulichen, technischen und abwehrenden Brandschutzes zu

erfüllen sind.

Funktionale Schutzziele legen somit fest, **was** genau und **wie** etwas, zwecks Erfüllung der Schutzinteressen, brandschutztechnisch realisiert werden soll.

Um die qualitativ formulierten funktionalen Schutzziele einer algebraischen oder numerischen Bewertung zugänglich zu machen, müssen diese in quantifizierbare, technische Grössenwerte – die sogenannten Planungsziele – überführt werden.

Tabelle 2 zeigt eine Auswahl von allgemeinen (normativen) Schutzzielen mit Formulierungsbeispielen für zugeordnete funktionale Schutzziele und entsprechende Planungsziele. Die brandschutztechnischen Grössenwerte werden dabei in fetter Schrift hervorgehoben.

Formulierungsbeispiele für allgemeine Schutzziele, funktionale Schutzziele und Planungsziele

Allgemeines Schutzziel (Schutzinteresse)	**Funktionale Schutzziele** (funktionale Anforderungen)	**Planungsziele**
Schutz des Lebens und der Gesundheit von Personen	Begehbarkeit von Flucht- und Rettungswegen	Einhaltung einer **Mindesthöhe** für die raucharme Schicht
		Erzeugung einer angemessenen **Rauchverdünnung**
		Rauchverdrängung durch Aufrechterhaltung einer **Druckkaskade**
	Möglichst frühzeitige Brandentdeckung	Verminderung der **Detektions- und Alarmierungsdauer** und somit der erforderlichen Evakuierungsdauer (RSET)
	Gewährleistung eines sicheren Aufenthaltes in Gebäuden	Bildung von Brandabschnitten mit vorgegebener **Standfestigkeit** bzw. **Feuerwiderstandsdauer**
Schutz von Sachwerten	Begrenzung der Brandausbreitung	Verhinderung eines **Flashovers** im Brandraum
	Begrenzung der Rauchausbreitung	Richtungskontrollierte Rauchgasführung mit Freihaltung von **rauchfreien/raucharmen Zonen**
	Gewährleistung der Standsicherheit von Tragwerken	Gewährleistung eines **Feuerwiderstandes** bzw. einer **Standfestigkeit** für eine bestimmte Zeitdauer
Schutz der Nachbarschaft	Verhinderung der Brandübertragung zwischen Gebäuden	Begrenzung der **Wärmestrahlung** auf die Dach- und Wandflächen angrenzender Gebäude
Schutz der Umwelt	Verhinderung einer Gewässerverschmutzung	Bereitstellung eines **Löschwasserrückhaltevolumens**
Schutz des Kulturgutes	Möglichst frühzeitige Löschung des Brandherdes	Begrenzung der **Brandentwicklungsdauer**
Gewährleistung der Einsatzmöglichkeit der Feuerwehr	Gewährleistung eines sicheren und zielgerichteten Löscheinsatzes	Begrenzung der **Temperatur- und Rauchbelastung** durch Bereitstellung einer wirksamen Rauch- und Wärmeabfuhr
Bewahrung der Versicherbarkeit	Festlegung der Zuverlässigkeit einer Zündquellenvermeidung	Minimalisierung der **Eintrittswahrscheinlichkeit** eines Brandes
Begrenzung der Betriebsunterbrechung	Betriebsaufnahme innert Tagesfrist nach Brandausbruch	**Flächenmässige Begrenzung** der Brand- und Rauchausbreitung

Tab. 2: Formulierungsbeispiele für allgemeine Schutzziele, funktionale Schutzziele und Planungsziele

2.3 Leistungskriterien

2.3.1 Allgemeines

Um die Effizienz eines Brandschutzentwurfs bewerten bzw. die Erfüllung der Planungsziele überprüfen zu können, müssen den diesen zugeordneten technischen Grössenwerten handfeste Grenzwerte oder akzeptierte Wertebereiche – sogenannte Leistungskriterien – gegenübergestellt werden. Sind zur angemessenen Bewertung eines Planungsziels mehrere technische Grössenwerte erforderlich, bedingt dies auch die Verfügbarkeit von entsprechend vielen Leistungskriterien (wie dies beispielsweise bei der Bewertung des Flashovers der Fall ist). Anstelle von Leistungs- wird oftmals auch von Akzeptanzkriterien gesprochen.

Mit der Festsetzung von Leistungskriterien werden im Grunde genommen Schadensbilder gekennzeichnet. Diesbezüglich wäre zu beachten, dass

- ein risikoloses Niveau keinesfalls erzielbar ist, sondern stets ein vertretbares, in der Regel gesellschaftlich akzeptiertes Risiko verbleibt;
- für die Bewertung eines Leistungskriteriums ein qualifiziertes, verifiziertes und validiertes Modell bzw. Verfahren existiert.

Auf wissenschaftlicher Basis sind bisher leider nur für die Personensicherheit Leistungskriterien entwickelt worden.

2.3.2 Leistungskriterien zur Beurteilung der Personensicherheit

Allgemeines

Leistungskriterien zur Beurteilung der Personensicherheit sollten grundsätzlich auf wissenschaftlich begründbaren, medizinisch vertretbaren und gesellschaftlich legitimierten Grenzwerten basieren, die einen möglichst kleinen Ermessensspielraum offen lassen. Zudem sollten sie die folgenden brandphysikalischen Effekte (Planungsziele) berücksichtigen (vgl. Kapitel 6.1, Tabelle 25):

- Erkennungsweite im Brandrauch,
- Reizwirkung des Brandrauches,
- Toxizität des Brandrauches,
- thermische Einwirkung des Brandes.

Im Weiteren sollten die Leistungskriterien in Abhängigkeit der Expositions- bzw. Aufenthaltsdauer sowie des physischen und psychischen Zustandes der Gebäudenutzer quantifiziert werden, wobei der Fokus auf die Selbstrettungsmöglichkeit gerichtet wird, während die Fremdrettung von handlungsunfähigen Personen in den Hintergrund rückt.

Leistungskriterien zur Beurteilung der Selbstrettung

Kapitel 6.2, Tabelle 26 enthält die Überlebensbedingungen beschreibenden Planungsziele, wie

- Höhe der raucharmen Schicht (als Abstand zwischen Fussboden und Rauchgasschichtuntergrenze),
- optischer, thermischer und chemischer Zustand in der raucharmen Schicht sowie
- Temperatur in der Rauchgasschicht,

und die korrespondierenden Leistungskriterien.

Dabei wird zwischen einer kurzen (weniger als 5 Minuten) und einer mittleren bis längeren Aufenthaltsdauer (ca. 5 bis 30 Minuten) unterschieden.

Die Leistungskriterien liegen deutlich unterhalb der Schwelle der Handlungsunfähigkeit von gesunden Personen oder der Erträglichkeit für den gesunden Menschen und berücksichtigen damit auch die Belastbarkeit von gefährdeten Personengruppen, wie z.B. Kinder oder betagte Menschen.

Die Personensicherheit ist gegeben, wenn während der entsprechenden Aufenthaltsdauer, im Rahmen des Erfüllungsgrades, alle korrespondierenden Leistungskriterien zeit- und ortsgleich vorliegen („Und-Verknüpfung“).

Leistungskriterien zur Beurteilung der Fremdrettung

Für die Phase der Fremdrettung, die in der Regel von der 15. bis zur 30. Minute ab Brandausbruch angesetzt wird, existieren derzeit keine spezifischen, allgemein anerkannten Leistungskriterien, welche die zulässige Rauch- und Temperaturbelastung von handlungsunfähigen Personen quantifizieren. Diesbezüglich fehlen entsprechende Untersuchungen oder aber Auswertungen bereits vorliegender Forschungsergebnisse. An dieser Stelle werden deshalb für die Fremdrettungsphase die auf die Selbstrettungsphase bezogenen Leistungskriterien übernommen. [12], S. 79-80; *[13]*

2.3.3 Leistungskriterien zur Beurteilung der Einsatzbedingungen für die Interventionskräfte

Zurzeit besteht noch keine zum allgemeinen Gedankengut zählende Lösung, die während der Interventionsphase für die Hilfskräfte akzeptable Bedingungen betreffend Temperaturbelastung, Wärmestrahlung, optische Rauchdichte, Erkennungsweite und maximal beherrschbarer Brandfläche beschreibt. [12], S. 79-80

Auf die für die Intervention benötigten Zeiträume wird in Kapitel 4.7, Tabelle 10 detaillierter eingegangen.

2.3.4 Leistungskriterien zur Beurteilung des Sachwertschutzes

Leistungskriterien zur Beurteilung des Sachwertschutzes zielen insbesondere auf eine Begrenzung von Schäden

- am Gebäude,
- am Gebäudeinhalt (Anlagen, Einrichtungen, Waren) oder
- infolge Betriebsunterbrechung

ab. Sie können die folgenden brandphysikalischen Effekte (Planungsziele) berücksichtigen:

- Einwirkung der Brandwärme (Leitung, Konvektion, Strahlung),
- Einwirkung von Brandrauchprodukten.

Sie basieren in der Regel auf monetär logischen Grenzwerten, die einem mehr oder weniger grossen Ermessensspielraum unterliegen. Dabei spielen die Versicherungsbedingungen, die Marktpräsenz oder die Reputation häufig eine wichtige Rolle.

In Abhängigkeit der vorherrschenden Umstände – insbesondere der Gebäudegrösse und der vorhandenen Stoffe

und Waren – könnte die Entwicklung der Leistungskriterien beispielsweise auf den folgenden Notwendigkeiten beruhen:

- Begrenzung der Flammenausbreitung auf eine vorgegebene Fläche,
- Begrenzung der Rauchausbreitung auf ein festgelegtes Volumen,
- Limitierung der Rauchgasschichttemperatur zur Vermeidung eines Tragwerkversagens,
- Limitierung der Strahlungswärme zur Vermeidung einer Brandübertragung auf benachbarte Gebäude (≤ 8-12 kW/m^2 gemäss [14], S. 31).

Die Entwicklung von spezifischen Leistungskriterien für alle denkbaren Planungssituationen würde den Rahmen dieses Handbuches sprengen, sodass auf die Fachliteratur verwiesen werden muss.

2.3.5 Leistungskriterien der VKF-Brandschutzvorschriften

Es ist kaum möglich, aus den VKF-Brandschutzvorschriften Leistungskriterien abzuleiten. Die dafür verantwortlichen Gründe werden in den folgenden Abschnitten erläutert.

Ungewisses Brandsicherheitsniveau

Die VKF-Brandschutzvorschriften legen ein gesellschaftlich akzeptiertes Sicherheitsniveau fest. Sie entstanden aus einer Sammlung praktischer Erfahrungen, wobei

- die Nachvollziehbarkeit von wissenschaftlichen Hintergründen,
- ingenieurmässige Bemessungsgrundlagen oder
- statistische Absicherungen

nicht vorhanden sind. Dadurch bleibt das Sicherheitsniveau selbst für den Regelfall, d.h. für ein Regelgebäude mit den typischen Brandgefahren einer regulären Nutzung, ungewiss. Überdies hängt im Einzelfall die reale Leistungsfähigkeit von vorgeschriebenen Brandschutzmassnahmen stark vom sich effektiv einstellenden Brandszenarium und somit von den objektspezifischen Gegebenheiten ab und ist keinesfalls eine Konstante. Deshalb ist das Wissen um das Brandsicherheitsniveau eines einzelnen Gebäudes sehr vage.

Klassifizierte Leistungsfähigkeit

Die Leistungsfähigkeit von präskriptiven, regulären Brandschutzmassnahmen wird klassifiziert. So werden beispielsweise brandschutztechnisch relevante Bauteile Feuerwiderstandsklassen zugeordnet, denen die Normbrandkurve nach ISO 834-1 zugrunde liegt. Letztere stellt eine reine Vergleichsgrösse dar, und die Kriterien für die Erhebung einer solchen nominellen Temperaturzeitkurve sind im Einzelfall kaum relevant. So sind anhand der Feuerwiderstandsklassen unter realen Brandbedingungen beispielsweise

- weder eine gesicherte Aufenthaltsdauer im Gebäude,
- noch eine Zeitdauer bis zum Tragwerkversagen

abrufbar.

Im Weiteren zielt die präskriptive Brandschutzplanung auf die Leistungsfähigkeit von Einzelbauteilen ab, währenddessen das Leistungsvermögen des brandschutztechnischen Gesamtsystems nicht abgefragt wird.

Unbestimmte brandschutztechnisch relevante Zeiträume

Brandschutztechnisch relevante Zeiträume, während denen Leistungskriterien erfüllt werden müssen, werden in den VKF-Brandschutzvorschriften nicht festgelegt und bleiben daher unbekannt.

Fazit

Versuche, leistungsbasierte Ansätze mit den Anforderungen der VKF-Brandschutzvorschriften abzugleichen, gehen stets mit sehr grossen Unsicherheiten einher, und es verbleibt lediglich bei einer vagen Annahme, dass diese den gesellschaftlich vorgegebenen Schutzinteressen entsprechen.

Davon ausgenommen bleibt das die Begrenzung der Brandopferzahl beschreibende Leistungskriterium, wofür ein statistisch gut abgesicherter Akzeptanzwert existiert (in der Schweiz ca. 3-4 Brandtote pro 1 Million Einwohner und Jahr). Dieses Kriterium bildet das in den VKF-Brandschutzvorschriften hinterlegte gesellschaftlich akzeptierte Risiko ab, das jedoch nur mithilfe von probabilistischen Modellen behandelbar wäre. Dabei wäre aber zu beachten, dass die genannte Brandopferzahl hauptsächlich wohnungsähnlichen Gebäudenutzungen zuzuordnen ist, die für ingenieurwissenschaftliche Methoden kaum ein wichtiges Anwendungsfeld darstellen.

Aus den genannten Gründen ist es sinnvoll, einen von der Interpretation der VKF-Brandschutzvorschriften unabhängigen Weg zu wählen und zur Festlegung von Leistungskriterien sich auf von Expertengruppen ermittelte und in Normen, Richtlinien, Fachartikeln, Berichten und Handbüchern publizierte Grössen abzustützen. Wegen des nicht normativen Charakters unterstehen solche Leistungskriterien der behördlichen Genehmigungspflicht.

2.3.6 Gewährleistungsdauer der Leistungskriterien zur Beurteilung der Sicherheit von Personen

Wie lange ab Brandausbruch die Leistungskriterien einzuhalten sind, ist objekt- und nutzungsspezifisch festzulegen. Ohne besondere Beachtung der Reaktionsdauer werden typischerweise für die

- Selbstrettung 5 bis 15 Minuten,
- Fremdrettung 15 bis 30 Minuten,
- Intervention 30 bis 60 Minuten,

angesetzt.

In Erwägung, dass

- die in Kapitel 6.8 erläuterte Reaktionsdauer berücksichtigt werden sollte,
- die Brandentwicklungsdauer als Zeitsumme von Alarmierungsdauer und Hilfsfrist selbst bei Vorhandensein einer Brandmeldeanlage ca. 30 Minuten beträgt (vgl. Kapitel 4.7, Abbildung 16),
- zum Zeitpunkt der Fremdrettung durch die Feuerwehr bei den vorgefundenen Personen der Tod in den allermeisten Fällen (82 %) bereits eingetreten ist, sodass keine Rettungsmassnahmen mehr notwendig sind (vgl. [13], S. 7),
- für die Fremdrettung keine allgemein anerkannten Leistungskriterien existieren,

sollte die Gewährleistungsdauer der Leistungskriterien zur Beurteilung der Sicherheit von Personen im Regelfall auf mindestens 30 Minuten angesetzt werden.

2.3.7 Erfüllungsgrad der Leistungskriterien

Die Leistungskriterien müssen lediglich für den brandfernen Bereich, nicht aber in unmittelbarer Nähe des Brandherdes, eingehalten werden. Die dem brandfernen Bereich zuordenbare Raum- oder Gebäudefläche sollte auf das jeweilige Leistungskriterium bezogen festgelegt werden und den allergrössten Teil der untersuchten Brand- oder Rauchabschnittsfläche umfassen.

3 Verfahren zur Risikobeurteilung

3.1 Grundlagen

3.1.1 Risikoorientierte Brandschutzplanung

Zur risikoorientierten Bewertung der Brandschutzplanung werden neben den deterministischen Ingenieurverfahren zur Führung

- von Brandsicherheitsberechnungen mit den dazu erforderlichen Brandmodellen und
- von Personensicherheitsberechnungen mit den dazu erforderlichen Evakuierungsmodellen

auch probabilistische Verfahren angewandt,

- um vom Brandbeginn ausgehend, den zeitlichen Verlauf von Brandereignissen zu strukturieren und zu bewerten,
- um mögliche Brandszenarien zu entwickeln und, in Abhängigkeit von Eintrittswahrscheinlichkeit und Schadenausmass, daraus das relevante Bemessungsbrandszenarium abzuleiten und
- um Gebäude bzw. Brandschutzkonzepte hinsichtlich ihres brandschutztechnischen Niveaus zu quantifizieren und zu vergleichen.

Das letztgenannte Anwendungsfeld wird, in Ermangelung aussagekräftiger statistischer Daten, in diesem Handbuch nicht thematisiert.

3.1.2 Begriffe

In der Risikobeurteilung werden die Begriffe leider nicht einheitlich verwendet. So hat ein Komitee der in Amerika ansässigen Gesellschaft für Risikoanalysen SRA (Society for Risk Analysis) festgestellt, dass alleine für den Begriff „Risiko“ 17 Definitionen existieren.

Tabelle 3 enthält eine Auswahl von Begriffen mit ihren gängigen Definitionen, die bei Risikobeurteilungen oft aufgeführt werden.

Grundlegende Begriffe zur Risikobeurteilung	
Begriff	**Definition**
Gefahr	Potenzielle Schadenquelle, bei der das Risiko grösser als das Grenzrisiko ist. [1]
Grenzrisiko	Das grösste durch Gesetze und Vorschriften festgelegte und somit nach den geltenden Wertvorstellungen der Gesellschaft noch vertretbare Risiko (Schutzziel). Das Grenzrisiko definiert den Übergang von vertretbarem zu nicht vertretbarem Risiko. [1]
(Eintritts-)Häufigkeit	Absolute Anzahl der (Schaden-)Ereignisse in einem Betrachtungszeitraum.
Restrisiko	Nicht zu verwendender, unwissenschaftlicher Begriff. [2]
Risiko	Produkt aus Eintrittswahrscheinlichkeit (Wahrscheinlichkeit des Eintretens eines Schadens) und Schadenausmass (Schweregrad des Schadens). [1]
Risikoanalyse	Systematische Auswertung verfügbarer Informationen, um Gefährdungen zu identifizieren und ein Risiko nach Eintrittswahrscheinlichkeit und Schadenausmass einzuschätzen.
Risikobewertung	Prozess, der die Ergebnisse der Risikoanalyse mit den Risikokriterien vergleicht, um zu bestimmen, ob das Risiko akzeptierbar ist.
Risikobeurteilung	Gesamtprozess der Risikoermittlung, Risikoanalyse und Risikobewertung, der ein Verständnis für die Risiken, deren Ursachen, Folgen und Wahrscheinlichkeiten vermittelt. [3]
Risikoermittlung	Prozess des Suchens, Erkennens und Aufzeichnens von Risiken.
Risikokriterien	Bezugspunkte, zu denen die Bedeutung eines Risikos für das System bewertet wird.
Sicherheit	Sachlage, bei der das Risiko kleiner als das Grenzrisiko ist. [1]
Szenarium	Ein Ereignis, mehrere Ereignisse oder die Kombination von Ereignissen, die zu einem unerwünschten Schadenausmass führen (können).
Vertretbares (akzeptables) Risiko	Risiko, das nach den geltenden Wertvorstellungen der Gesellschaft akzeptiert wird. [1]
(Eintritts-)Wahrscheinlichkeit	Zu erwartende Eintrittshäufigkeit eines (Schaden-)Ereignisses für beliebige Zeiträume. Der Wertebereich liegt zwischen • 0: Ereignis tritt niemals ein und • 1: Ereignis tritt in jedem Fall ein. Die Wahrscheinlichkeit (Eintrittshäufigkeit) kann sich beziehen auf • eine Zeitdauer (z.B. Jahres-Wahrscheinlichkeit) oder • eine Anzahl von Fällen (Fall-Wahrscheinlichkeit).

Tab. 3: Grundlegende Begriffe zur Risikobeurteilung

Erläuterungen zu Tabelle 3

[1] Beziehung zwischen den Begriffen Risiko, Grenzrisiko, Sicherheit und Gefahr (vgl. Abbildung 5).

[2] Der Begriff „Restrisiko“ ist mehrdeutig und kann für:

- das nach der Umsetzung von Schutzmassnahmen verbleibende Risiko,
- nicht identifizierte Risiken oder
- das bewusst eingegangene Risiko

stehen. Er beinhaltet oft eine subjektive Bewertung und rückt ein statistisch-physikalisches Ereignis verharmlosend in die Nähe des Unmöglichen. [15], S. 10

[3] Schema und Flussdiagramm zum Verfahren der Risikobeurteilung (vgl. Abbildungen 3-4).

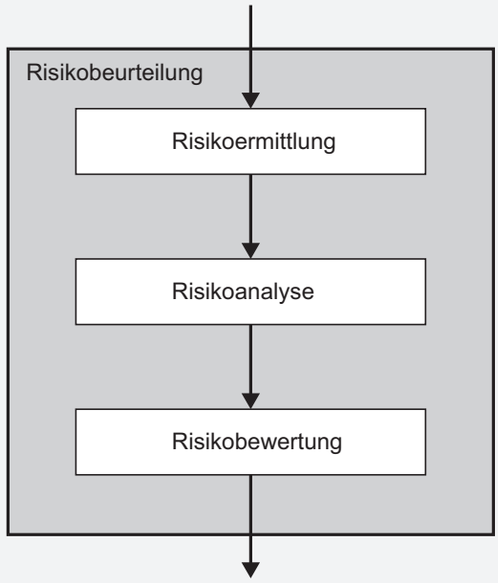


Abb. 3: Schema zur Risikobeurteilung nach DIN EN 31010

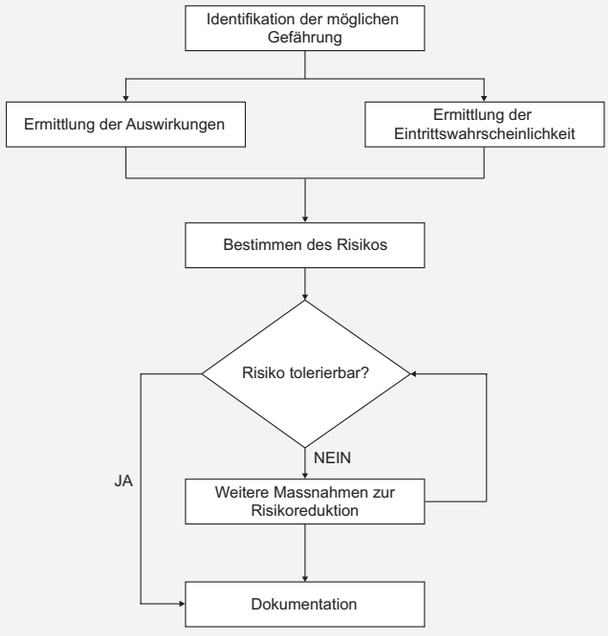


Abb. 4: Flussdiagramm zur Risikobeurteilung

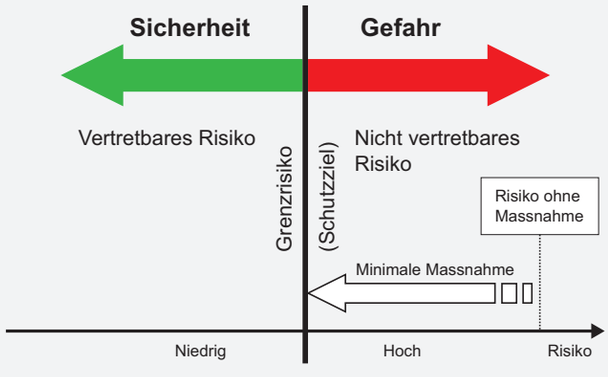


Abb. 5: Beziehung von Risikobegriffen nach ISO/IEC Leitfaden 51

3.1.3 Risikobeurteilung

Die technische Beurteilung von Risiken findet auf den folgenden Gebieten Anwendung:

- Produktsicherheit,
- Produkthaftung,
- wirtschaftlicher Erfolg und Image eines Produkts,
- Arbeitnehmerschutz und Umweltschutz,
- Anlagensicherheit,
- Schutz kritischer Infrastruktur,
- Luft- und Raumfahrt.

Die Fragestellungen des Brandschutzes, des Explosionsschutzes und der durch Freisetzung giftiger Stoffe bedingten Toxizität werden im Rahmen des Fachgebietes Anlagensicherheit behandelt. [16], S. 8, S. 15

Die Risikobeurteilung umfasst den Gesamtprozess

- der Risikoermittlung,
- der Risikoanalyse sowie
- der Risikobewertung

und vermittelt ein Verständnis für die Risiken, deren Ursachen, Folgen und Wahrscheinlichkeiten (vgl. Abbildungen 3-4).

3.1.4 Risikoermittlung

Im Rahmen des vorbeugenden Brandschutzes umfasst der Prozess der Risikoermittlung das Ermitteln und Erkennen der Ursachen und Quellen von Brandereignissen. Dies bezweckt die Eruierung von Geschehnissen und Situationen, durch die Personen-, Sachwert- und Umweltschäden verursacht werden können.

Für die Risikoermittlung existieren unter anderem die folgenden Verfahren:

- vergleichende Verfahren (z.B. Prüflisten, Nachprüfen gemachter Erfahrungen);
- systematische Vorgehensweise in einem Team (bei der eine Gruppe von Fachleuten mithilfe eines strukturierten Satzes von Anregungen oder Fragen Risiken ermittelt);
- induktive Überlegungen (z.B. Gefährdungs- und Betreibbarkeitsuntersuchungen).

Beim Risikoidentifizierungsprozess ist es wichtig, den menschlichen und organisatorischen Einflüssen eine ausreichende Beachtung zu schenken. [17], S. 10

3.1.5 Risikoanalyse

Allgemeines

Die Risikoanalyse bildet die Grundlage für Entscheidungen, ob Risiken behandelt werden müssen, und bezweckt die Entwicklung eines Verständnisses für das Risiko. Sie liefert Hinweise über die am besten geeigneten Behandlungsstrategien und Verfahren und beinhaltet die Betrachtung

- der Risikoursachen,
- der Risikoquellen,
- der Folgen von Risikoursachen und -quellen sowie

- der Wahrscheinlichkeit des Eintretens der Folgen.

Die Faktoren mit Auswirkung auf die Folgen und Wahrscheinlichkeiten sollen ermittelt werden. Die Schadenfolgen und deren Eintrittswahrscheinlichkeiten werden dann kombiniert und bestimmen so das Risikoniveau. [17], S. 11

Verfahren der Risikoanalyse

Zur Analyse von Risiken existieren die folgenden Verfahren:

- **Qualitative** Risikoanalyse: Bewertung der Schadenfolgen, der Eintrittswahrscheinlichkeiten und Risiken mithilfe von Signifikanzniveaus und ohne Zugrundelegung eindeutig definierter Grössen. Dabei werden qualitative Begriffe wie „selten“, „häufig“, „vernachlässigbar“, „katastrophal“, „hoch“, „mittel“, „niedrig“ verwendet.
- **Semiquantitative** Risikoanalyse: Beschreibung der Schadenfolgen und Eintrittswahrscheinlichkeiten unter Verwendung von numerischen Klassifizierungsskalen, die dann kombiniert werden und mittels einer Formel ein Risikoniveau ergeben. Dabei liegen die verwendeten Werte nur als Grössenordnung vor und die Skalen können linear oder logarithmisch sein.
- **Quantitative** Risikoanalyse: Schätzung von aussagekräftigen Zahlenwerten für die Schadenfolgen und Eintrittswahrscheinlichkeiten (wie Schadenausmass in CHF, betroffene Personenzahl, Eintrittshäufigkeit).

Der erforderliche Detaillierungsgrad hängt von der jeweiligen Anwendung und von der Verfügbarkeit zuverlässiger Daten ab. Selbst bei einer vollständigen Quantifizierung ist zu beachten, dass die errechneten Risikoniveaus lediglich Schätzwerte sein können. [17], S. 11

Analyse und Schätzung der Eintrittswahrscheinlichkeit

Üblicherweise werden zur Schätzung der Eintrittswahrscheinlichkeit die folgenden drei allgemeinen Vorgehensweisen verwendet:

- Verwendung vorliegender Erfahrungsdaten von bereits eingetretenen Ereignissen, von denen die Wahrscheinlichkeit ihres zukünftigen Eintretens abgeleitet wird;
- Wahrscheinlichkeitsvorhersagen mithilfe geeigneter Verfahren (z.B. Ereignisbaumanalyse);
- Schätzung der Eintrittswahrscheinlichkeit durch Fachleute im Rahmen eines systematischen und strukturierten Prozesses (z.B. Delphi-Verfahren).

Diese Vorgehensweisen können sowohl einzeln als auch kombiniert angewendet werden. [17], S. 12-13

Vorläufige Analyse

Die Auslese von Risiken bezweckt die Konzentration der vorhandenen Ressourcen auf die wichtigsten Risiken. Risiken können daraufhin ausgesucht werden, das signifikanteste Risiko zu ermitteln oder weniger signifikante oder geringere Risiken von der weiteren Analyse auszuschliessen. Dabei ist das Augenmerk auf den kumulativen Effekt von geringen, jedoch häufig eintretende Risiken zu richten.

Bei der vorläufigen Analyse werden ein oder mehrere der folgenden Vorgehensweisen festgelegt:

- Entscheid, Risiken ohne weitere Beurteilung zu behandeln;
- unbedeutende Risiken, die keine Behandlung rechtfertigen, nicht weiterverfolgen;
- mit einer detaillierteren Risikobeurteilung fortfahren. [17], S. 13

3.1.6 Risikobewertung

Bei der Risikobewertung werden die aus der Risikoanalyse gewonnenen Risikoniveaus mit zuvor definierten Risikokriterien verglichen und beurteilt, ob diese akzeptierbar sind.

Die Risikokriterien ergeben sich unter anderem aus

- Normen, Gesetzen oder Verhaltensgrundsätzen,
- privatwirtschaftlichen Zielen,
- natürlichen und technologischen Gegebenheiten.

Dabei spielen ethische, kulturelle, soziale, politische, rechtliche, finanzielle und andere Erwägungen eine Rolle. [17], S. 14

Üblicherweise werden Risiken in drei Bänder eingeteilt, und zwar in

- ein oberes Band, in dem das Risikoniveau, unabhängig des Nutzens, als nicht akzeptierbar betrachtet wird und in dem eine Risikobehandlung, ohne Rücksicht auf die Kosten, unerlässlich ist;
- ein mittleres Band, in dem versucht wird, das Risikoniveau mit angemessenem Aufwand zu reduzieren (durch Aufwiegen der Kosten und des Nutzens);
- ein unteres Band, in dem das Risikoniveau als vernachlässigbar angesehen wird.

Das in Sicherheitsanwendungen verwendete Kriterium „so gering wie vernünftigerweise praktikabel“ (**a**s **l**ow **a**s **r**easonable **p**racticable, ALARP) folgt dieser Vorgehensweise. [17], S. 14

3.2 Verfahren zur Risikobeurteilung

Tabelle 4 liefert eine Beschreibung der für die Brandschutzplanung prädestinierten Risikobeurteilungsverfahren, und zwar hinsichtlich

- ihres primären Anwendungsbereichs,
- der Vorgehensweise bzw. der erforderlichen Arbeitsschritte und
- der möglichen Einschränkungen.

Verfahren zur Risikobeurteilung in der Brandschutzplanung

	Beschreibung, Anwendung	Darstellung
Brainstorming	**Beschreibung** Unter Verwendung einer besonderen Technik regt eine wirksame Sitzungsmoderation eine Gruppe von sachkundigen Personen dazu an, in einer ungezwungenen Konversation mögliche Ereignisse und damit einhergehende Gefährdungen und Risiken sowie Optionen zur Steuerung und Bewältigung von Risiken zu ermitteln. **Anwendung** Die Anwendung erfolgt für sich alleine zwecks Ermutigung zu phantasievollem Denken oder in Verbindung mit anderen Risikobeurteilungsverfahren, wie z.B. der Ereignisbaumanalyse (qualitative Eruierung von möglichen Szenarien und Ereignisabläufen infolge eines auslösenden Ereignisses).	 Abb. 6: Brainstorming
Strukturierte Befragung	**Beschreibung** Von einem Moderator wird einzelnen, voneinander getrennten Personen ein Satz Fragen gestellt. Der Fragensatz wird so vorbereitet und gestaltet, dass er den Befragten dazu anregt, eine Situation oder Gegebenheit aus einem anderen Blickwinkel zu sehen. Damit hilft der Befragte, Risiken aus seiner Perspektive zu identifizieren. **Anwendung** Bei Schwierigkeiten, eine Personengruppe zu einer Brainstorming-Sitzung zusammenzubringen oder falls ein freier Diskussionsfluss aus der gegebenen Situation heraus nicht zu erwarten ist.	 Abb. 7: Strukturierte Befragung
Delphi-Verfahren	**Beschreibung** Verfahren, um ein verlässliches Einvernehmen (Konsens) einer Expertengruppe zu erhalten. Der Expertengruppe wird ein semistrukturierter Fragebogen zur Beantwortung vorgelegt. Damit deren Meinungen voneinander unabhängig bleiben, treffen sich die Experten nicht. **Anwendung** Bei Erfordernis einer gemeinsamen Expertensicht und eines Konsenses.	
Risikoindizes [1)]	**Beschreibung** Semiquantitatives, gut strukturiertes Verfahren zur Bestimmung eines Risikomasses, das mithilfe von Bewertungspunkten (Risikofaktoren), unter Verwendung von Rangskalen, abgeleitet wird. Die Faktoren können das Risiko positiv (Erhöhung des Sicherheitsniveaus) oder negativ (Abnahme des Sicherheitsniveaus) beeinflussen. **Anwendung** Verfahren zum Bewerten, Klassifizieren und Vergleichen von Risiken.	 Abb. 8: Beispiel eines Indexverfahrens

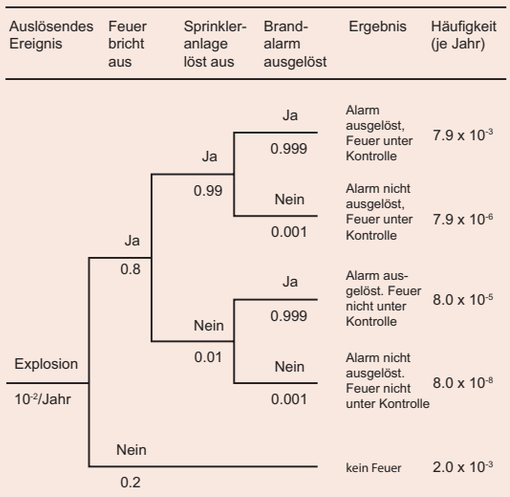
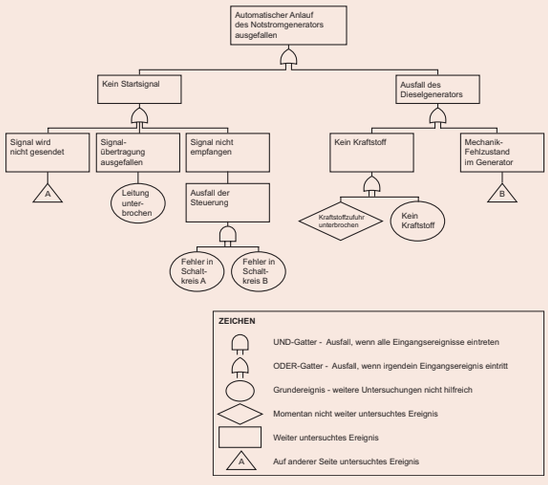
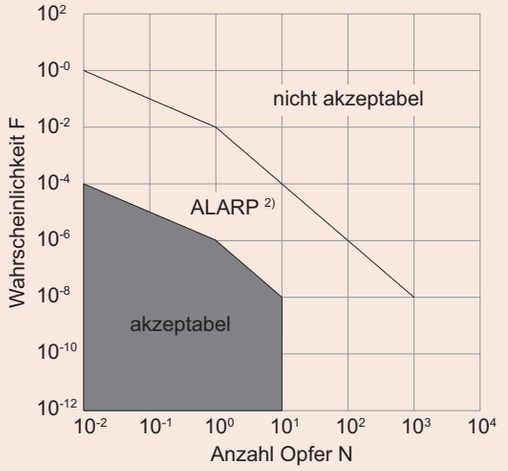
Tab. 4: Verfahren zur Risikobeurteilung in der Brandschutzplanung

Vorgehensweise	Einschränkungen
Ein Brainstorming kann formal oder informal sein. Letzteres ist wenig strukturiert und hat meist einen Ad-hoc-Charakter. Ein formales Brainstorming ist strukturiert und die Teilnehmer werden vorbereitet. Im formalen Prozess • bereitet der Moderator geeignete Stichworte vor, die neue Einfälle und Gedanken auslösen sollen; • werden für die Sitzung Ziele vorgegeben und die Regeln erklärt; • beginnt der Moderator mit einem Gedankengang, und jeder Teilnehmer entwickelt daraus eigene Ideen; • kann der Moderator Teilnehmer auf einen neuen Gedankenweg lenken.	Den Teilnehmern fehlen möglicherweise die Fähigkeit und das Wissen für erfolgreiche Beiträge. Ob der Prozess umfassend war, ist schwierig nachzuweisen. Es kann sich eine besondere Gruppendynamik ergeben, sodass Personen mit wertvollen Ideen schweigen und andere die Diskussion dominieren.

1. Bildung eines relevanten Fragensatzes, der den Fragesteller leitet. Die Fragen sollten
  • eine offene Antwort zulassen,
  • den Befragten nicht führen,
  • einfach sein,
  • sich nur mit einem Thema befassen,
  • in einer für den Befragten angemessenen Sprache abgefasst sein.
2. Vorbereitung möglicher Folgefragen zur Klarstellung.
3. Stellung von Fragen seitens der interviewten Person.
4. Behandlung der Fragen.
	Beträchtlicher Zeitaufwand für den Moderator, wenn dieser mehrfache Meinungen erhalten möchte.
	
	Voreingenommenheit muss toleriert werden, weil die Gruppendiskussion fehlt.
	
	Spontane Einfälle kommen nicht zur Entfaltung.

1. Bildung eines Teams, das den Delphi-Prozess veranlasst und überwacht. 2. Nominierung einer Expertengruppe. 3. Entwicklung eines Fragebogens für die erste Befragungsrunde. 4. Test des Fragebogens. 5. Versand des Fragebogens an die Experten. 6. Analyse und Kombination der Informationen aus der ersten Antwortrunde. 7. Übermittlung der aus Schritt 6 gewonnenen Ergebnisse an die Experten. 8. Analyse und Kombination der Informationen aus der zweiten Antwortrunde. 9. Wiederholung der Schritte 7 und 8, bis ein Konsens vorliegt.	Die Methode ist arbeits- und zeitaufwendig. Die Teilnehmer müssen sich in schriftlicher Form klar und deutlich ausdrücken können.
1. Definition und Beschreibung des zu analysierenden Systems durch eine Gruppe von Experten. 2. Entwicklung von in sich konsistenten, das Risiko positiv oder negativ beeinflussenden Faktoren. 3. Kombination der Risikofaktoren zu einem Schema, das den physikalischen Realitäten des Systems gerecht wird. 4. Anhand des Expertenwissens wird über die Wertigkeit jedes Faktors befunden. 5. Validierung des Verfahrens durch Anwendung auf bekannte Systeme. 6. Allfällige Iterationen.	Zum tatsächlichen Risiko werden keine quantitativen Angaben geliefert, sondern lediglich Relativaussagen im Rahmen von Risikovergleichen. Oft ist das zugrunde liegende Modell mit den Bewertungsfaktoren und deren Verknüpfungen nicht gut genug bekannt. Nicht ausreichend validierte Verfahren können zu bedeutungslosen Ergebnissen führen.

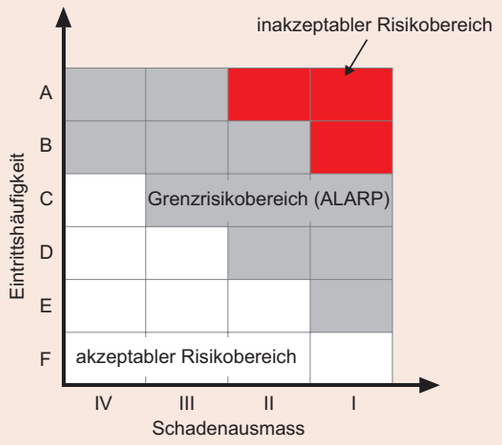
Verfahren zur Risikobeurteilung in der Brandschutzplanung

	Beschreibung, Anwendung	Darstellung
Ereignisbaumanalyse	**Beschreibung** Qualitatives oder quantitatives Verfahren, das den Weg von bekannten Ursachen zu unbekannten Auswirkungen beschreibt (induktive Analyse). Dabei werden, von einem auslösenden Ereignis ausgehend, sich gegenseitig ausschliessende Sequenzen von verschlimmernden oder mildernden Ereignissen dargestellt (entsprechend dem Auffächern eines Baumes mit vollständig voneinander unabhängigen Zweigen). **Anwendung** Verwendung für das Modellieren, Berechnen und Einstufen unterschiedlicher Brandszenarien als Reaktion auf ein auslösendes Brandereignis. Dabei entspricht jeder Ast des Ereignisbaumes einem Brandszenarium.	 Abb. 9: Beispiel eines Ereignisbaumes
Fehlerbaumanalyse	**Beschreibung** Qualitatives oder quantitatives Verfahren, das von bekannten Auswirkungen ausgeht und daraus unbekannte Ursachen ermittelt (deduktive Analyse). Ausgehend vom unerwünschten Ereignis oder Zustand (Hauptereignis) wird eine Baumstruktur entwickelt, in der das Zusammenwirken potenzieller Ursachen (Einzelereignisse) logisch dargestellt wird. **Anwendung** Ermittlung möglicher Ursachen eines unerwünschten Ereignisses oder Ausfalls bzw. der dorthin führenden Pfade (qualitatives Verfahren) sowie Berechnung der Wahrscheinlichkeit für den Eintritt des Hauptereignisses (quantitatives Verfahren).	 Abb. 10: Beispiel eines Fehlerbaumes
FN-Kurven	**Beschreibung** Verfahren zur Darstellung der Wahrscheinlichkeit von Ereignissen (Häufigkeitssumme F), die in einer gegebenen Population ein bestimmtes Schadensniveau verursachen (Anzahl Opfer N). Die Liniendarstellung zeigt quantifizierte Risiken über einen grossen Folgenbereich. **Anwendung** Verfahren zur grafischen Darstellung eines Risikoniveaus und zum Vergleich von Risiken.	 Abb. 11: Beispiel einer FN-Kurve

Tab. 4: Verfahren zur Risikobeurteilung in der Brandschutzplanung

Vorgehensweise	Einschränkungen
Die mit dem auslösenden Ereignis beginnenden Pfade werden wie folgt modelliert: 1. Auswahl eines auslösenden Brandereignisses. 2. Auflistung der vorhandenen Sicherheitssysteme und Funktionen zur Minderung der sich aus den auslösenden Ereignissen ergebenden Folgen (sowohl in technischer als auch in menschlicher Hinsicht). 3. Erstellung eines Diagramms von Linien, wobei für jede Funktion oder jedes System eine Linie gezogen wird, die für Erfolg oder Ausfall steht (Aufbau des Ereignisbaumes). 4. Schätzung/Berechnung einer bedingten Ausfallwahrscheinlichkeit, die jeder Linie zugeordnet werden kann. 5. Berechnung der Ergebnishäufigkeit aus dem Produkt der einzelnen bedingten Wahrscheinlichkeiten und der Häufigkeit des auslösenden Ereignisses.	Es besteht die Gefahr, dass wichtige auslösende Ereignisse übersehen werden. Es können nur Erfolgs- und Fehlzustände behandelt werden. Die Berücksichtigung von verzögerten Erfolgs- und Wiederherstellungsereignissen ist schwierig. Abhängigkeiten können übersehen werden, sodass die Gefahr zu optimistischen Risikoschätzungen besteht.
Die mit dem unerwünschten Ereignis (Hauptereignis) beginnenden Pfade werden wie folgt modelliert: 1. Festlegung des Hauptereignisses. 2. Eruierung von unmittelbaren Ursachen oder Ausfallarten, die zum Hauptereignis führen können. 3. Analyse aller Ursachen oder Ausfallarten, um zu erkennen, wodurch diese veranlasst werden können. 4. Fortsetzung der schrittweisen Ermittlung unerwünschten Betriebsverhaltens bis zu den Grundereignissen (= in der untersten Systemebene untersuchte Ereignisse und ursächliche Faktoren). 5. Zuordnung von Wahrscheinlichkeiten zu den Grundereignissen. 6. Berechnung der Wahrscheinlichkeit des Hauptereignisses, unter Berücksichtigung der Booleschen Algebra.	Sind ursächliche Ereignisse nicht zusammengebunden, so bietet die Erfassung aller wichtigen, zum Hauptereignis führenden Pfade, Schwierigkeiten (z.B. Aufnahme aller möglichen Zündquellen bei einer Analyse mit dem Hauptereignis Brand). Zeitliche Abhängigkeiten sind nicht erfassbar. Es lassen sich nur binäre Zustände (ausgefallen/nicht ausgefallen) erfassen. Menschliches Fehlverhalten oder bedingte Ausfälle sind nur schwer darstellbar.
Auf der Abszisse der Grafik werden die Anzahl Opfer N eingetragen, auf der Ordinate die Wahrscheinlichkeit F von N oder mehr Opfern. Dabei weisen die Opfer ein vorgegebenes Mass an Schädigungen auf oder sie sind möglicherweise auch tot. Bei statistischen FN-Kurven werden wirkliche Daten aus früher gemachten Verlusten konstruiert, bei theoretischen FN-Kurven werden die Daten mithilfe von Simulationsmodellen geschätzt.	FN-Kurven eignen sich nicht zum Vergleich von Risiken unterschiedlicher Art. Über den Bereich oder die Auswirkung von Vorfällen – ausser der Anzahl betroffener Personen – wird keine Aussage gemacht.

Verfahren zur Risikobeurteilung in der Brandschutzplanung

	Beschreibung, Anwendung	Darstellung
Risikomatrix (Folgen-/Wahrscheinlichkeitsmatrix)	**Beschreibung** Verfahren zum Kombinieren qualitativer und semiquantitativer Einstufungen von Folgen (Schadenausmass) und Wahrscheinlichkeit (Eintrittshäufigkeit), um daraus eine Angabe eines Risikoniveaus oder einer Risikoeinstufung abzuleiten. Dabei werden drei Risikoklassen unterschieden: • inakzeptable Risikozone, die eine unbedingte Risikoreduktion erfordert, • Grenz-Risikozone, in der das Risiko angemessen zu reduzieren versucht wird (ALARP-Zone), [2)] • akzeptable Risikozone, die keine Risikoreduktion bedingt. **Anwendung** Verfahren zur Ordnung und Einstufung von Risiken, Risikoquellen oder Risikobehandlungen auf der Grundlage eines Risikoniveaus. Es wird üblicherweise als ein Auswahlwerkzeug eingesetzt, wenn viele Risiken ermittelt worden sind.	 Abb. 12: Beispiel einer Risikomatrix

Tab. 4: Verfahren zur Risikobeurteilung in der Brandschutzplanung

Erläuterungen zu Tabelle 4

[1)] Zur Bewertung von Brandrisiken wurden in den letzten Jahrzehnten die Indexverfahren nach Tabelle 4.1 entwickelt.

Riskoindizes		
Verfahren	**Anwendung**	**Entwickler**
Fire Safety Evaluation System (FSES)	Gebäude für Büros, Laboratorien, Wohnungen	NIST
ISO Specific Commercial Property Evaluation Schedule (SCOPES)	Handelshäuser	ISO
Dow Fire and Explosion Index (FEI)	Prozessplanung, Schadensbeurteilung	Dow Chemical
Expert System Fire Insurance Risk Evaluation (XPS FIRE)	industrielle Gebäude	Münchner Rück
Hierarchical Approach	unterschiedliche Gebäude	University of Edinburgh
Bewertung Brandabschnittsgrössen	industrielle/gewerbliche Bauten	VKF
Fire Risk Assessment Method for Engineering (FRAME)	unterschiedliche Gebäude	De Smet
Fire Risk Index Method (FRIM)	mehrgeschossige Wohngebäude	Lund University

Tab. 4.1: Risikoindizes

Vorgehensweise	Einschränkungen
1. Erstellung einer Beschreibung für die Folgen. 2. Bestimmung der Wahrscheinlichkeit, mit der diese Folgen eintreten (Häufigkeit). 3. Ablesen des Risikoniveaus aus der Matrix. 4. Verknüpfung des Risikoniveaus mit einer Entscheidungsregel (Zuordnung zu Risikoklassen).	Es ist schwierig, die Skalen für Folgen und Häufigkeiten zweifelsfrei zu bestimmen. Die Anwendung des Verfahrens ist sehr subjektiv. Es ist schwierig, das Risikoniveau für unterschiedliche Folgenkategorien zu kombinieren oder zu vergleichen. Die Ergebnisse können vom Detaillierungsgrad der Analyse abhängen.

[2)] Das ALARP-Prinzip besagt, dass Risiken auf ein Mass reduziert werden sollen, das den höchsten Grad an Sicherheit garantiert, der vernünftigerweise praktikabel ist (as low as reasonable practicable).

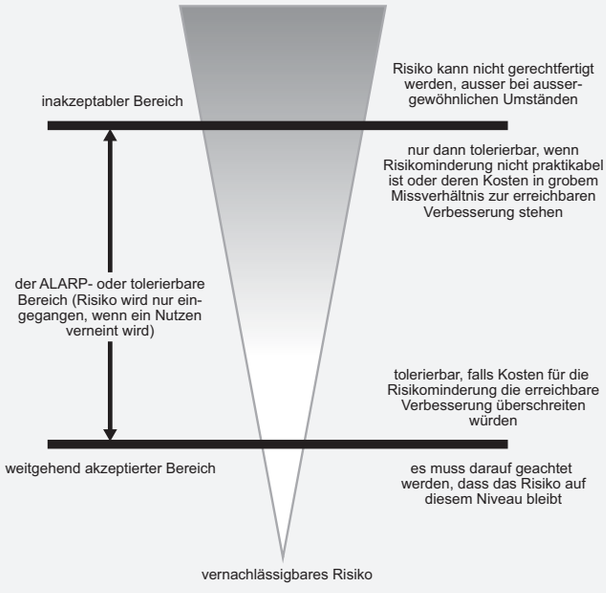


Abb. 13: ALARP-Prinzip

3.3 Auswahl und Vergleich der Verfahren zur Risikobeurteilung

Die Wahl des Risikobeurteilungsverfahrens sollte anhand der folgenden Kriterien erfolgen:

- Zielsetzung der Untersuchung,
- Bedürfnisse der Entscheidungsträger,
- Art und Ausmass der zu analysierenden Risiken,
- potenzielles Ausmass der Folgen,
- benötigtes Expertenwissen,
- Verfügbarkeit von Informationen und Daten,
- behördliche bzw. gesetzliche Forderungen. [17], S. 16

Tabelle 5 vergleicht die für die Brandschutzplanung besonders geeigneten Verfahren zur Risikobeurteilung, und zwar anhand

- einer 1. Klassierung (Spalte „Risikobeurteilungsprozess"), die zeigt, ob und wie gut das entsprechende Verfahren auf die einzelnen Schritte der Risikobeurteilung, bestehend aus
  - der Risikoermittlung,
  - der Risikoanalyse und
  - der Risikobewertung

  anwendbar ist

sowie anhand

- einer 2. Klassierung (Spalte „Attribute"), welche die Merkmale der Verfahren mithilfe der folgenden, die Verfahrensauswahl beeinflussenden Eigenschaften beschreibt:
  - Art und Menge der benötigten Ressourcen hinsichtlich Zeit und Tiefe des Fachwissens sowie betreffend Datenerfordernisse und Kostenaufwand,
  - Komplexität der Anwendung und
  - Möglichkeit der Lieferung quantitativer Ergebnisse. [17], S. 19

Tabelle 5 ist zu entnehmen, dass im Rahmen der Brandschutzplanung

- für die Ermittlung von Risiken die Verfahren „Brainstorming", „strukturierte Befragung", „Delphi" und „Risikomatrix",
- für die Analyse von Risiken
  - einerseits die Ursachen, Zwischenereignisse und Folgen verknüpfenden logischen Bäume „Ereignisbaum" und „Fehlerbaum",
  - andererseits die Verfahren „Risikomatrix", „FN-Kurven" und „Risikoindizes" sowie
- für die Bewertung von Risiken die Verfahren „FN-Kurven" und „Risikoindizes"

sehr geeignet sind.

Vergleich der Verfahren zur Risikobeurteilung in der Brandschutzplanung

Verfahren	Risikobeurteilungsprozess					Attribute		
	Risikoermittlung	Risikoanalyse			Risikobewertung	Ressourcen Fähigkeiten	Komplexität der Anwendung	Quantitative Ergebnisse?
		Folgen	Wahrscheinlichkeit	Risikoniveau				
Brainstorming	SG	NA	NA	NA	NA	1-2	1	N
Strukturierte Befragung	SG	NA	NA	NA	NA	2	1	N
Delphi-Verfahren	SG	NA	NA	NA	NA	2	2	N
Ereignisbaumanalyse	A	SG	A	A	NA	2	2	J
Fehlerbaumanalyse	A	NA	SG	A	A	3	2	J
Risikomatrix	SG	SG	SG	SG	A	2	1	J/N
FN-Kurven	A	SG	SG	A	SG	2	2	J
Risikoindizes	A	SG	SG	A	SG	2	1	J/N

Tab. 5: Vergleich der Verfahren zur Risikobeurteilung in der Brandschutzplanung

Legende zu Tabelle 5

SG	sehr geeignet	1	gering	J	ja
NA	nicht anwendbar	2	mittel	N	nein
A	anwendbar	3	hoch	J/N	semiquantitativ

4 Brandsicherheitsberechnungen

4.1 Brandphasen

Ohne Löscheinwirkung lässt sich ein idealisiert dargestellter Naturbrand in die folgenden Brandphasen unterteilen (vgl. Abbildung 14):

- Entzündung,
- Schwelen,
- Ausbreitung,
- Abklingen.

Tabelle 6 charakterisiert die vier Phasen eines Naturbrandes anhand der folgenden Kriterien:

- typische Werte für die Brandraumtemperatur,
- typische Werte für die spezifische Brandleistung,
- besondere Risiken,
- Definitionsbereich des Bemessungsbrandes,
- Brandverlauf,
- massgebende Schutzinteressen,
- Aktionen von Gebäudenutzern und Einsatzkräften,
- Fristen für Flucht, Rettung und Brandbekämpfung,
- menschliche Reaktionen,
- wichtige Bedingungen in der raucharmen Schicht,
- relevante Elemente des baulichen Brandschutzes,
- relevante Elemente des technischen Brandschutzes.

Zeit- und Temperaturangaben sind als grobe Orientierungswerte zu verstehen und dürfen nicht für brandschutztechnische Bemessungen herangezogen werden.

Phasen eines Naturbrandes

Schema Brandverlauf [1]

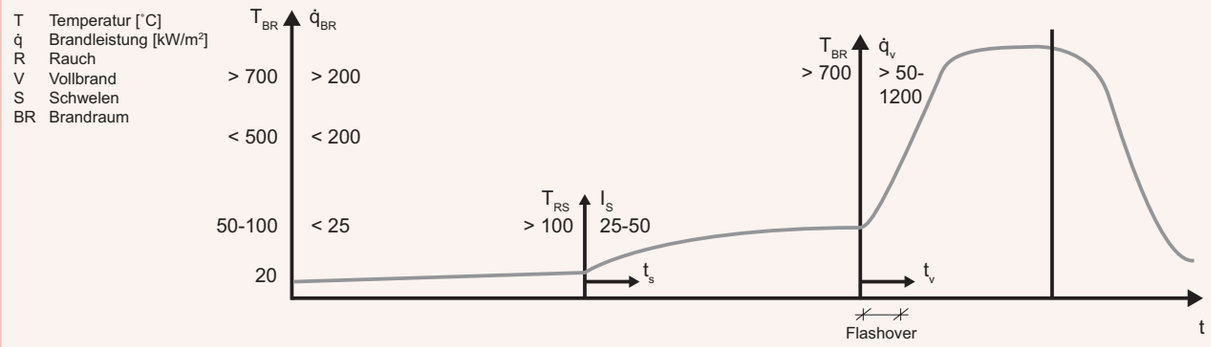


Abb. 14: Verlauf eines Naturbrandes

Kriterium	Brandphasen			
	Entwicklungsbrand		Vollbrand	
	Entzündung	Schwelen	Ausbreitung	Abklingen [2]
Brandraumtemperaturen	Raumtemperatur	≤ 100 °C	100-1200 °C	
Spezifische Brandleistungen	< 25 kW/m²	25-50 kW/m²	50 kW/m² bis mehrere MW/m²	
Besondere Risiken	Entzündbarkeit Entflammbarkeit Abtropfverhalten	Flammenausbreitung Wärmeentwicklung	Brandausbreitung und/oder Verlust des Raumabschlusses und der Tragfähigkeit	
Definitionsbereich des Bemessungsbrandes	„Inkubation“ [3]	Bemessungsbrand		
Brandverlauf	Brandlasterwärmung	brandlastgesteuert	ventilationsgesteuert	brandlastgesteuert
Massgebende Schutzinteressen	Personenschutz		Sachwertschutz	Brandschadensanierung
Aktionen von Gebäudenutzern und Einsatzkräften	Selbstrettung	Fremdrettung	Brandbekämpfung durch Feuerwehr	
Fristen für Flucht, Rettung und Brandbekämpfung [4]	Evakuierungsdauer ≈ ab 5. bis 15. Minute	Fremdrettungsdauer ≈ ab 15. bis 30. Minute	Brandbekämpfungsdauer ≈ ab 30. bis 60. Minute	
Menschliche Reaktionen	Brandverhütung	Brandbekämpfung, Flucht	Bewusstlosigkeit, Tod	
Wichtige Bedingungen in der raucharmen Schicht	Atemluft	Sicht für Personensuche	Sicht und Wärmebelastung für Brandbekämpfung	
Relevante Elemente des baulichen Brandschutzes	Verhalten brennbarer Baustoffe und Waren (Entflammbarkeit)		Verhalten nicht brennbarer Baustoffe, Brandverhalten der Bauteile (Feuerwiderstand)	
Relevante Elemente des technischen Brandschutzes	Brandmeldeanlage	Brandmeldeanlage, Löschanlage, Rauch- und Wärmeabzugsanlage	Rauch- und Wärmeabzugsanlage, Löschanlage	

Tab. 6: Phasen eines Naturbrandes

Erläuterungen zu Tabelle 6

[1] Der in Abbildung 14 dargestellte Verlauf eines Naturbrandes kann sich nur in kleineren oder in mittelgrossen Räumen mit entsprechend hohen Brandlasten ereignen und ohne Vornahme wirkungsvoller Löschmassnahmen.

[2] Im Allgemeinen beginnt das Abklingen, wenn 80 % der Brandlast thermisch umgesetzt sind. [18], S. 11; [19], S. 15

[3] Im Allgemeinen wird die Entzündung numerisch nicht erfasst und ist somit nicht Bestandteil von Brandsimulationen. Vielmehr wird das Brandgeschehen ab der Schwelphase oder sogar erst ab der Ausbreitungsphase betrachtet. Damit wird bei der Anwendung von ingenieurwissenschaftlichen Methoden ein offener Brand angenommen, bei dem der Einfluss der Zündinitiale bereits abgeklungen ist. Die Bewertung der Zündenergie vorhandener Zündinitiale spielt hingegen bei der Auswahl der Brandszenarien und bei der Risikobewertung eine wesentliche Rolle.

[4] Ab Entzündungszeitpunkt (t = 0 min) gerechnete, nicht massstäblich aufgetragene Zeiten, die grobe Orientierungswerte darstellen und objektspezifisch von diesen abweichen können. Es sei auf Kapitel 2.3.6 verwiesen.

4.2 Brandszenarien

Brandszenarien beschreiben sowohl die Charakteristik des Brandverlaufes in Form von zeitabhängigen, spezifischen Parametern (vgl. Kapitel 4.5) als auch die Art und die zeitliche Abfolge von möglichen Ereignissen, die den Brandverlauf und die Ausbreitung von Rauchgasen beeinflussen oder die rückwirkend vom Brandverlauf beeinflusst werden können. Solche Ereignisse stehen im Zusammenhang mit dem Gebäude und der Gebäudenutzung. *[10] [18] [19]*

Jedes einzelne Brandszenarium repräsentiert einen Satz von Brandbedingungen, die ein Gebäude, dessen Nutzer und dessen Inhalt bedrohen können. Es beschreibt sowohl den Status des Gebäudes und der Gebäudenutzung zum Zeitpunkt der Zündung als auch den resultierenden Brand und sollte

- das Gebäude betreffende Einflussgrössen, wie
  - Architektur,
  - tragende Struktur,
  - Lage,
  - Brandschutzmassnahmen,
  - Ventilationsbedingungen,
  - Brandraum,
  - Betrieb,
  - Umgebung;
- die Gebäudenutzung betreffende Einflussgrössen, wie
  - Nutzungstyp,
  - Reaktionsvermögen der Gebäudenutzer,
  - Fluchtvermögen der Gebäudenutzer;
- den Brand betreffende Einflussgrössen, wie
  - Zündquellen,
  - Brandentstehung,
  - Brandlast,
  - Brandphasen,
  - Brandverlauf

bewerten.

Bei einer objektspezifischen Anwendung hängt die Anzahl der zu berücksichtigenden Einflussgrössen von der Komplexität, vom Umfang und von der Tragweite der Fragestellung ab. Unter Umständen lassen sich für einen konkreten Fall standardisierte Brandverläufe oder Bemessungsbrände verwenden, was die Festlegung der Brandszenarien oder Bemessungsbrandszenarien erheblich vereinfacht.

Tabelle 7 zeigt eine Zusammenstellung von möglichen Einflussgrössen und den dazugehörenden Bewertungskriterien, aus denen sich Brandszenarien entwickeln lassen.

Erläuterungen zu Tabelle 7

[1)] Normalerweise beschreibt das Brandszenarium eine brandlastgesteuerte Verbrennung mit ausreichender Sauerstoffzufuhr. Ventilationsgesteuerte Brände sind zu dokumentieren, weil sich die Rauchpotenziale und Schadstoffausbeuten ändern.

[2)] Windrosen geben Auskunft über Hauptwindrichtungen, aufgetretene Windstärken in einem bestimmten Zeitraum und deren Häufigkeitsverteilung.

Die Stärke, Hauptrichtung und Häufigkeitsverteilung der an einem Gebäude wirkenden Winde sind abhängig von der:

- Höhenlage des Standortes (über Meer),
- geografischen Lage des Standortes (Ufer-, Tal-, Kammlage),
- Topografie des umgebenden Geländes (ländliches, städtisches, hügeliges Gebiet).

Lässt der Bautyp von natürlichen Rauch- und Wärmeabzugsgeräten (NRWG) keine negativen Durchflussbeiwerte zu, so muss der Windeinfluss nicht berücksichtigt werden.

[3)] Bei der Auswahl des Brandortes spielen die folgenden Effekte eine Rolle:

- Brände in wandnahen Eckbereichen können zu schlechteren Temperatur- und Rauchgasverhältnissen führen als Brände in Raummitte.
- Die lichte Raumhöhe beeinflusst das abzuführende Rauchgasvolumen, weil mit steigender Aufstiegslänge mehr Raumluft in den Plume eingemischt wird.
- Brände unterhalb von Galeriekanten oder ähnlichen Einbauten bewirken eine Vervielfachung des abzuführenden Rauchgasvolumens, da im Bereich der Überlaufkante eine erhöhte Einmischung von Umgebungsluft stattfindet (Balkon-Überlauf).
- Im Bereich von Zuluftöffnungen liegende Brandherde können die Bildung einer raucharmen Schicht behindern.

[4)] In ca. 95 % aller Brandfälle liegen Mischbrandlasten vor. Deshalb sollten im Rahmen von Baubewilligungen für Brandszenarien und Bemessungsbrände Mischbrandlasten angesetzt werden. [12], S. 76

Entwicklung von Brandszenarien		
Einflussgrössen		**Bewertungskriterien**
Gebäude	**Architektur**	Abmessungen (Flächen, Höhen) Anzahl Ober-/Untergeschosse Grundriss Raumverbindungen Fluchtwege (Anzahl, Lage, Breite, Länge) Hohl- und Zwischenräume (abgehängte Decken, Doppelböden, Schächte etc.) Wand-/Deckenverkleidungen Einrichtungen (Möblierung)
	Tragende Struktur	Tragwerkskonzeption Bauweise (wärmespezifische Materialeigenschaften der Baustoffe) Verstärkungen Verkleidungen, Beschichtungen Belastungen Baulicher Zustand
	Lage	Topografie Parzellengrenzen Gebäudeabstände
	Brandschutzmassnahmen	Brandabschnittsbildung im Gebäude Brandschutztechnische Anlagen (z.B. SPA, BMA, RWA) • Konzeption (Voll-/Teilschutz, Voll-/Teilüberwachung) • anlagentechnische Eigenschaften • Aktivierungsart • Aktivierungsdauer Brandfallsteuerungen Fluchtwegkennzeichnung, Sicherheitsbeleuchtung Alarmierungsanlagen (akustisch, sprachlich) Alarmorganisation
	Ventilationsbedingungen [1)]	Anzahl, Lage von Öffnungen (Fenster, Türen, RWA etc.) Öffnungsflächen Öffnungsbedingungen (zu/offen)
	Brandraum	Geometrie Öffnungen Baustoffe (wärmespezifische Materialeigenschaften)
	Betrieb	Lufttechnische Anlagen Prozesstechnische Anlagen Fördertechnische Anlagen Betriebszeiten

Tab. 7: Entwicklung von Brandszenarien

Entwicklung von Brandszenarien		
Einflussgrössen		**Bewertungskriterien**
Gebäude	**Umgebung**	Wind • Stärke, Richtung • Statistik (Windrosen) [2)] Innen- und Aussentemperaturen • Normalfall: $T_{Innen} = T_{Aussen}$ • Winterfall: $T_{Innen} \geq T_{Aussen}$ • Sommerfall: $T_{Innen} \leq T_{Aussen}$ Luftfeuchtigkeit Geräuschpegel
Gebäude-nutzung	**Nutzungstyp**	Personenbelegung Personenverteilung im Gebäude
	Reaktionsvermögen der Gebäude-nutzer (vgl. Kapitel 6.9, Tabelle 34)	Aufmerksamkeit, Ansprechempfindlichkeit Initiative, Reaktionsfreudigkeit Gebäudekenntnisse Vertrautheit mit der Alarmorganisation Bewusstseinsbildung (Gefahren-, Pflichtbewusstsein) Wahrnehmungs- und Interpretationseffekte, Intuition Physische Fähigkeiten (gesundheitliche Verfassung) Selbsteinschätzung Kultur- und Sprachzugehörigkeit Konkurrierende Aktivitäten und Interessen
	Fluchtvermögen der Gebäude-nutzer (vgl. Kapitel 6.9, Tabelle 34)	Gebäudekenntnisse Intuition Psychischer Zustand der Personen (Nervosität, Geduld, Durchsetzungsvermögen) Soziale Zugehörigkeit (Gruppenbildung) Verhaltensänderungen (Angehörigensuche, Neugierde) Individuelle Bewegungsgeschwindigkeit (Mobilität)
Brand	**Zündquellen** [3)] (Lage des Brandherdes)	Art, Grösse Zündtemperatur Zündenergie Lage • im Gebäude • im Raum (Raummitte, Wand, Ecke) • zu Zonen mit hohen Brandlastdichten
	Brandentstehung (Zeitpunkt t = 0)	Anfänglich entzündete Stoffe/Waren • Aggregatzustand • Oberflächen-Volumen-Verhältnis (Zerteilungsgrad) • Brandleistung (Wärmefreisetzungsrate) Fläche des Brandherdes

Tab. 7: Entwicklung von Brandszenarien

Entwicklung von Brandszenarien		
Einflussgrössen		**Bewertungskriterien**
Brand	**Brandlast**	Brandlastzusammensetzung [4)] Stoffdaten • Heizwert • Verbrennungseffektivität • Abbrandgeschwindigkeit • Brandentwicklungsfaktor • Schadstoffausbeute • Schadstoffmassenstrom Relative Lage zu den zuerst entzündeten Stoffen und Waren Lage im Brandraum (Raummitte, Wand, Ecke) Menge und Flächendichte (Brandbelastung) Verteilung • primäre Brandlasten (durch Zündquelle entfacht) • sekundäre Brandlasten (durch Wärmeleitung, Konvektion und/oder Wärmestrahlung entzündet) • Zonen mit hohen/tiefen Brandbelastungen Anordnung, Lagerart (horizontal/vertikal) Form (Oberflächen-Volumen-Verhältnis)
	Brandphasen (vgl. Kapitel 4.1, Tabelle 6)	Entwicklungsbrand (Entzündung, Schwelen) Vollbrand (Ausbreitung, Abklingen)
	Brandverlauf (vgl. Kapitel 4.5, Tabelle 9)	Zeitlicher Verlauf der Brandleistung Zeitliche Entwicklung der Brandfläche (Brandausbreitungsgeschwindigkeit) Brand-, Rauch- und Schadstoffausbreitung im bzw. ausserhalb des Brandraums Brandübertragung zu benachbarten Gebäuden Flashover Automatische/manuelle Brandbekämpfung erfolgreich/nicht erfolgreich

Tab. 7: Entwicklung von Brandszenarien

Analytische Verfahren zur Entwicklung von Brandszenarien

Grundsätzlich lassen sich die in Kapitel 3 präsentierten Verfahren zur Risikobeurteilung als Werkzeuge zur Entwicklung von Brandszenarien verwenden.

4.3 Bemessungsbrandszenarien

Allgemeines

Um eine Berechnung mit deterministischen Brandmodellen führen zu können, muss die sehr grosse Zahl an denkbaren und möglichen Brandszenarien auf eine handhabbare Menge an Szenarien reduziert werden, die den Zielen der Brandschutzplanung gerecht werden und auf der sicheren Seite liegende Berechnungen ermöglichen.

Das Bemessungsbrandszenarium ist ein theoretisches – aber durchaus mögliches – Szenarium, das eine Vielzahl denkbarer Brandszenarien – etwa 90-95 % aller möglichen Szenarien – auf der sicheren Seite erfasst und somit für die jeweilige brandschutztechnische Problemstellung eine ausreichende Brandsicherheit gewährleistet. „Worst Case"-Fälle, deren Rand- und Anfangsbedingungen sehr unwahrscheinlich sind, müssen nicht berücksichtigt werden. Derartige Szenarien, die das grösste anzunehmende Risiko abdecken, sind Gegenstand von Sicherheitskonzepten und Risikoanalysen; z.B.

- das Versagen von Brandschutzmassnahmen (was bedeutet, dass bei Brandsicherheitsberechnungen das bestimmungsgemässe Funktionieren der brandschutztechnischen Infrastruktur vorausgesetzt wird),
- Grösstbrände,
- Brände mit katastrophalen Auswirkungen (z.B. Brände in Kernkraftwerken),
- Brände als Folge von Erdbeben oder eines Flugzeugabsturzes,
- Sabotage oder terroristische Anschläge,
- Paniksituationen. [5], S. 69; [20], S. 39

Der korrekten systematischen Festlegung von Bemessungsbrandszenarien kommt eine entscheidende Bedeutung zu, weil damit über die Robustheit der Brandschutzmassnahmen und des Brandschutzentwurfs entschieden wird. Bemessungsbrandszenarien grenzen nämlich den Bereich der nicht vertretbaren Risiken vom Bereich der akzeptierten Risiken ab und bestimmen somit das erforderliche Sicherheitsniveau. Deshalb ist es für den Planungsprozess wichtig, dass sich alle Projektbeteiligten in der Wahl der Bemessungsbrandszenarien so früh wie möglich einigen. *[10] [18] [19]*

Entwicklung von Bemessungsbrandszenarien

Der Entwicklung von Bemessungsbrandszenarien sollte in der Regel eine Risikobeurteilung – d.h. ein aus einer Risikoermittlung, einer Risikoanalyse und einer Risikobewertung bestehender Prozess – zugrunde liegen. Während die Risikoermittlung anhand potenzieller Zündquellen, Brandlasten, Brandentwicklungen und weiterer Kriterien die Schadenursachen und -quellen aufzeigt, eruiert die Risikoanalyse die daraus folgenden Schadenausmasse und deren Eintrittswahrscheinlichkeiten.

Grundsätzlich lassen sich Bemessungsbrandszenarien nach den folgenden drei Arten von Ansätzen entwickeln:

- normative Ansätze,
- deterministische Ansätze,
- probabilistische Ansätze.

Entwicklung von Bemessungsbrandszenarien mithilfe normativer Ansätze

In den letzten Jahren haben zahlreiche Nationen ihre präskriptiven bau- und brandschutzrechtlichen Normen mit leistungsorientierten Planungskonzepten ergänzt oder durch solche ersetzt. Einige dieser Vorschriften bieten spezifische Informationen betreffend die Evaluation von Bemessungsbrandszenarien. Diesbezüglich sei beispielsweise auf die amerikanische Norm NFPA 101 „Life Safety Code", die acht mögliche Bemessungsbrandszenarien vorschlägt, verwiesen. *[21] [22]*

Weil die Bedingungen für Brände in hohem Masse von den Besonderheiten eines gegebenen Gebäudes abhängen, sind der Anwendung normativer Ansätze relativ enge Grenzen gesetzt. Zudem liefern leistungsorientierte Normen lediglich eine qualitative Beschreibung der Bemessungsbrandszenarien. Die entsprechenden Planungsziele und Leistungskriterien zur numerischen Bewertung derselben müssen von den Projektbeteiligten selbst entwickelt werden.

Entwicklung von Bemessungsbrandszenarien mithilfe deterministischer Ansätze

Deterministische Ansätze beruhen auf den im vorliegenden Handbuch vorgestellten algebraischen und numerischen Modellen, mit denen die Wirkungen von Brandereignissen prognostiziert werden.

Die Auswirkungen der Brandszenarien werden abgeschätzt und dahingehend überprüft, ob diese die Leistungskriterien erfüllen. Für eine Bemessung kommen nur kritische Szenarien infrage, bei denen die Erfüllung der Leistungskriterien nicht gesichert ist. Eintrittshäufigkeiten werden lediglich im Rahmen einer qualitativen Risikoanalyse abgeschätzt (vgl. Kapitel 3). Die Auswahl sollte eine handhabbare Zahl an hinreichend verschiedenartigen und repräsentativen Brandszenarien umfassen, sodass ein anhand dieser Szenarien bemessenes Brandschutzkonzept auch für alle anderen Szenarien sicher ist (mit Ausnahme von „Worst Case"-Fällen).

Bei der Anwendung deterministischer Ansätze wird angenommen, dass implizite Risiken – z.B. ausfallende Brandschutzanlagen, nicht kalkulierte Brandlasten und Brandleistungen – von den Projektbeteiligten stillschweigend akzeptiert werden. *[10] [19] [23]*

Entwicklung von Bemessungsbrandszenarien mithilfe probabilistischer Ansätze

Probabilistische Ansätze berücksichtigen die Tatsache, dass Brände und das daraus resultierende Schadenausmass mit einer gewissen Eintrittshäufigkeit (Wahrscheinlichkeit) auftreten.

Nach der Festlegung eines umfassenden, auf die Schutz- und Planungsziele bezogenen Satzes an möglichen Brandszenarien werden für jedes einzelne Szenarium oder für eine Gruppe gleichartiger Szenarien die Eintrittshäufigkeit und die Schadenfolge ermittelt, wofür die Verfahren der Risikobeurteilung zur Verfügung stehen. Nach Errechnung und Klassierung der szenarienspezifischen Risiken wird ein Risiko-Ranking durchgeführt. Dieses liefert als Ergebnis die mit dem höchsten relativen Risiko bewerteten und ein von den Projektbeteiligten nicht akzeptiertes Risikoniveau aufweisenden Brandszenarien, die sodann mithilfe einer quantitativen Analyse zu bemessen sind. *[10] [19] [23]*

Für die Zuordnung von Häufigkeiten zu bestimmten Ereig-

nissen stehen prinzipiell die folgenden Datenquellen und Verfahren zur Verfügung:

- Brand-, Feuerwehr- und Versicherungsstatistiken mit Daten z.B. betreffend
  - Brandursachen (Erkennung des wahrscheinlichsten Zündortes und -objektes),
  - Brandlastzusammensetzung,
  - Brandausbreitung (Wahrscheinlichkeit einer Brandausbreitung über den Brandraum hinaus),
  - Häufigkeit von Bränden in bestimmten Gebäuden;
- Statistiken zu Versagenswahrscheinlichkeiten von brandschutztechnischen Bauteilen und Anlagen;
- Brandursachen- und Schadenanalyse mithilfe der Verfahren zur Risikobeurteilung.

Weil aussagekräftige, belastbare statistische Daten nicht zur Verfügung stehen, werden Bemessungsbrandszenarien in der Praxis kaum mithilfe probabilistischer Ansätze entwickelt.

4.4 Systematische Auswahl von Brandszenarien und Bemessungsbrandszenarien

Die nachfolgend in Anlehnung an ISO/TR 13387-2 und ISO/TS 16733 beschriebene Vorgehensweise zur systematischen Auswahl von Brandszenarien und Bemessungsbrandszenarien bezweckt die Eruierung von möglichen Szenarien für quantitative Analysen mit deterministischen Brandmodellen (vgl. Tabelle 8). [18], S. 5-8; [19], S. 6-11

Auswahl von Brandszenarien (Schritte Nr. 1 bis 5)

Brandszenarien können anhand der in Tabelle 7 von Kapitel 4.2 zusammengestellten Einflussgrössen und Bewertungskriterien entwickelt werden. Die vielfältigen Kombinationsmöglichkeiten der zahlreichen Einflussgrössen und Bewertungskriterien führen grundsätzlich zu einer sehr hohen Anzahl Brandszenarien.

Erfolgt die Ermittlung von Brandszenarien auf der Basis von Brandstatistiken und/oder ingenieurmässiger Erfahrung, so lässt sich beispielsweise

- eine Gruppe von Brandszenarien mit hohen Eintrittswahrscheinlichkeiten und minimalen Schadenfolgen und
- eine Gruppe von Brandszenarien mit minimalen Eintrittswahrscheinlichkeiten und hohen Schadenfolgen

bilden.

Festlegung von Bemessungsbrandszenarien (Schritte Nr. 6 bis 8)

Die Festlegung der Bemessungsbrandszenarien kann durch eine Bewertung der mit den Brandszenarien einhergehenden Risiken erfolgen. Die in der Regel qualitativ oder semiquantitativ durchgeführte Risikobewertung berücksichtigt dabei sowohl die Schadenfolgen als auch die Eintrittswahrscheinlichkeiten der Brandszenarien.

Systematische Auswahl von Brandszenarien und Bemessungsbrandszenarien

	Bezeichnung	Massnahmen	Beispiele
Auswahl von Brandszenarien (Risikoermittlung) [1]	**1. Schritt** **Brandraum, Brandort**	Bestimmung des Raumes und des Ortes im Raum, wo ein Brand mit gefährlicher Auswirkung entstehen kann, beispielsweise anhand: • von Brandstatistiken, • ingenieurmässiger Erfahrung, • erfolgter Brandereignisse, • vorhandener Zündquellen, • existierender Brandlasten, • der Präsenz von Personen.	Orte in der Nähe • einer grossen Anzahl gefährdeter Personen, • gefährlicher Güter, • wertvoller Güter, • tragender Bauteile, • von (Not-)Ausgängen. Orte ausserhalb des Wirkungsbereiches technischer Brandschutzanlagen Nebenräume Hohl- und Zwischenräume Schächte
	2. Schritt **Brandart**	Beschreibung • der Initialzündung und • des Anfangsstadiums eines sich entwickelnden, bereits etablierten Brandes. Die Stärke des Entwicklungsbrandes und die Brandausbreitungsgeschwindigkeit werden beispielsweise anhand: • von Brandstatistiken; • ingenieurmässiger Erfahrung; • einer Verknüpfungen von - Zündquelle, - zuerst angefachtem Gegenstand, - nachfolgend angefachter grossflächiger Brandlast; • der Gebäudenutzung bestimmt.	(Bemessungs-)Brandszenarien können entwickelt werden für Brände, die beispielsweise • von einzelnen Objekten, wie Möbelstücken, Einrichtungsgegenständen, Abfalleimern, ausgehen, • zu einer nicht mehr akzeptierbaren Anzahl von Brandopfern führen, • nicht mehr tolerierbare Sachwertschäden bewirken, • sich grossflächig ausdehnen, • ein Gebäude grossräumig verrauchen, • zu einem Bauteil- oder Tragwerkversagen führen, • an Fassaden entstehen.
	3. Schritt **Potenzielle Brandgefahren mit fatalen Folgen**	Bewertung und Identifizierung von speziellen Szenarien mit fatalen Brandfolgen, ohne Berücksichtigung von extremen Ereignissen, wie Brandanschlägen, schweren Explosionen oder Ausfällen von Einrichtungen und Anlagen des baulichen oder technischen Brandschutzes (die im Rahmen besonderer Sicherheitskonzepte zu bearbeiten wären). Gehen solche Brandszenarien mit vergleichbarer Eintrittswahrscheinlichkeit, aber grösserer Schadenfolge einher als die im 2. Schritt identifizierten Szenarien, so sind diese in die Gruppe der zu untersuchenden Szenarien aufzunehmen.	In Schritt 2 nicht berücksichtigte potenzielle Brandgefahren mit fatalen Folgen können sein: • Durchführung brandgefährlicher Arbeiten, wie Schweissen, Schneiden und verwandte Verfahren, • spezielle Gefahren während Bauphasen oder Wartungsarbeiten, • offener Brand in Nähe von leicht entzündlichem Material, • Existenz besonders gefährlicher Brandlast (selbstentzündliche, leicht brennbare, explosive, radioaktive, kanzerogene, gebundenen Sauerstoff enthaltende Stoffe und Waren).

Tab. 8: Systematische Auswahl von Brandszenarien und Bemessungsbrandszenarien

Erläuterung zu Tabelle 8

[1] Die Schritte Nr. 1-5 umfassen die eigentliche Risikoermittlung. Im Rahmen der Risikoermittlung werden Ursachen und Quellen von Personen-, Sachwert- und Umweltschäden verursachenden Brandereignissen ermittelt. Dabei sind auch menschliche und organisatorische Einflüsse zu berücksichtigen.

Jedem Brandszenarium liegt ein Brandereignis zugrunde. Brandszenarien werden entwickelt unter Bewertung von: Gebäude/Raumkonfiguration, Zündquellen, Brandentstehung, Brandherdlage, Brandraum, Brandlast, Ventilationsbedingungen, Brandverlauf, Anlagen des technischen

Systematische Auswahl von Brandszenarien und Bemessungsbrandszenarien			
	Bezeichnung	**Massnahmen**	**Beispiele**
Auswahl von Brandszenarien (Risikoermittlung) [1)]	**4. Schritt** **Bau- und anlagentechnische Einrichtungen und Systeme**	Bauliche oder technische Gebäudekomponenten mit bedeutsamem Einfluss auf den Brandverlauf und/oder auf die Entwicklung unhaltbarer Zustände sind zu spezifizieren. Für die bau- und anlagentechnischen Einrichtungen und Systeme müssen • die Kriterien für deren Aktivierung und • deren Status (offen/zu, ein/aus, vorhanden/nicht vorhanden, funktioniert/versagt) festgelegt werden. Grundsätzlich wird von der uneingeschränkten Wirksamkeit aller Einrichtungen und Anlagen des baulichen oder technischen Brandschutzes ausgegangen.	Szenarien beeinflussende bautechnische Einrichtungen sind beispielsweise: • Öffnungen in den Fassaden (offen/zu), • Brandabschnittsbildung (vorhanden/nicht vorhanden), • Rauchabschnittsbildung (vorhanden/nicht vorhanden), • Tragwerkselemente (funktionieren/versagen). Szenarien beeinflussende anlagentechnische Einrichtungen sind beispielsweise: • SPA, BMA, RWA, ELA (vorhanden/nicht vorhanden), • Brandmeldung (funktioniert/versagt).
	5. Schritt **Verhalten der Gebäudenutzer nach Brandausbruch**	Das Verhalten der Gebäudenutzer nach Brandausbruch und den daraus resultierenden Einfluss auf den Brandverlauf wird untersucht.	Beispielhafte Betrachtungsweisen: • Alarmierung (normal/verzögert), • Reaktion auf einen Alarm (normal/verzögert), • manuelle Brandbekämpfung (erfolgreich/nicht erfolgreich), • Betätigung von (Brandschutz-)Türen (korrekt/nicht korrekt).
Auswahl von Bemessungsbrandszenarien (Risikoanalyse, Risikobewertung)	**6. Schritt** **Risikoanalyse**	Mithilfe statistischer und/oder ingenieurmässiger Überlegungen sind für die in den Schritten Nr. 1-5 entwickelten Brandszenarien die Eintrittswahrscheinlichkeiten und die Schadenfolgen zu quantifizieren. Das relative Risikoniveau für ein mögliches Brandszenarium resultiert aus dem Produkt der Eintrittswahrscheinlichkeit und der Schadenfolge.	Ereignisbaumanalyse Fehlerbaumanalyse Risikomatrix FN-Kurven Risikoindizes
	7. Schritt **Risikobewertung**	Die mithilfe der Risikoanalyse gewonnenen Risikoniveaus werden miteinander verglichen, und für jedes definierte Schutzziel wird das mit dem höchsten relativen Risiko bewertete Brandszenarium identifiziert. Somit können die Brandszenarien nach ihren relativen Risiken klassiert werden.	
	8. Schritt **Auswahl der relevanten Bemessungsbrandszenarien**	Für jedes Planungs- bzw. Schutzziel wird das mit dem höchsten relativen Risiko bewertete Brandszenarium zur quantitativen Analyse ausgewählt, womit dieses zum Bemessungsbrandszenarium wird. Die ausgewählten Bemessungsbrandszenarien sollten die Hauptmengen der Risiken der anderen Brandszenarien abdecken.	

Tab. 8: Systematische Auswahl von Brandszenarien und Bemessungsbrandszenarien

Brandschutzes, Verhalten der Gebäudenutzer, Umwelt, statistischem Datenmaterial (vgl. Kapitel 4.2, Tabelle 7).

Für die Risikoermittlung stehen die folgenden Verfahren zur Verfügung: Brainstorming, strukturierte Befragung, Delphi, Ereignisbaumanalyse, Fehlerbaumanalyse, Risikomatrix, FN-Kurven, Risikoindizes (vgl. Kapitel 3.2, Tabelle 4).

4.5 Brandverläufe

Beschreibung der Brandverlaufskurven

Die Brandverlaufskurven stellen einen wesentlichen Bestandteil der Brandszenarien dar, weil diese die Bewertung der Brandgefahren und der Rauchausbreitung entscheidend beeinflussen. Aufgrund der Vielzahl der zu berücksichtigenden Parameter ist es in der Regel nicht möglich, den zu erwartenden realen Brand theoretisch exakt vorherzubestimmen, weshalb schematisierte Brandverläufe angenommen und vom Nutzer vorgegeben werden müssen.

Zeitabhängige Brandverlaufskurven lassen sich in den folgenden Schritten entwickeln:

1. ingenieurtechnische Approximation des Brandverlaufs und vereinfachte Darstellung desselben durch einzelne Brandphasen,
2. qualitative Beschreibung der unterschiedlichen Brandphasen,
3. quantitative Vorgabe der zeitlichen Entwicklung der Brandleistung (Wärmefreisetzungsrate),
4. quantitative Vorgabe der zeitlichen Entwicklung der Brandfläche. [24], S. 8

Der Darstellung und Charakterisierung von Brandphasen widmet sich Kapitel 4.1.

Die Brandentwicklung bzw. der zeitliche Verlauf der Brandleistung bei einer flammenden Verbrennung sollte unter Berücksichtigung der folgenden brandtechnologischen Grössen festgelegt werden:

- Beschaffenheit der Brandlast (z.B. Zerteilungsgrad, Aggregatzustand, chemische Zusammensetzung),
- räumliche Anordnung der Brandlast (z.B. Lagerungsform, Lagerungsdichte),
- Brandherdlage,
- Brandraumgeometrie,
- Ventilationsbedingungen,
- äussere Wärmestrahlung (z.B. erhitzte Wände, Heissgasschicht).

Für einfache Brandlastanordnungen und spezifische Brandbedingungen sind empirische Daten abrufbar, mit denen sich der zeitliche Verlauf der Brandleistung definieren lässt. Überdies wurden zur Behandlung solcher Spezialfälle auch numerische Flammenausbreitungsmodelle entwickelt. *[18] [19] [23]*

Mindestangaben für die Darstellung von Brandverlaufskurven

Tabelle 9 zeigt die brandtechnologischen Einfluss- und Kenngrössen, die zur Modellierung von Brandverlaufskurven mindestens erforderlich sind, und zwar abhängig davon, ob eine brandschutztechnische Bemessung

- ohne Verbrennungsmodell,
- mit Verbrennungsmodell oder
- mit Verbrennungsmodell und gleichzeitiger Quantifizierung von Brandraucheinflussgrössen

erfolgt.

Weitere brandtechnologische Kenngrössen zur Beschreibung von Brandverläufen können sein:

- Temperatur und
- Flammenhöhe.

Legende zu Tabelle 9

X trifft zu

(X) kann zutreffen

☐ trifft nicht zu (leere Felder)

Erläuterung zu Tabelle 9

[1)] Besonders herausfordernde Brandorte sind solche, welche die Brandentwicklung oder die Leistungsfähigkeit von Brandschutzmassnahmen nachteilig beeinflussen. Sie befinden sich beispielsweise

- in der Nähe von Personen, hohen Wertkonzentrationen oder speziell exponierten Tragwerkselementen,
- auf bedeutsamen Verkehrswegen,
- in Ecken oder umwandeten Raumbereichen, wo eine ungewöhnlich schnelle Brandentwicklung möglich ist,
- innerhalb von nicht überwachten oder nicht von Löschanlagen geschützten Räumen oder Raumbereichen,
- neben Raumöffnungen, die eine Brandausbreitung begünstigen,
- unterhalb von an Atrien angrenzenden Balkonen/Galerien.

Mindestangaben für die Darstellung von Brandverlaufskurven

Brandtechnologische Einfluss- und Kenngrösse	Bemessung		
	Ohne Verbrennungsmodell	Mit Verbrennungsmodell	Mit Verbrennungsmodell und Quantifizierung von Brandrauch-Einflussgrössen
Brandherdlage [1)] • horizontale Lage (Raummitte, Eckbereich, Wandbereich) • vertikale Lage • Abstand zu Zuluftöffnungen	X	X	X
Brandherdform/Räumliche Anordnung der Brandlast • horizontale Lagerung (Flächenbrand) • vertikale Lagerung (Regalbrand) • Fahrzeugbrand	X	X	X
Zeitlicher Verlauf der Brandleistung • konvektiv • radiativ • spezifisch	X	X	X
Zeitliche Entwicklung der Brandfläche	X	X	X
Beschaffenheit der Brandlast • chemische Zusammensetzung • Aggregatzustand • Zerteilungsgrad (Oberflächen-Volumen-Verhältnis)		X	X
Heizwert		X	X
Verbrennungseffektivität • Ventilationsbedingungen • Lagerungsdichte		X	X
Flächenspezifische Abbrandrate (fallweise)		(X)	(X)
Schadstoffausbeute, Schadstoffmassenstrom			X
Massenspezifischer Extinktionskoeffizient			X
Parameter für Erkennungsweite (von Fluchtwegpiktogrammen)			X

Tab. 9: Mindestangaben für die Darstellung von Brandverlaufskurven

4.6 Bemessungsbrände

Allgemeines

Ein nach Kapitel 4.5 charakterisierter Brandverlauf wird zum Bemessungsbrand, falls dieser der Brandschutzbemessung zugrunde gelegt wird. Typischerweise ist dies der grösste Brand, der sich hinsichtlich Ausdehnung und produzierter Wärmeleistung bis zum Einsetzen wirksamer Löschmassnahmen entwickeln kann.

Der für den Einzelfall festzulegende Bemessungsbrand soll

- auf das jeweilige Schutz- und Planungsziel abgestimmt sein, was bedeutet, dass für mehrere Schutz- bzw. Planungsziele auch mehrere Bemessungsbrände erzeugt werden müssen;
- ein abdeckendes Brandereignis simulieren, wobei „Worst Case"-Fälle, deren Auftreten extrem unwahrscheinlich sind – also etwa 5-10 % aller vorstellbaren Brandverläufe – nicht zu berücksichtigen sind; [20], S. 39-42
- den Bereich der nicht vertretbaren Risiken vom Bereich der akzeptierten Risiken abgrenzen und somit massgeblich zur Erzielung des erforderlichen Sicherheitsniveaus beitragen;
- die Anforderungen bzw. Annahmen des zugrunde liegenden Bemessungsbrandszenariums erfüllen (vgl. Kapitel 4.3).

Entwicklung von Bemessungsbränden

Aufgrund der sehr umfangreichen, komplexen, meist unbekannten und nicht vorhersagbaren Reaktionsmechanismen kann der Verbrennungsprozess bei Brand- und Rauchsimulationen in der Regel nicht modelliert werden. Daher wird bei der Modellierung des eigentlichen Brandes der folgende Weg eingeschlagen:

1. Das Brandprodukt „Leistung" wird vom Nutzer anhand allgemein anerkannter Modellansätze vorgegeben. In der Regel wird der dem Bemessungsbrandszenarium zugeordnete Bemessungsbrand in Form des zeitlichen Verlaufs der Wärmefreisetzungs- oder Abbrandrate, in Kombination mit den als konstant angenommenen Brennstoffparametern, beschrieben.
2. Die stofflichen Brandprodukte resultieren aus einer allgemeinen Reaktionsgleichung, bei der sich der Brennstoff in die geläufigsten Brandprodukte umwandelt. Die dabei entstehenden Mengen ergeben sich aus experimentell bestimmten Werten, den sogenannten Ausbeuten oder Entstehungsraten (Yields), wobei die Erhaltung der Spezies beachtet wird.

Alternativ können aber auch – ohne im Weiteren darauf einzugehen – vereinfachte Reaktionsschemata in Form von Einschritt-Reaktionen von Brennstoff und Luft zu den Reaktionsprodukten verwendet werden, bei denen die Brandleistung nicht vorgegeben werden muss (z.B. Mixture Fraction Combustion Model von FDS).

Ausserdem wird bei der Modellierung von Bränden mit Kohlenwasserstoffflammen angenommen, dass von der gesamten Brandleistung $\dot{Q}$ 70-80 % konvektiv in die Heissgasschicht eingetragen und entsprechend 20-30 % durch Strahlung abgegeben werden:

$$0.7 \cdot \dot{Q} \leq \dot{Q}_{konv} \leq 0.8 \cdot \dot{Q}$$

Bei besonders stark russenden Flammen wird der Abminderungsfaktor kleiner, bei schwach leuchtenden Flammen hingegen grösser sein. [24], S. 27; [25], S. 12; [26], S. 23; [27], S. 29; [28], S. 21; [29], S. 25; [30], S. 9; [31], S. 12-13; [32], S. 24

Methoden und Modelle

Zur Entwicklung von Bemessungsbränden existieren verschiedene Methoden und Modelle, die in Kapitel 5 dargestellt werden.

4.7 Wirkungen von Massnahmen des technischen und abwehrenden Brandschutzes auf den Brandverlauf

Massnahmen des technischen und abwehrenden Brandschutzes, wie Brandmeldeanlage (BMA), Sprinkleranlage (SPA), Rauch- und Wärmeabzugsanlage (RWA) sowie der Löscheinsatz der Feuerwehr (FW), beeinflussen den Brandverlauf und bewirken im Wesentlichen eine

- Verminderung der Temperaturbeanspruchung des Bauwerkes (SPA, RWA, FW);
- Begrenzung der Brandausbreitung (SPA, FW);
- Verringerung der insgesamt freigesetzten Rauchgasmengen (BMA, SPA, FW);
- Verkleinerung der Rauchgasschichtdicke (RWA);
- Reduktion der maximalen Brandleistung (SPA, FW);
- Erhöhung der maximalen Brandleistung (RWA).

Es sei auf Tabelle 10 verwiesen.

Erläuterungen zu Tabelle 10

[1)] Der zeitliche Verlauf der Brandleistung bzw. das Maximum derselben wird – nebst automatischen Löschanlagen – bestimmt durch (vgl. Abbildung 15)

- die Ventilationsverhältnisse oder
- eine Brandlastbegrenzung.

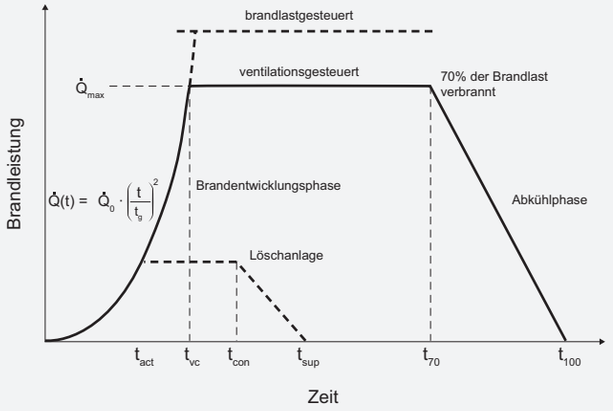


Abb. 15: Zeitlicher Verlauf der Brandleistung bei Begrenzung durch Brandlast, Ventilation oder Sprinkleranlage

[2] Bei geringen Brandleistungen und ungünstigen Raumverhältnissen besteht die Gefahr, dass die Sprinkler nicht auslösen. Demnach weisen Brandmelder gegenüber Sprinklern hinsichtlich der Selbstrettung in der Regel entscheidende Zeitvorteile auf.

[3] Das Modell von Evans geht davon aus, dass sich Brandlasten ebenso gut löschen lassen wie Holzkrippen. Zudem werden Besonderheiten aus dem aufeinanderfolgenden Auslösen mehrerer Sprinkler nicht berücksichtigt, sodass seine Anwendung auf Brandszenarien mit langsamer bis mittlerer Brandentwicklung beschränkt sein sollte. [33], S. 4/87

[4] Die Erstellung von belastbaren Modellen zur realitätsnahen Ermittlung von Sprinklerauslösezeiten und Brandleistungen mithilfe von CFD-Simulationen ist aus den folgenden Gründen ausgesprochen schwierig:

- Eine auch nur geringfügig geänderte Lageranordnung und/oder Materialzusammensetzung des Brandgutes verändert das Auslöseverhalten von Sprinklern, womit das massgeblich zu simulierende Szenarium schwer zu ermitteln ist. Darüber hinaus sind Art und Anordnung der Brandlast im Planungsstadium meistens unbekannt.
- Mit der Brandmodellierung werden scheinbar identische Brandszenarien idealisiert. Hingegen ist bei solchen Szenarien die Dynamik der Brände in der Regel nicht identisch (z.B. wegen brandbedingter Veränderung der Brandoberfläche durch umstürzendes Brandgut), was das Auslöseverhalten von Sprinklern massgeblich beeinflusst.
- Ausgelöste Sprinkler beeinflussen das Auslöseverhalten von (noch) nicht ausgelösten Sprinklern.
- Anwendungsbedingt besitzen Sprinkler unterschiedliche Sprühbilder (Normal-, Schirm-, Seitenwand-, Flachschirmsprinkler). Eine allgemeingültige Betrachtung für alle Düsenarten und ein einfaches Übertragen von Ergebnissen eines Düsentyps auf einen anderen sind nicht möglich.
- Die räumliche Bewegung, die Massen- und Volumenänderung, das Schwarmverhalten und der Wärmeaustausch von Wassertropfen im Einflussbereich der Brandthermik sind schwer modellierbar, womit eine zuverlässige Vorhersage der Löschwirksamkeit von Sprinkleranlagen kaum möglich ist.
- Die Vorbenetzung des Brandgutes beeinflusst den Brandverlauf, ist aber kaum exakt abbildbar. [34]

Grundsätzlich besteht die Gefahr, dass mit der Annahme modellierungsfreundlicher Anfangs- und Randbedingungen, wie z.B. kompakte Brandlastanordnungen mit sich nicht verändernden Oberflächen, nicht repräsentative Sprinklerauslösezeiten ermittelt werden.

Zeitverlauf eines Feuerwehreinsatzes
(Beispiel mit maximaler Anwesenheits- und Erkundungsverzögerung)

Ereignis	Zeitbedarf [min] Σ	Zeitbedarf [min] Δ	Aktivität	Quelle
			Löscheinsatz	
Beginn Löschangriff [2]	28	5	Erkundung und Bereitstellung der Brandbekämpfung [4]	
Feuerwehr am Brandort	23	10	Ausrücken der Feuerwehr (= Ausrückzeit in überwiegend dicht besiedeltem Gebiet) [3]	[197], S. 20
Alarmierung Feuerwehr [1]	13	3	Alarmweiterleitung durch die Alarmempfangsstelle (Aufgebotszeit)	[197], S. 19
Externe Alarmierung	10	5	Erkundung (Erkundungsverzögerung)	[145] Ziff. 2.4.2
	5	3	Bestätigung der Anwesenheit (Anwesenheitsverzögerung)	[145] Ziff. 2.4.2
Interne Alarmierung	2	2	Detektion durch Brandmeldeanlage (Aktivierungsdauer)	[24], S. 15
Entzündung				

Abb. 16: Zeitverlauf eines Feuerwehreinsatzes

Erläuterungen zu Abbildung 16

[1] Alarmierungsdauer der Löschkräfte = Zeitspanne zwischen Brandausbruch (Entzündung) und Alarmierung der Löschkräfte (⟷).

[2] Brandentwicklungsdauer = Zeitspanne zwischen Brandausbruch (Entzündung) und Beginn der Löscharbeiten = Alarmierungsdauer + Hilfsfrist (⟷ + ⟷).

Hilfsfrist = Zeitspanne zwischen der Alarmierung der Feuerwehr und dem Beginn der Löscharbeiten (⟷).

[3] In überwiegend dünn besiedeltem Gebiet beträgt die Ausrückzeit 15 Minuten. [197], S. 20

[4] Geschätzte durchschnittliche Zeitdauer.

Wirkungen von Massnahmen des technischen und abwehrenden Brandschutzes auf den		
	Wirkung	**Aktivierungsart, Aktivierungsdauer**
Brandmeldeanlage	Brandmeldeanlagen beeinflussen das Brandgeschehen mit den folgenden Effekten: • Verkürzung der Alarmierungsdauer bzw. Brandentwicklungsdauer mit Auswirkungen auf - den für die Bemessung anzunehmenden Gesamtenergiegehalt der Brandleistungskurve, - die Temperaturentwicklung, - die insgesamt freigesetzte Rauchgasmenge. • Reduktion des Maximalwertes der Brandleistung bei entsprechend kleiner Brandausbreitungsgeschwindigkeit.	**Aktivierungsart** Die Aktivierung von Brandmeldeanlagen basiert auf einem Schwellenwert für Rauchkonzentration und/oder Temperatur. **Aktivierungsdauer** Die Zeitspanne zwischen Brandausbruch und Alarmierung (Alarmierungsdauer) ist in Abhängigkeit • der Brandentwicklung, • der Gebäudegeometrie, • der Brandlastart, • des Überwachungsumfangs, • des Brandmeldertyps konservativ abzuschätzen. Die Aktivierungsdauer einer richtlinienkonformen, auf die Kenngrösse Rauch reagierenden automatischen Brandmeldeanlage wird auf 2 Minuten veranschlagt. [24], S. 15; [35], S. 4/26; [36], S. 48
Sprinkleranlage	Sprinkleranlagen beeinflussen das Brandgeschehen mit den folgenden Effekten: • Reduktion der Brandleistung, [1)] • Begrenzung der Brandausbreitung, • Abkühlung des Deckenbereichs über dem Brandherd, • Verwirbelung des Rauchs in der Umgebung des Brandherdes (in niedrigeren Räumen bis in den Bodenbereich).	**Aktivierungsart** Die Aktivierung von Sprinkleranlagen basiert auf einem Schwellenwert für Temperatur. [2)] **Aktivierungsdauer** Um die Wirkung der Sprinkler auf den Brandverlauf zu quantifizieren, müssen die Sprinklerauslösezeiten in Abhängigkeit • der Umgebungsbedingungen, wie - Rauchgastemperatur, - Strömungsgeschwindigkeit der Rauchgase, - Rohrtemperatur; • der Sprinklerkennwerte, wie - Trägheitsindex RTI (Response Time Index), - Wärmeleitfähigkeitsfaktor C, - Nennauslöse- bzw. Ansprechtemperatur; • des Brandverlaufs (Brandintensitätskoeffizient); • des vertikalen Abstandes zwischen Brandfläche und Decke (Raumhöhe); • des Sprinklerabstandes von der Plume-Achse bestimmt werden. Für Brände mit mittlerem Brandintensitätskoeffizient (α = 0.012 kW/s^2), in maximal 10 m hohen Räumen, ist die Aktivierungsdauer von Sprinklern mit einer Ansprechtemperatur von weniger als 80 °C und einem RTI-Wert von maximal 80 m$^{0.5}$·s$^{0.5}$ geringer als 11 Minuten. [24], S. 17-24 Schnell ansprechende Sprinkler (RTI = 27 m$^{0.5}$·s$^{0.5}$) mit kleiner Ansprechtemperatur (57 °C) werden unter schnell anlaufenden Bränden (α = 0.047 kW/s^2), in maximal 6 m hohen Räumen, in weniger als 3 Minuten aktiviert. [24], S. 21

Tab. 10: Wirkungen von Massnahmen des technischen und abwehrenden Brandschutzes auf den Brandverlauf

Brandverlauf

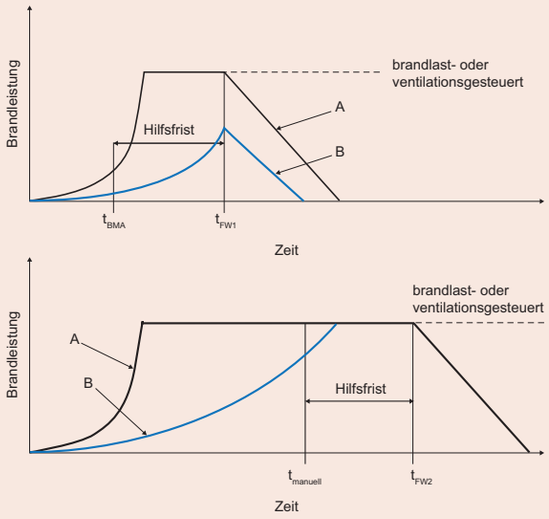


Abb. 17: Einfluss von Brandmeldeanlagen auf den zeitlichen Verlauf der Brandleistung bei hoher (Kurve A) und bei geringer (Kurve B) Brandausbreitungsgeschwindigkeit

t_{FW1}	Zeitspanne bis zum Start der Brandbekämpfung mit automatischen Brandmeldern
t_{FW2}	Zeitspanne bis zum Start der Brandbekämpfung ohne automatische Brandmelder
t_{BMA}	Alarmierungsdauer mit automatischen Brandmeldern
$t_{manuell}$	Zeitdauer manuelle Alarmierung

Modell nach Madrzykowski und Vettori (NISTIR 4833 bzw. Ansatz nach VDI 6019 Blatt 1) *[24] [37]*

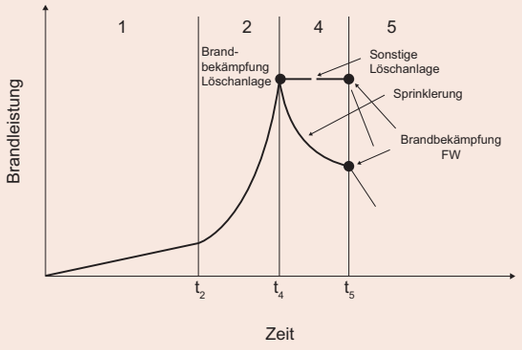


Abb. 18: Durch automatische Löschanlage kontrollierte Brandphase nach VDI 6019 Blatt 1 (Phase 4)

Zeitlicher Verlauf der Brandleistung (Brandphase 4):

$$\dot{Q}(\tau_4) = \dot{Q}(t_4) \cdot \exp(-0.0023 \cdot \tau_4) \qquad t_4 < \tau_4 \leq t_5$$

$$A(\tau_4) = A(t_4) = \text{konst.}$$

$\dot{Q}$	Brandleistung [kW]
t_4	Zeitpunkt vor Beginn der Phase 4 [s]
τ_4	Zeitvariable in der Phase 4, wobei $\tau_4 = t - t_4$ und $t_4 < \tau_4 \leq t_5$ [s]
t	globale Zeitvariable [s]
A	Brandfläche [m^2]

Modell nach Evans (NISTIR 5254) *[38]* [3)]

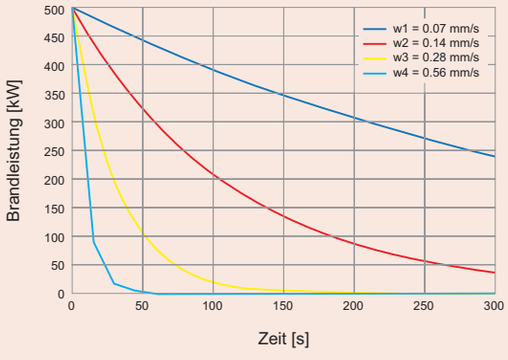


Abb. 19: Einfluss von Sprinklern auf die Brandleistung in Abhängigkeit der Wasserbeaufschlagung und der Löschdauer (mit $\dot{Q}(t_{act}) = 500$ kW und $w \geq 0.07$ mm/s)

Zeitlicher Verlauf der Brandleistung:

$$\dot{Q}(t) = \dot{Q}(t_{act}) \cdot \exp\left[-(t - t_{act}) / (3.0 \cdot w^{-1.85})\right] \qquad t \geq t_{act}$$

$\dot{Q}(t)$	Brandleistung unter Sprinklerschutz [kW]
$\dot{Q}(t_{act})$	Brandleistung beim Öffnen der ersten Sprinklerdüse t_{act} [kW]
w	spezifische Wasserbeaufschlagung [mm/s]
t_{act}	Auslösezeit des ersten Sprinklers (ab Brandbeginn) [s]
t	Zeit seit Brandbeginn [s]

Wirkungen von Massnahmen des technischen und abwehrenden Brandschutzes auf den		
	Wirkung	**Aktivierungsart, Aktivierungsdauer**
Sprinkleranlage	siehe oben	**Sprinklerauslösezeit** Für die Ermittlung der Sprinklerauslösezeit bestehen die folgenden Möglichkeiten: • tabellarische Methode: z.B. VDI 6019 Blatt 1, Tabellen 5-8 [24]; • algebraische Methode: empirische Relationen und Algorithmen (z.B. nach [39]); • numerische Methode: Abbildung der im Innern von Sprinklern (Sprinklerkennwerte) und ausserhalb davon (Umgebungsbedingungen, Brandszenarien) vorhandenen physikalischen Zustände und ablaufenden Vorgänge mit CFD-Brandsimulationsmodellen. [4)]
RWA	Rauch- und Wärmeabzugsanlagen beeinflussen das Brandgeschehen mit den folgenden Effekten: • Verringerung der thermischen Beanspruchung auf das Tragwerk, • Erhöhung der maximalen Brandleistung eines ventilationsgesteuerten Brandes durch die bessere Sauerstoffversorgung, • Verringerung der Rauchgasschichtdicke.	**Aktivierungsart** Die Aktivierung von RWA basiert auf einem Schwellenwert für Rauchkonzentration oder Temperatur. **Aktivierungsdauer** Von der Aktivierungsart abhängend, richtet sich die Aktivierungszeit nach derjenigen der Brandmelde- oder der Sprinkleranlagen. Zur Aktivierungsdauer der Brandmelde- oder Sprinkleranlage müssen die Anlaufzeiten sämtlicher Komponenten der RWA addiert werden.
Löscheinsatz der Feuerwehr	Massgebend für den Einfluss der Feuerwehr auf den zeitlichen Verlauf der Brandleistung sind: • der Zeitpunkt des Beginns der Löscharbeiten, • die Brandfläche zum Zeitpunkt des Beginns der Löscharbeiten, • die Zeitdauer bis zur effektiven Brandkontrolle.	**Aktivierungsart** Der Löscheinsatz der Feuerwehr wird durch • eine Personenmeldung, • die Alarmübermittlung einer Brandmeldeanlage, • die Alarmübermittlung einer Sprinkleranlage eingeleitet. **Aktivierungsdauer** Die Aufnahme der aktiven Brandbekämpfung hängt von der Art der Alarmierung ab. Abbildung 16 stellt den Zeitbedarf für die Brandentwicklungsdauer (= Alarmierungsdauer + Hilfsfrist) dar, falls der Brand durch eine Brandmeldeanlage detektiert wird.

Tab. 10: Wirkungen von Massnahmen des technischen und abwehrenden Brandschutzes auf den Brandverlauf

Brandverlauf

Modell nach Hosser, Dobbernack, Siegfried *[40]*

Die Brandleistung läuft nach Auslösen der Sprinkler (t_{act}) noch 5 Minuten konstant weiter (t_{con}) und nimmt dann in den nächsten 25 Minuten linear bis auf Null ab (t_{sup}). [20], S. 229-230

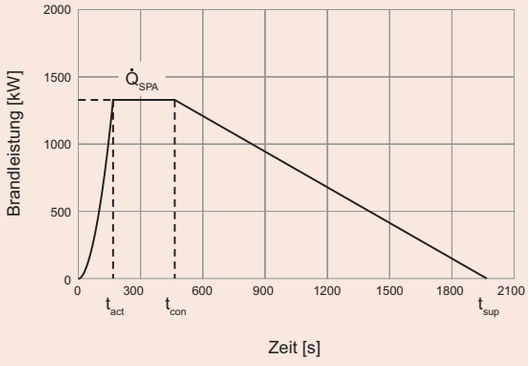


Abb. 20: Beispielhafter Brandleistungsverlauf bei Einsatz einer Sprinkleranlage

Zeitlicher Verlauf der Brandleistung:

0-t_{act}	$\dot{Q} = \dot{Q}_0 \cdot (t/t_\alpha)^2$
t_{act}-t_{con}	$\dot{Q} = \dot{Q}_{SPA}$
t_{con}-t_{sup}	$\dot{Q}(t) = [\dot{Q}_{SPA} / (t_{sup} - t_{con})] \cdot (t_{sup} - t)$

$\dot{Q}_0$	Referenz-Brandleistung (vgl. Tabelle 20, αt^2-Modell) [kW]
$\dot{Q}_{SPA}$	Maximum der Brandleistung im Sprinkler kontrollierten Fall [kW]
t_{act}	Sprinklerauslösezeit [s]
t_{con}	Zeitpunkt des Beginns der Brandkontrolle durch die Sprinkleranlage [s]
t_{sup}	Zeitpunkt der Brandeindämmung [s]

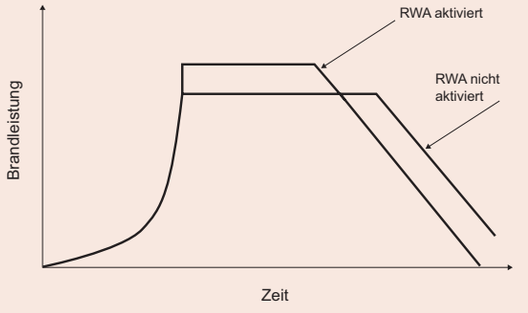


Abb. 21: Einfluss von Rauch- und Wärmeabzugsanlagen auf die Brandleistung bei einem ventilationsgesteuerten Brand

Es wird konservativ und rechentechnisch vereinfacht angenommen, dass die Brandleistung nach Beginn der Löscharbeiten noch für eine Dauer von 5 Minuten konstant verläuft und anschliessend linear abklingt. [20], S. 237

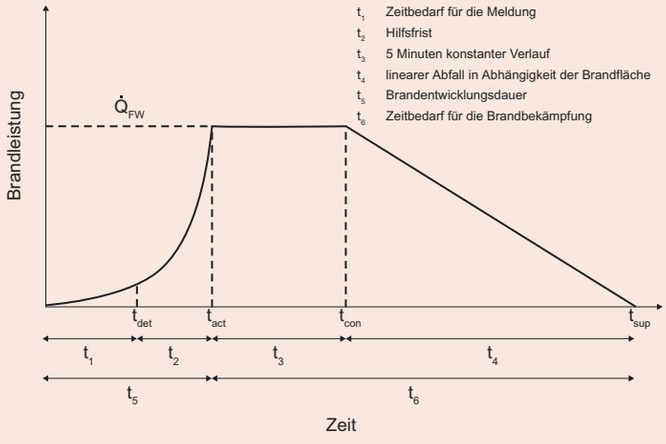


Abb. 22: Zeitlicher Verlauf der Brandleistung bei Einsatz einer Feuerwehr (qualitativ)

Zeitlicher Verlauf der Brandleistung:

0-t_{act}	$\dot{Q} = \dot{Q}_0 \cdot (t/t_\alpha)^2$
t_{act}-t_{con}	$\dot{Q} = \dot{Q}_{FW}$
t_{con}-t_{sup}	$\dot{Q} = [\dot{Q}_{FW} / (t_{sup} - t_{con})] \cdot (t_{sup} - t)$

$\dot{Q}_0$	Referenz-Brandleistung (vgl. Tabelle 20, αt^2-Modell) [kW]
$\dot{Q}_{FW}$	Maximum der Brandleistung zum Zeitpunkt des Beginns der Löscharbeiten [kW]
t_{act}	Zeitpunkt des Beginns der Löscharbeiten [s]
t_{con}	Zeitpunkt des Beginns der Brandkontrolle durch die Feuerwehr [s]
t_{sup}	Zeitpunkt der Brandeindämmung [s]

Die Neigung des abklingenden Astes hängt von der maximal auftretenden Brandfläche ab. Expertenaussagen führen zu den folgenden Grenzwerten: [20], S. 237

$\dot{Q} \leq 20$ MW	$t_4 = 30$ min
20 MW $< \dot{Q} \leq 50$ MW	$t_4 = 45$ min
$\dot{Q} > 50$ MW	$t_4 = 60$ min

4.8 Kenngrössen und Bestimmungsgleichungen zur Quantifizierung des Brandverlaufs

Zur Quantifizierung des Brandverlaufs werden die in Tabelle 11 dargestellten Kenngrössen und Bestimmungsgleichungen benötigt.

Neben

- den Symbolen,
- den Masseinheiten und
- den Beziehungen zu anderen Kenngrössen

enthält die Tabelle, falls existent, den Kenngrössen zugeordnete

- typische Werte oder Wertebereiche sowie
- Angaben zur Literatur, die auf die Nutzung, Waren, Stoffe oder die Lagerung bezogene Tabellenwerke enthalten.

Bedeutung der Kenngrössen

Brandfläche

Die Brandfläche bestimmt massgebend die vom Brand produzierte Rauchgasmenge.

Brandumfang

Der Brandumfang bestimmt – zusammen mit der effektiven Aufstiegshöhe der Rauchgassäule – massgebend die durch Lufteinmischung in die aufsteigenden Rauchgase verursachte Rauchgasmenge.

Brandlast

Wärmemenge, die bei vollständiger Verbrennung aller brennbaren Stoffe in einem bestimmten Bereich frei werden könnte (= Summe der Masse aller brennbaren Stoffe m_i, multipliziert mit deren Heizwerte $H_{u,i}$).

Brandbelastung, spezifische Brandlast

Flächenbezogene Brandlast (Kenngrösse für die im Brandfall freigesetzte Wärmemenge).

Brandleistung, Wärmefreisetzungsrate

Wärmemenge (konvektiver und strahlender Anteil), die bei der Verbrennung eines Materials pro Zeiteinheit frei wird. Die Brandleistung beziffert, in welcher Menge und wie schnell ein brennendes Material seine Energie freisetzt und ist somit der wichtigste Parameter zur Beschreibung der Brandentwicklung und Brandausbreitung bzw. zur Charakterisierung der Feuergefährlichkeit des Materials.

Die Brandleistung lässt sich nicht alleine aus den Materialeigenschaften (z.B. Heizwert) ableiten, sondern hängt auch von der Form und Verteilung des Brennstoffes, von den thermischen Bedingungen der Umgebung, von der Luftzufuhr, vom Verdampfungsprozess und von der Verbrennungseffektivität der brennbaren Dämpfe ab. Im Regelfall kann aus der Brandleistung die Entstehung von Rauch- und Schadstoffpartikel abgeleitet werden.

Spezifische Brandleistung, spezifische Wärmefreisetzungsrate

Auf die Brandfläche bezogene Brandleistung.

Kenngrössen und Bestimmungsgleichungen zur Q

Kenngrösse	Symbol
Brandfläche	A
Brandumfang	U
Brandlast	Q
Brandbelastung, spezifische Brandlast	q
Brandleistung, Wärmefreisetzungsrate	$\dot{Q}$
Spezifische Brandleistung, spezifische Wärmefreisetzungsrate	$\dot{q}$
Heizwert	H_u
Effektiver Heizwert	H_{eff}
Verbrennungseffektivität	χ
Mindestluftbedarf [7)]	L_{min}
Luftbedarf	L
Luftverhältniszahl, Luftüberschusszahl	λ
Horizontale Brandausbreitungsgeschwindigkeit	v_{aus}

Tab. 11: Kenngrössen und Bestimmungsgleichungen zur Quantifizierung des Brandve

r Quantifizierung des Brandverlaufs

Einheiten	Beziehungen	Werte [1]	Literatur	
m^2	$A = \dot{Q} / \dot{q}$			*[26] [27] [30] [45]*
m				*[26] [27] [30] [45]*
kJ kWh	$Q = \Sigma m_i \cdot H_{u,i}$		Waren (Möbel)	*[25] [31]*
kJ/m^2 MJ/m^2 kWh/m^2			Nutzungen Lagerung	*[20] [41] [46] [48] [49]* *[46] [48] [49]*
W kW	$\dot{Q} = \dot{q} \cdot A$ $\dot{Q} = \dot{m} \cdot H_{eff}$ $\dot{Q} = \dot{m} \cdot \chi \cdot H_u$	(vgl. Tabelle 23)	Nutzungen Waren Stoffe Lagerung	*[20]* *[20] [25] [31] [49] [50] [51]* *[25] [50] [51]* *[20] [31] [49] [51]*
kW/m^2 $kJ/(m^2 \cdot h)$	$\dot{q} = \dot{Q} / A$		Nutzungen Waren Stoffe Lagerung	*[20]* *[20] [31] [49] [52]* *[31] [49] [51] [52]* *[20] [25] [31] [51]*
MJ/kg kJ/g kWh/kg		17.3 MJ/kg [2]	Waren Stoffe	*[46] [52] [53] [54]* *[11] [25] [31] [46] [49] [52] [53] [54] [55] [56] [57]*
MJ/kg kJ/g kWh/kg	$H_{eff} = \chi \cdot H_u$ $H_{eff} = \dot{Q} / \dot{m}$	15.0 kJ/g [3]	Feststoffe Flüssigkeiten Gase	*[32] [56] [58]* *[56] [58]* *[58]*
	$\chi = H_{eff} / H_u \leq 1$	0.40-0.90 [4] 0.80-0.95 [5] 0.70 [6]		*[41] [42] [43] [44]*
$kg_{Luft}/kg_{Brennstoff}$	$L_{min} = m_{Lmin} / m_{Brennstoff}$ $L_{min} = O_{min} / 0.232$			
$kg_{Luft}/kg_{Brennstoff}$	$L = m_{Leff} / m_{Brennstoff}$		Feststoffe Flüssigkeiten Gase	*[49] [55]* *[49] [55]* *[49] [55]*
	$\lambda = L / L_{min}$ $\lambda = m_{Leff} / m_{Lmin}$			
m/min		0.3-1.0 m/min [8]	Waren Feststoffe Flüssigkeiten Gase	*[5] [49] [55]* *[5] [49] [55]* *[5] [14] [49] [55]* *[5] [14] [49] [55]*

ndverlaufs

Heizwert

Auf die Brennstoffmenge bezogene Energie, die bei vollständiger Verbrennung bei konstantem Druck frei wird, wenn die Verbrennungsprodukte auf die Bezugstemperatur zurückgekühlt werden, der Wasserdampf jedoch dampfförmig gedacht bleibt.

Der Heizwert H_u – früher auch unterer Heizwert genannt – unterscheidet sich vom Brennwert H_o – früher auch oberer Heizwert genannt – durch die fehlende Kondensationsenthalpie des Wassers, weil es bei der Bestimmung von H_u nicht zu einer Kondensation des in den Rauchgasen enthaltenen Wasserdampfes kommt.

Effektiver Heizwert

Produkt aus dem Heizwert H_u und der Verbrennungseffektivität χ bzw. Quotient aus Brandleistung und Abbrandrate.

Verbrennungseffektivität

Die Verbrennungseffektivität χ gibt den Anteil der bei der Verbrennung freisetzbaren Wärmemenge an, der maximal bei 1 liegen kann.

Mindestluftbedarf

Theoretisch zur stöchiometrischen Verbrennung erforderliche, auf die Brennstoffmenge bezogene Menge an trockener Luft, die sich aus dem Mindestsauerstoffbedarf und dem in trockener Luft vorhandenen Sauerstoffanteil errechnet.

Luftbedarf

Effektiv zur vollständigen Verbrennung erforderliche, auf die Brennstoffmenge bezogene Menge an trockener Luft.

Luftverhältniszahl, Luftüberschusszahl

Verhältnis der einer Verbrennung effektiv zugeführten Luftmenge m_{Leff} zur für eine stöchiometrische Verbrennung theoretisch erforderlichen Luftmenge m_{Lmin}.

Horizontale Brandausbreitungsgeschwindigkeit

Kenngrösse für die Berechnung der zeitabhängigen Brandfläche.

Abbrandrate, Massenverlustrate, Abbrandgeschwindigkeit

Massenverlust des Brandguts durch Verbrennung während einer bestimmten Zeiteinheit als Quotient aus Brandleistung und effektivem Heizwert (pro Zeiteinheit umgesetzte Brandlast, welche die Energiefreisetzung bewirkt).

Flächenspezifische Abbrandrate

Auf die Brandfläche bezogene Abbrandrate.

Brandentwicklungsfaktor, Brandintensitätskoeffizient

Kenngrösse zur Ermittlung der Energiefreisetzung während der Brandentwicklungsphase.

Flammpunkt

Tiefste Temperatur, bei der sich, nach vorschriftsgemässem Erwärmen einer Probe, über dem Stoff genug Dampf entwickelt, um mit der umgebenden Luft ein Gemisch zu bilden, das sich beim Annähern einer Flamme kurzzeitig entzündet. Literaturwerte für Flammpunkte gelten allgemein für einen Luftdruck von 1013 mbar.

Kenngrössen und Bestimmungsgleichungen zur C

Kenngrösse	Symbol
Abbrandrate, Massenverlustrate, Abbrandgeschwindigkeit	$\dot{m}$
Flächenspezifische Abbrandrate, flächenspezifische Abbrandgeschwindigkeit	v_{ab}
Brandentwicklungsfaktor, Brandintensitätskoeffizient	α
Flammpunkt	
Zündtemperatur ohne Pilotflamme, Selbstentzündungstemperatur	
Zündtemperatur mit Pilotflamme	
Mindestzündenergie	

Tab. 11: Kenngrössen und Bestimmungsgleichungen zur Quantifizierung des Brandve

Zündtemperatur ohne Pilotflamme, Selbstentzündungstemperatur

Tiefste Temperatur, auf die man einen brennbaren Stoff oder eine Kontaktoberfläche erhitzen muss, damit ein sich von selbst entzündendes Dampf- bzw. Gas-Luft-Gemisch entsteht. Literaturwerte für Zündtemperaturen gelten allgemein für einen Luftdruck von 1013 mbar.

Die Zündtemperatur korreliert nicht mit dem Flammpunkt. Sie ist vielmehr ein Mass für die Oxidationsempfindlichkeit eines brennbaren Stoffs.

Zündtemperatur mit Pilotflamme

Tiefste Temperatur, auf die man einen Stoff oder eine Kontaktoberfläche erhitzen muss, damit ein Dampf- bzw. Gas-Luft-Gemisch entsteht, das sich in Gegenwart einer Pilotflamme – wie z.B. einer Gasflamme, einem elektrischen Funken oder einem glühenden Draht – entzündet.

Mindestzündenergie

Energiemenge, durch die ein brennbarer Stoff gerade noch entzündet werden kann. Definitionsgemäss ist unter der Mindestzündenergie die kleinste Energiemenge eines Kondensator-Entladungsfunkens zu verstehen, die das zündwilligste Gemisch von Gasen, Dämpfen, Nebeln oder Stäuben mit Luft gerade noch entzünden kann. Für eine Zündung und anschliessend selbständig ablaufende Reaktion müssen brennbare feste und flüssige Stoffe zuerst in

r Quantifizierung des Brandverlaufs

	Einheiten	Beziehungen	Werte [1]	Literatur	
	g/s kg/min kg/h	$\dot{m} = \dot{Q} / H_{eff}$	150 kg/h [9]	Waren (Möbel)	*[25] [31] [44] [58]*
	kg/(s·m²) kg/(min·m²) kg/(h·m²)	$v_{ab} = \dot{m} / A$	47 kg/(h·m²) [10]	Feststoffe Flüssigkeiten Gase	*[5] [14] [49] [51] [55] [56] [58]* *[5] [14] [25] [49] [51] [55] [56] [58]* *[14]*
	kJ/s³ kW/s²			Nutzungen Einrichtungen Waren Lager	*[25] [59] [60] [61]* *[25] [60]* *[25] [31] [60] [62]* *[25] [31] [60]*
	°C K			Flüssigkeiten Gase	*[14] [53] [63]* *[14] [53] [63]*
	°C K			Flüssigkeiten Gase	*[53] [63]* *[63]*
	°C K			Feststoffe Flüssigkeiten Gase	*[14] [49] [55]* *[14] [49] [55]* *[14]*
	kW/m²			Feststoffe Gase, Dämpfe	*[49] [55]* *[14]*

nd verlaufs

die gasförmige Phase überführt werden. Folglich ist die Mindestzündenergie bei Gas- bzw. Dampf-Luft-Gemischen sehr niedrig, in Verbindung mit Feststoffen in der Regel wesentlich grösser. [14], S. 66

In der Praxis ist zur Beurteilung der Zündgefahr neben der Zündtemperatur auch die Mindestzündenergie zu berücksichtigen.

Erläuterungen zu Tabelle 11

[1] Typische Werte. Fallspezifisch können andere oder differenziertere Werte massgebend sein!

[2] Im Hochbau in der Regel zu verwendender Wert für Holz. [41], S. 20

[3] Den Normen DIN 18232-2 und DIN 18232-5 zugrunde liegender Wert für Holz, der den Feuchtegehalt und die unvollständige Verbrennung berücksichtigt. [26], S. 25; [27], S. 30

[4] Gilt für die meisten Kohlenwasserstoffe. [42], S. 2

[5] In der Regel anzusetzender Wertebereich für nicht halogenhaltige Brandlasten. [43], S. 322

[6] Im Hochbau anzunehmender Wert für Mischbrandlasten. [41], S. 20

[7] Für den (Mindest-)Sauerstoffbedarf zur Verbrennung fester und flüssiger Stoffe gilt die folgende theoretische Beziehung:

$O_{min} = 2.664 \cdot c + 7.937 \cdot k + 0.998 \cdot s - o$ in $kg_{O2}/kg_{Brennstoff}$

c: Kohlenstoffanteil in $kg_C/kg_{Brennstoff}$

k: Wasserstoffanteil in $kg_{H2}/kg_{Brennstoff}$

s: Schwefelanteil in $kg_S/kg_{Brennstoff}$

o: Sauerstoffanteil in $kg_{O2}/kg_{Brennstoff}$

[8] Typische Werte für Brandausbreitungsgeschwindigkeiten in grossen Industriehallen. Bei Grossbränden – z.B. Brand der Fordwerke in Köln – wurden anhand der Auslösung von Sprinklergruppen mittlere Ausbreitungsgeschwindigkeiten von knapp 1 m/min im vollentwickelten Brand beobachtet. Ansonsten sind betreffend Brandausbreitungsgeschwindigkeiten die praktischen Erfahrungen gering. [5], S. 123

[9] Gilt für einen Holzkrippenstapel. [44], S. 100

[10] Gilt für Tannenholz. [14], S. 558

4.9 Kenngrössen zur Quantifizierung der thermischen Eigenschaften von Stoffen

Zur Quantifizierung der thermischen Eigenschaften von Stoffen werden die in Tabelle 12 dargestellten Kenngrössen benötigt.

Kenngrössen zur Quantifizierung der thermischen Eigenschaften von Stoffen

Kenngrösse	Symbol	Einheit	Beziehung	Literatur
Wärmeleitfähigkeitskoeffizient	λ	W/(m·K)		Vgl. Tabellenwerke der Physik, Chemie und Wärmelehre (Wärme- und Stoffübertragung)
Wärmeübergangskoeffizient	α	W/(m²·K)		
Wärmedurchgangskoeffizient	U	W/(m²·K)		
Emissionskoeffizient	ε			
Dichte	δ	kg/m³		
Spezifische Wärmekapazität (bei konstantem Druck)	c_p	J/(kg·K)		
Wärmeeindringzahl	b	J/(m²·K·s$^{1/2}$) kg/(K·s$^{5/2}$)	$b = (\lambda \cdot \delta \cdot c_p)^{1/2}$	
Temperaturleitzahl, Temperaturleitfähigkeit	a	m²/s	$a = \lambda / (\delta \cdot c_p)$	
Schmelztemperatur	t_m	K, °C		
Spezifische Schmelzwärme (Schmelzenthalpie)	Δh_m	J/kg		

Tab. 12: Kenngrössen zur Quantifizierung der thermischen Eigenschaften von Stoffen

Bedeutung der Kenngrössen

Wärmeleitfähigkeitskoeffizient

Energie, die je Zeiteinheit bei 1 m Wandstärke durch eine 1 m² grosse Fläche geleitet wird, wenn sich die Temperaturen der Wandseiten um 1 K unterscheiden (Proportionalitätsfaktor des 1. Fourierschen Gesetzes).

Wärmeübergangskoeffizient

Proportionalitätsfaktor, der die Intensität der Wärmeübertragung zwischen einem strömenden Stoff (Fluid) und einem Festkörper bestimmt. α hängt in komplizierter Weise von sehr verschiedenen Einflussgrössen ab, die durch die physikalischen Eigenschaften und den Strömungszustand des Fluids sowie durch die Geometrie der Oberflächen des Festkörpers festgelegt werden.

Wärmedurchgangskoeffizient

Proportionalitätsfaktor, der die Intensität der Wärmeübertragung zwischen zwei durch eine Wand getrennte Fluide bestimmt.

Emissionskoeffizient

Proportionalitätsfaktor, der angibt, wie viel Strahlung ein Körper im Vergleich zu einem idealen Wärmestrahler (schwarzer Körper) abgibt.

Spezifische Wärmekapazität

Diejenige Wärmemenge, die bei konstantem Druck einem Stoff pro kg zugeführt werden muss, um seine Temperatur um 1 K zu erhöhen. Dabei darf sich der Aggregatzustand des Stoffes nicht ändern.

Wärmeeindringzahl

Mass dafür, wie schnell ein Material, Wärme aufzunehmen, zu speichern oder abzugeben vermag (Proportionalitätsfaktor für die pro Zeiteinheit übertragene Wärmemenge beim Berühren zweier Körper unterschiedlicher Temperatur).

Temperaturleitzahl, Temperaturleitfähigkeit

Mass für die zeitliche Änderung der räumlichen Temperaturverteilung in einem Material durch Wärmeleitung als Folge eines Temperaturgefälles.

Spezifische Schmelzwärme

Wärmemenge, die erforderlich ist, um 1 kg eines festen Stoffes bei konstantem Druck und damit konstanter Temperatur zu verflüssigen.

5 Brandmodelle

5.1 Typen von Brandmodellen

Brandphänomene können mithilfe mathematischer oder physikalischer Modelle dargestellt werden. Der Brand selbst ist nicht modellierbar (mit Ausnahme von wenigen akademischen Spezialfällen).

Mathematische Brandmodelle

Mathematische Brandmodelle beschreiben die auftretenden Phänomene anhand von massgebenden Parametern mithilfe eines Systems von Gleichungen. Sie werden in

- deterministische Modelle und
- probabilistische Modelle

unterteilt.

Für ein geschlossenes physikalisches System lässt sich mit deterministischen Modellen der Systemzustand für einen beliebigen Zeitpunkt voraus- oder zurückrechnen, falls dieser zu einem bestimmten Zeitpunkt vollständig bekannt ist. Deterministische Modelle setzen voraus, dass alle Ereignisse durch Vorbedingungen eindeutig festgelegt sind. Probabilistische Modelle ermöglichen hingegen keine solche Vorherbestimmung, sondern lediglich wahrscheinliche Aussagen über zukünftige Zustände bzw. Ereignisse.

Mathematisch deterministische Brandmodelle

Die mathematisch deterministischen Brandsimulationsmodelle werden folgenden drei Gruppen zugeordnet:

- den empirischen Ansätzen,
- den Zonenmodellen,
- den Feldmodellen (Computational Fluid Dynamics, CFD).

Dabei zählen die empirischen Ansätze zu den algebraischen, die Zonen- und Feldmodelle zu den numerischen Modellen.

Die Wahl des angemessenen Rechenverfahrens hängt von den benötigten Aussagen und der geforderten Genauigkeit ab.

Mathematisch probabilistische Brandmodelle

Die probabilistischen Brandmodelle beschreiben Brände als eine Folge von Ereignissen. Die Brandentwicklung wird auf der Basis von Wahrscheinlichkeiten für das Auftreten bestimmter Ereignisse simuliert. Die Wahrscheinlichkeiten lassen sich aus statistischen Auswertungen von Beobachtungen oder aus Versuchsergebnissen (Zuverlässigkeitsanalysen) ermitteln.

In Ermangelung aussagekräftiger statistischer Daten werden rein probabilistische Modelle im Brandschutzingenieurwesen (noch) kaum benutzt.

Physikalische Brandmodelle

Mit physikalischen Brandmodellen werden reale Situationen, unter Berücksichtigung von Skalierungen und Ähnlichkeitsgesetzen, in verkleinertem Massstab nachgebaut.

5.2 Analyse von Brandphänomenen mit mathematisch deterministischen Brandmodellen

Grundsätzlich sind für die Analyse von Brandphänomenen mithilfe der algebraischen und numerischen Methode und für die Auswahl hierfür geeigneter mathematisch deterministischer Brandmodelle die folgenden Tätigkeiten erforderlich:

- Beschreibung der zu untersuchenden Brandphänomene und der diesen Phänomenen zugrunde liegenden Physik;
- Definition der mit der Analyse zu erreichenden Ziele und der hierfür erforderlichen Kenngrössen;
- Erstellung eines Ressourcenplanes mit Feststellung der verfügbaren Rechenkapazität, der geschätzten Anzahl Rechenläufe, der Dauer eines Rechenlaufes, der Zeitvorgaben und der notwendigen Ergebnisgenauigkeit;
- Überprüfung, ob der erforderliche Eingabedatensatz, der Anwendungsbereich und die Anwendungsgrenzen des infrage kommenden Brandmodells der Problemstellung angemessen sind;
- Erstellung eines geometrischen Modells (Pre-Processing);
- Spezifikation der Anfangs- und Randbedingungen (Pre-Processing);
- Auswahl von geeigneten physikalischen und numerischen Submodellen;
- Festlegung der Konvergenzkriterien;
- Durchführung der Simulation (Solving);
- Darstellung der Simulationsergebnisse (Post-Processing);
- Beurteilung der Simulationsergebnisse.

Es sei empfohlen, das einfachste, die Anforderungen einer konkreten Anwendung gerade noch erfüllende Modell auszuwählen, wodurch sich die Ermittlung von Unsicherheiten und Fehlern bei den Ergebnissen eher bewältigen lässt.

5.3 Charakterisierung der mathematisch deterministischen Brandmodelle

In Tabelle 13 werden die Gruppen von mathematischen deterministischen Brandmodellen nach den folgenden Kriterien beschrieben, die ihre charakteristischen Eigenschaften und Leistungsgrenzen aufzeigen und differenzieren:

- Modellansatz,
- Gleichungssystem, das dem entsprechenden Modell zugrunde liegt,
- Strategie zur Lösung des Gleichungssystems,
- Submodelle,
- modellierbare Raumgeometrien,
- Modellierungsaufwand,
- Vorbehalte für die Anwendung,
- Aussagekraft der Ergebnisse,
- Aufwand für Rechenläufe, Parameter- und Sensitivitätsanalysen,
- typische Anwendungen,
- Eingabedaten.

Mathematisch deterministische Brandmodelle		
Kriterium	**Algebraische Ansätze und Verfahren** (empirische Formeln)	**E** **Z**
Modellansatz	Der zu bewertende Brandraum wird in die folgenden Zonen unterteilt: • Zone der Flamme, • Zone der heissen Schicht (Rauchgasschicht), • Zone der kalten Schicht (raucharme Schicht). Dieser Zoneneinteilung liegt das Phänomen zugrunde, dass sich die heissen Rauchgase unter der Decke ansammeln und sich unter der Heissgasschicht eine kältere Schicht bildet. In den Zonen werden räumlich homogene Zustände (gleichmässige Temperatur, Dichte etc.) angenommen.	D v • • • D d u I s
Gleichungssysteme	Auf empirischen Daten oder auf fundamentalen physikalischen Zusammenhängen basierende einfache Berechnungsgleichungen (empirische Gleichungen vom algebraischen Typ).	M e a g D • • •
Strategie zur Lösung der Gleichungssysteme	Algebraische Lösung. Verwendung von Tabellenkalkulationsprogrammen.	D s Z r
Submodelle		S • • • • • • • • •
Modellierbare Raumgeometrien	Einfache Einraumgeometrie.	G a
Modellierungsaufwand	sehr gering	g

Tab. 13: Mathematisch deterministische Brandmodelle

Brandsimulationsmodelle	
Zonenmodelle	**Feldmodelle** (CFD-Modelle)
Das zu bewertende Raumsystem (Brandraum und Folgeräume) wird in die folgenden volumenvariablen Zonen unterteilt: • Zone der Flamme, • Zone der heissen Schicht (Rauchgasschicht), • Zone der kalten Schicht (raucharme Schicht). Dieser Zoneneinteilung liegt das Phänomen zugrunde, dass sich die heissen Rauchgase unter der Decke ansammeln und sich unter der Heissgasschicht eine kältere Schicht bildet. In den Zonen werden räumlich homogene Zustände (gleichmässige Temperatur, Dichte etc.) angenommen.	Das zu bewertende Raumsystem (Brandraum und Folgeräume) wird durch ein aus Netzelementen (Kontrollvolumina) bestehendes Rechengitter unterteilt. In den infinitesimalen, d.h. zu einem Grenzwert hin unendlich klein werdenden Elementen, werden homogene Zustände angenommen. Mithilfe des Rechengitters werden die fundamentalen Gleichungen der Strömungsmechanik und der Thermodynamik, welche die Strömungsfelder und die thermodynamischen Phänomene beschreiben, durch Werte an diskreten Stellen abgebildet. Zwischen diesen Rechenpunkten werden die Strömungsgrössen interpoliert.
Mit empirischen Ansätzen aus den fundamentalen Gesetzen entwickelte vereinfachte Gleichungssysteme (Gleichungen vom algebraischen Typ und gewöhnliche, gekoppelte Differenzialgleichungen 1. Ordnung). Die Gleichungssysteme bilanzieren die: • Massenerhaltung, • Energieerhaltung, • Impulserhaltung für bestimmte Zonen (z.B. Plume).	Fundamentale Gleichungen, welche die grundsätzlichen Gesetzmässigkeiten der Strömungsmechanik (Navier-Stokes-Gleichungen) und der Thermodynamik berücksichtigen (Systeme von gekoppelten, nicht linearen, partiellen Differenzialgleichungen). Die Gleichungssysteme bilanzieren die • Massenerhaltung, • Energieerhaltung, • Impulserhaltung, • Erhaltung der Stoffkomponenten.
Die vereinfachten Differenzialgleichungen werden mit numerischen Verfahren iterativ gelöst (wobei in den Zonen für jeden Zeitschritt die Energie- und Massenbilanzen aufgestellt und berechnet werden).	Die Systeme an nicht linearen partiellen Differenzialgleichungen werden mithilfe von Diskretisierungsansätzen (Methode der finiten Differenzen, Methode der finiten Volumen oder Methode der finiten Elemente) in Systeme von algebraischen Gleichungen überführt, die in einem aufwendigen iterativen Verfahren gelöst werden.
Submodelle existieren für spezielle Phänomene, wie z.B.: • Plume-Massenstrom, • Plume-Temperaturen (zur Ermittlung von lokalen Temperaturmaxima für die Bemessung von Bauteilen), • Ceiling-Jet-Temperaturen (zur Bestimmung der Auslösezeiten von Sprinklern und Wärmemeldern), • Massenaustausch mit der Umgebung, • Wärmetransport durch Umfassungsbauteile, • Strahlungsanteil der Flamme, • mechanische Ventilation, • Bilanzierung von Verbrennungsprodukten, • Wirkung von Sprinkleranlagen.	Submodelle existieren beispielsweise für: • Transport der im Brandraum vorkommenden gasförmigen Stoffe (O_2, CO_2, CO etc.) durch Auftrieb, Konvektion und Diffusion, • Brand- und Rauchquelle (Verbrennungsprozess), • Turbulenz, [1)] • Definition von Randbedingungen, • Auftrieb, • Grenzschichtphänomene zur Behandlung der Viskosität, • Wärmeübergang an den Wänden, • Wärmestrahlung, • Einfluss von Sprinkleranlagen.
Orthogonale, einfache Geometrien, die sich hinreichend genau abbilden lassen müssen.	Orthogonale Geometrien (Programme mit hexaedrisch strukturierten Gittern) bis beliebige Geometrien (Programme mit unstrukturierten Netzen).
gering bis mittel	hoch bis sehr hoch

Mathematisch deterministische Brandmodelle		
Kriterium	**Algebraische Ansätze und Verfahren** (empirische Formeln)	**E** **Z**
Vorbehalte für die Anwendung	Die korrekte Anwendung der algebraischen Ansätze und Verfahren richtet sich nach dem durch die Experimente abgedeckten spezifischen Geltungsbereich der empirischen Relationen. Die bei der Entwicklung der algebraischen Verfahren eingeführten vereinfachenden Annahmen sind zu beachten und schränken den Anwendungsbereich entsprechend ein (z.B. bestehende Begrenzungen für die Flammenhöhe). Die Einflussgrössen und Randbedingungen dürfen in der Regel keiner zeitlichen Änderung unterstehen (Steady-State-Fall). [2)] Hinsichtlich der Beschaffenheit der Rauchabschnitte und der raucharmen Schicht bestehen unter anderem die folgenden Einschränkungen: • Rauchabschnitte müssen eingeschossig sein und dürfen keine Zwischenebenen aufweisen; • die Rauchabschnittsflächen sind begrenzt; • die raucharme Schicht muss eine Mindesthöhe aufweisen; • die Höhe der raucharmen Schicht richtet sich nach der Höhe der Zuluftöffnungen; • Rückströmungen von der Heissgas- in die Kaltgasschicht (Kaltluftabfälle) können nicht erfasst werden.	D f • • K r s g I r r g D g s • • • • D u b
Aussagekraft der Ergebnisse	zonal, jedoch mit beschränkter Aussagekraft (wegen der sehr engen Gültigkeitsbereiche der Formeln)	z E I E
Aufwand für Rechenläufe, Parameter- und Sensitivitätsanalysen	sehr gering (falls ein Tabellenkalkulationsverfahren verwendet wird)	g

Tab. 13: Mathematisch deterministische Brandmodelle

Brandsimulationsmodelle	
Zonenmodelle	**Feldmodelle** (CFD-Modelle)
Dem Modellansatz entsprechend eignen sich die Zonenmodelle für Problemstellungen, bei denen • die eindeutige Ausbildung einer heisseren oberen Rauchgasschicht und einer kühleren unteren raucharmen Luftschicht zu erwarten ist (wobei die Temperaturdifferenz zwischen den Schichten mindestens 1 K betragen sollte); • innerhalb der Zonen keine Schichtungen entstehen (wie z.B. bei sehr hohen Räumen). Komplexe Gebäude-/Raumgeometrien können nicht als solche modelliert, sondern müssen vereinfacht werden. Bei Räumen sollten die Verhältnisse der Ausdehnung in die drei Raumrichtungen keine extremen Werte aufweisen. Innerhalb der Zonen und für Umfassungsbauteile herrschen räumlich homogene physikalische Bedingungen (z.B. einheitliche mittlere Temperatur in jeder Schicht, nur von der Höhe abhängiger Druck). Die Nichtbeachtung der Impulserhaltung bzw. Strömungsvorgänge für die heisse Rauchgasschicht und die raucharme Schicht setzt voraus, dass [3] • die Fluide innerhalb der Zonen ruhen (Ausnahmen: Plume, Ceiling-Jet und Ventilationsöffnungen); • der Plume ungestört bis in die Heissgasschicht aufsteigen kann; • strömungstechnische Vorgänge, wie beispielsweise - eine impulsstarke Nachströmung der Zuluft, - die rauchgasschichtnahe Platzierung des Zuluftstrahles, - der Kaltluftabfall an Bauteilen, - die Auswirkungen der Hygienelüftung, - die langsame horizontale Ausbreitung einer Rauchfront in ausgedehnte Räume, - die langsame vertikale Ausbreitung einer Rauchfront in sehr hohe Räume (Atrien), - die Umströmung von Bauteilen, nicht dominieren; • der Brand im Ursprungsraum verbleibt, d.h. es gibt einen Brandraum und angrenzende Räume, die mit heissen Rauchgasen (teilweise) gefüllt sind. Die Anwendungsbereiche und -vorbehalte der implementierten und für die Fragestellung erforderlichen Submodelle sind zu beachten.	Das betrachtete Raumsystem sollte sich mit Netzelementen diskretisieren lassen, die eine Kantenlänge von • maximal 50 cm in strömungstechnisch nicht relevanten Bereichen und • weniger als 15 cm in Strömungsfeldern mit hohen Gradienten aufweisen. Grössere Abmessungen können bei der Berechnung des Strömungsfeldes zu markanten Fehlern führen. Die dazu erforderliche Rechenleistung und benötigte Rechenzeit müssen zur Verfügung stehen. [64], S. 41-42 Die Struktur des Gleichungssystems gewisser CFD-Programme, wie z.B. FDS, setzen kleine Strömungsgeschwindigkeiten bzw. Mach-Zahlen voraus. Die Anwendungsbereiche und -vorbehalte der implementierten und für die Fragestellung erforderlichen Submodelle sind zu beachten. Die für die mathematische Lösung der nicht linearen, partiellen Differenzialgleichungen erforderliche Vorgabe von zahlreichen Anfangs- und Randbedingungen wirkt sich auf die Simulationsergebnisse aus. [4] Parameter- und Sensitivitätsanalysen sind kaum durchführbar, womit bei unsicheren Eingangs- und Ausgangsdaten potenzielle Fehler und deren Fortpflanzung nicht überprüfbar sind. Aufgrund ihrer Komplexität erfordert die korrekte Anwendung der CFD-Modelle eine hohe Fachkompetenz.
zonal, jedoch ohne Berücksichtigung strömungstechnischer Einflüsse [3] lokal für bestimmte Bereiche, wie Plume, Ceiling-Jet, Öffnungen, Bauteile	lokal
gering (einige Minuten pro Rechenlauf)	hoch bis sehr hoch (ein bis mehrere Tage oder gar Wochen pro Rechenlauf)

Mathematisch deterministische Brandmodelle		
Kriterium	**Algebraische Ansätze und Verfahren** (empirische Formeln)	**E** **Z**
Typische Anwendungen	Untersuchung von brandphysikalischen Teilphänomenen, wie Berechnung • des Plume-Massenstromes, • der Plume-Temperatur, • der Flammenhöhe, • der Brandleistung, • der Temperatur der Rauchgasschicht, • von Decken- und Freistrahlen. Überprüfung der mithilfe von Brandsimulationsmodellen gewonnenen Ergebnisse auf Plausibilität.	E e S F A F
Eingabedaten	wenige Zahlen	E F S S A
Verfahren, Programme [5] (Stand 29.11.2013)	Verfahren nach VDI 6019 Blatt 2, Kapitel 8 [64] Verfahren nach TRVB S 125 [30] Gleichungen nach NFPA 92B [25]	A E G M G

Tab. 13: Mathematisch deterministische Brandmodelle

Erläuterungen zu Tabelle 13

[1] Die fundamentalen Gleichungen der Strömungsmechanik (Erhaltungsgleichungen für Masse, Energie, Impuls, Stoffkomponenten) sind vollständig für die Beschreibung laminarer Strömungen. Brände und Rauchgasströmungen sind im Allgemeinen jedoch nicht laminar, d.h. die Geschwindigkeiten und Zustandsgrössen fluktuieren räumlich verteilt um ihre Mittelwerte. Üblicherweise besteht die Behandlung der Turbulenz darin, die betroffenen Grössen durch ihre zeitlichen Mittelwerte und einen fluktuierenden Anteil darzustellen. Damit die um die Turbulenzterme erweiterten Fundamentalgleichungen geschlossen lösbar sind, müssen entsprechende Turbulenzmodelle eingeführt werden (z.B. k-ε- oder LES-Turbulenzmodell).

[2] Manche Gleichungen lassen sich über eine gewisse Anzahl Zeitschritte iterieren, sodass bedingt auch instationäre Vorgänge abgebildet werden können. [65], S. 12

[3] Der Stoff-, Energie- und Impulsaustausch zwischen den Zonen wird durch vereinfachte Beziehungen, wie z.B. den Plume-Formeln, dargestellt. Strömungstechnische Vorgänge, die zu einem zusätzlichen Austausch zwischen den Zonen beitragen, gehen nicht in die Berechnung ein.

[4] Anfangsbedingungen definieren den aero- und thermodynamischen Zustand des Strömungsfeldes zu Beginn der Simulation. Randbedingungen legen die aero- und thermodynamischen Zustände am Rand des Strömungsfeldes – wie

Brandsimulationsmodelle	
Zonenmodelle	**Feldmodelle** (CFD-Modelle)
Beurteilung der sich bei unterschiedlichen Brandszenarien einstellenden Rauchgasschicht. Schnell- oder Grobanalyse der zeitabhängigen Betrachtung von Rauchgasentwicklungsvorgängen. Abschätzung der mittleren Rauchgastemperatur. Risikoanalysen von Brandschutzkonzepten.	Detaillierte rechnerische Behandlung komplexer Raumströmungen (mit dominanten Zulufteffekten, lokalen Rauchausbreitungsphänomenen etc.). Simulation der Ausbreitung von Rauchgasen in die Umgebung. Rekonstruktion von Brandereignissen (Brandursachenermittlung). Bauteilbemessung von teilweise freien Strukturen (Fachwerkstäbe, Unterzüge, Apparategerüste) aufgrund von Wärmebelastungen.
Brandszenarium Randbedingungen (Umgebungsbedingungen, Gebäudestruktur) Simulationszeit, Zeitschrittweite, Iterationsparameter Submodelle Auslösezeiten von brandschutztechnischen Anlagen	Brandszenarium Randbedingungen, Anfangsbedingungen [4)] Simulationszeit, Zeitschrittweite, Iterationsparameter Rechenverfahren, Submodelle Auslösezeiten von brandschutztechnischen Anlagen
ARGOS: http://en.dbi-net.dk/argos.asp BRANZFIRE: http://www.branz.co.nz CFAST: http://www.nist.gov MRFC: http://www.vib-brandschutz.de OZone: http://www.argenco.ulg.ac.be/logiciel.php	ANSYS CFX: http://www.ansys.com ANSYS FLUENT: http://www.ansys.com FDS: http://www.fire.nist.gov FloVENT: http://www.mentor.com JASMINE: http://www.bre.co.uk/fire KFX: http://www.computit.no KOBRA 3D: http://www.ist-net.de OpenFOAM: http://www.openfoam.org PHOENICS: http://www.cham.co.uk SMARTFIRE: http://fseg.gre.ac.uk/smartfire STAR-CCM+: http://www.cd-adapco.com

z.B. an Wänden, Decken und Öffnungen – als Funktion von Ort und Zeit fest.

[5)] Die Auflistung zeigt eine Auswahl von fortschrittlichen, gut dokumentierten und entgeltlich oder kostenlos verfügbaren Verfahren und Programmen. Eine ausführliche Liste von Zonen- und Feldmodellen ist zu finden in der Bestandsaufnahme von Olenick und Carpenter *[66]* oder im Forschungsprojekt von Martinez de Aragón, Rey und Chica *[67]* oder unter http://www.firemodelsurvey.com.

5.4 Entwicklung von Bemessungsbränden

Zur Entwicklung von Bemessungsbränden existieren die folgenden Methoden und Modelle:

Theoretische Methode

- Zeitunabhängige Modelle
  - Vereinfachte Naturbrandmodelle (vgl. Tabellen 15-17)
  - Konstante Brandleistung (vgl. Tabelle 18)
- Zeitabhängige Modelle
  - Nominelle Temperaturzeitkurven (vgl. Tabelle 19)
  - Brandleistungskurven (vgl. Tabelle 20)
  - Schematisierte Naturbrandmodelle (vgl. Tabelle 21)
  - Allgemeine Naturbrandmodelle (vgl. Tabelle 22)

Experimentelle Methode

- Experimentelle Brandleistungskurven (vgl. Tabelle 23)

Tabelle 14 zeigt eine nach Brandphasen, Methoden und Modelltypen geordnete Zusammenstellung von Modellansätzen zur Festlegung von Bemessungsbränden.

Legende zu Tabelle 14

X trifft zu

☐ trifft nicht zu (leere Felder)

Erläuterungen zu Tabelle 14

[1] Die Entzündung ist in der Regel nicht Bestandteil der Modellierung.

[2] Vgl. CEN/TR 12101-5, Tabelle 1 und BS 7346-4, Tabelle 1 sowie BS 7346-7, Tabelle 1.

[3] Vgl. NFPA 92B, Tabellen B.5.3(a+b), B.5.3(a) und B.5.3(d-h) sowie NFPA 204, Tabellen A.8.2.6, E.5.2(a-b) und E.5.3(a-d).

[4] Vgl. VdS 2827, Tabellen 7-9

Methoden und Modelle zur Festlegung von Bemessungsbränden

Tabelle Nr.	Modell	Brandphasen [1]			Methoden						
					Theoretische Methode						Experimentelle Methode
					Zeitunabhängig		Zeitabhängig				
		Schwelen	Ausbreitung	Abklingen	Vereinfachte Naturbrandmodelle	Konstante Brandleistung	Nominelle Temperaturzeitkurven	Brandleistungskurven	Schematisierte Naturbrandmodelle	Allgemeine Naturbrandmodelle	
15	Vereinfachte Naturbrandmodelle für axialsymmetrische Plumes		X		X						
16	Vereinfachte Naturbrandmodelle für horizontal strömende Rauchgasschichten		X		X						
17	Vereinfachte Naturbrandmodelle für nicht axialsymmetrische Plumes		X		X						
18	CEN/TR 12101-5 BS 7346-4, BS 7346-7 [2]		X			X					
	NFPA 92B, NFPA 204 [3]		X			X					
	VdS 2827 [4]		X			X					
	Vereinfachtes Naturbrandmodell für vollentwickelte Raumbrände		X		X	X					
19	Schwelbrandkurve	X					X				
	Einheits-Temperaturzeitkurve, Aussenbrandkurve, Hydrokarbon-Brandkurve		X				X				
20	αt^2-Modell		X					X			
	DIN 18232-2, DIN 18232-5		X					X			
	TRVB S 125		X					X			
	Geometrisches Brandausbreitungsmodell		X					X			
	Abnahme der Brandleistung ohne Löschmassnahmen			X				X			
	Abnahme der Brandleistung mit Löschmassnahmen			X				X			
21	VDI 6019 Blatt 1, niedrigenergetische Brände								X		
	VDI 6019 Blatt 1, hochenergetische Brände		X	X					X		
	DIN EN 1991-1-2/NA, Anhang BB		X	X					X		
22	Computersimulationen (Zonen- und Feldmodelle)		X	X						X	
23	Experimentelle Brandleistungskurven		X	X							X

Tab. 14: Methoden und Modelle zur Festlegung von Bemessungsbränden

Vereinfachte Naturbrandmodelle für axialsymmetrische Plumes

(Auftriebsbehaftete Rauchgassäulen ohne Anfangsimpuls und ohne aerodynamische Störungen)

Modell (Autor) **Quellen**	**Anwendungsbereich** [1]	**Publikation** (Beispiele)	**Formeln** **Eingemischter Umgebungsluftmassenstrom** (Plume-Formeln) [2]
McCaffrey *[68] [69]*	Flammenbereich $0 \le z / \dot{Q}_c^{2/5} < 0.08$	CFAST Manual [70], S. 24 MRFC Manual [71], S. 104	$\dot{m}_e = 0.011 \cdot (z / \dot{Q}_c^{2/5})^{0.566} \cdot \dot{Q}_c$
	Intermittenzbereich $0.08 \le z / \dot{Q}_c^{2/5} \le 0.2$		$\dot{m}_e = 0.026 \cdot (z / \dot{Q}_c^{2/5})^{0.909} \cdot \dot{Q}_c$ [5]
	Plume-Bereich $0.2 < z / \dot{Q}_c^{2/5}$		$\dot{m}_e = 0.124 \cdot (z / \dot{Q}_c^{2/5})^{1.895} \cdot \dot{Q}_c$
Zukoski *[72]*	Plume-Bereich $z > h_{fl}$	DIN 18232-2 [26], S. 24 DIN 18232-5 [27], S. 30 ISO 16735 [73], S. 10	$\dot{m}_e = 0.076 \cdot (z - z_o)^{5/3} \cdot \dot{Q}_c^{1/3}$ $\Delta T_p / T_\infty << 1$, $h_{fl} \le 0.5 \cdot d$
Thomas + Hinkley *[74] [75]*	Flammenbereich $z \le h_{fl}$	DIN 18232-2 [26], S. 24 DIN 18232-5 [27], S. 29 CEN/TR 12101-5 [45], S. 52 TRVB S 125 [30], S. 10	$\dot{m}_e = C_e \cdot U \cdot z^{3/2} = C_e \cdot \pi \cdot D \cdot z^{3/2}$ Einmischkonstante C_e nach Tabelle 15.2
Heskestad *[76] [77]*	Flammenbereich $z \le h_{fl}$	SFPE 2002 [76], S. 2/12	$\dot{m}_e = 0.0059 \cdot \dot{Q}_c \cdot z / h_{fl}$ $D \ge 0.3$ m
		SFPE 2008 [77], S. 2/13	$\dot{m}_e = 0.0058 \cdot \dot{Q}_c \cdot z / h_{fl}$ $D \ge 0.3$ m
		NFPA 204 [31], S. 13	$\dot{m}_e = 0.0056 \cdot \dot{Q}_c \cdot z / h_{fl}$
		NFPA 92B [25], S. 12	$\dot{m}_e = 0.032 \cdot \dot{Q}_c^{3/5} \cdot z$ $z \le 0.166 \cdot \dot{Q}_c^{2/5}$, $\Delta T_p \ge 2.2$ °C
	Flammenspitze $z = h_{fl}$	SFPE 2002 [76], S. 2/12	$\dot{m}_e = 0.0056 \cdot \dot{Q}_c$ $\Delta T_{hfl} = 500$ K
		ISO 16734 [78], S. 10	$\dot{m}_e = 0.0059 \cdot \dot{Q}_c$ $D \ge 0.3$ m
		SFPE 2008 [77], S. 2/13	$\dot{m}_e = 0.0058 \cdot \dot{Q}_c$ $\Delta T_{hfl} = 500$ K $\dot{m}_e = 0.0058 \cdot \dot{Q}_c \cdot z / h_{fl}$ $D \ge 0.3$ m
		NFPA 204 [31], S. 13	$\dot{m}_e = 0.0056 \cdot \dot{Q}_c \cdot z / h_{fl}$
	Plume-Bereich $z > h_{fl}$	ISO 16734 [78], S. 10 NFPA 204 [31], S. 12 CEN/TR 12101-5 [45], S. 54 SFPE 2008 [77], S. 2/13	$\dot{m}_e = 0.071 \cdot \dot{Q}_c^{1/3} \cdot (z - z_o)^{5/3} \cdot [1 + 0.027 \cdot \dot{Q}_c^{2/3} \cdot (z - z_o)^{-5/3}]$
		NFPA 92B [25], S. 12	$\dot{m}_e = 0.071 \cdot \dot{Q}_c^{1/3} \cdot z^{5/3} + 0.0018 \cdot \dot{Q}_c$ $z > 0.166 \cdot \dot{Q}_c^{2/5}$ $\Delta T_p \ge 2.2$ °C

Tab. 15: Vereinfachte Naturbrandmodelle für axialsymmetrische Plumes

Temperaturerhöhung (ΔT_p) [3] **Geschwindigkeit** (v_p) [3] **Rauchgasschichttemperatur** (T)	**Flammenhöhe** (h_{fl}) **Virtueller Ursprung** (z_o) [6]	**Wichtige Randbedingungen** [4]
$\Delta T_p = T_\infty / 2 \cdot g \cdot (k/C)^2 \cdot (z / \dot{Q}_c^{2/5})^{2 \cdot \eta - 1}$ $v_p = \dot{Q}_c^{1/5} \cdot k \cdot (z / \dot{Q}_c^{2/5})^{\eta}$ Konstanten k, C und η nach Tabelle 15.3		Brände in freier Umgebung Methan-Diffusionsflammen $\dot{Q} \leq 58$ kW $\dot{Q}_c = 0.85 \cdot \dot{Q}$
	$h_{fl} = 0.23 \cdot \dot{Q}_c^{2/5}$ $z_o = h_{fl} - 0.175 \cdot \dot{Q}_c^{2/5}$ vgl. Heskestad	Brände in geschlossenen, hohen Räumen Die Flammenspitzen dringen nicht in die Rauchgasschicht ein (kleiner Brand) [1]
	$h_{fl} = 42 \cdot D \cdot \{v_{ab} / [\rho_\infty \cdot (g \cdot D)^{1/2}]\}^{0.61}$	Brände in grossen Räumen Die Flammenspitzen dringen in die Rauchgasschicht ein (grosser Brand) [1] $\dot{q}_c$ = 200-1800 kW/m² [45], S. 52
SFPE 2002, SFPE 2008, ISO 16734 [76], S. 2/6; [77], S. 2/7; [78], S. 9 $\Delta T_p = 9.1 \cdot [T_\infty / (g \cdot c_{p\infty}^2 \cdot \rho_\infty^2)]^{1/3} \cdot \dot{Q}_c^{2/3} \cdot (z - z_o)^{-5/3}$ $v_p = 3.4 \cdot [g / (T_\infty \cdot c_{p\infty} \cdot \rho_\infty)]^{1/3} \cdot \dot{Q}_c^{1/3} \cdot (z - z_o)^{-1/3}$ Mit atmosphärischen Normbedingungen nimmt der Faktor $9.1 \cdot [T_\infty / (g \cdot c_{p\infty}^2 \cdot \rho_\infty^2)]^{1/3}$ den Wert 25.0 $K \cdot m^{5/3} \cdot kW^{-2/3}$, der Faktor $3.4 \cdot [g / (T_\infty \cdot c_{p\infty} \cdot \rho_\infty)]^{1/3}$ den Wert 1.03 $m^{4/3} \cdot s^{-1} \cdot kW^{-1/3}$ an. $\Delta T_p = 25.0 \cdot \dot{Q}_c^{2/3} \cdot (z - z_o)^{-5/3}$ $v_p = 1.03 \cdot \dot{Q}_c^{1/3} \cdot (z - z_o)^{-1/3}$ NFPA 92B, NFPA 204 [25], S. 14; [31], S. 13 $T = T_\infty + (K_s \cdot \dot{Q}_c) / (c \cdot \dot{m}_e)$ $K_s = 0.5$ (NFPA 204) $K_s = 1.0$ (NFPA 92B) c = 1.0 kJ/(kg·K)	$h_{fl} = 0.235 \cdot \dot{Q}^{2/5} - 1.02 \cdot D$ (nach [77], S. 2/4 ist die gesamte Brandleistung einzusetzen) Lachenbrände: $z_o = 0.083 \cdot \dot{Q}^{2/5} - 1.02 \cdot D$ (nach [77], S. 2/10 ist die gesamte Brandleistung einzusetzen) Lachen- und Lagerbrände: $z_o = h_{fl} - 0.175 \cdot \dot{Q}_c^{2/5}$	Brände in geschlossenen Räumen, fernab von Wänden (Abstand > D) und ohne Ventilationseinflüsse oder Brände im Freien ohne Windeinfluss Atmosphärische Normbedingungen: g = 9.81 m/s², $c_{p\infty}$ = 1.0 kJ/(kg·K), ρ_∞ = 1.2 kg/m³, T_∞ = 293 K Runde oder rechteckige Brandquellen mit Längen-Breiten-Verhältnis < 2 Ausreichende Sauerstoffzufuhr Mittlere Flammenhöhe h_{fl} • ≥ 1.1 × Brandquellenhöhe, • ≤ 0.5 × Raumhöhe (kleiner Brand) Brandquellendurchmesser D ≤ 0.1 × kleinste Raumausdehnung Falls die Brandfläche im Verhältnis von Raumgrösse zu Raumhöhe klein ist, erübrigt sich die Korrektur für den virtuellen Ursprung (vgl. NFPA 92B [25], S. 12)

Erläuterungen zu Tabelle 15

[1] Nach McCaffrey lässt sich die Brandquelle in die drei folgenden Bereiche einteilen (vgl. Abbildung 23):

- Bereich der kontinuierlichen Verbrennung mit ständiger Flamme (Brandnah- bzw. Flammenbereich),
- Bereich der flackernden bzw. intermittierenden Flamme (Übergangs- bzw. Intermittenzbereich),
- Bereich der Abgasfahne (Plume- bzw. Ähnlichkeitsbereich).

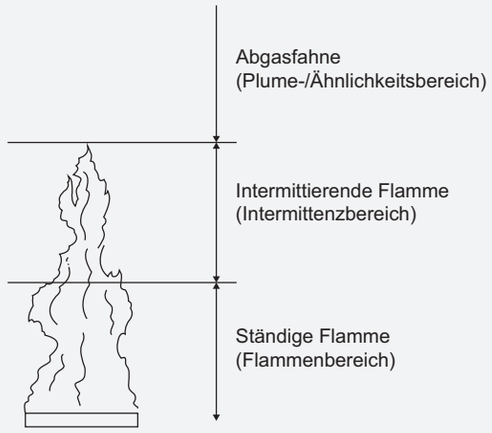


Abb. 23: Einteilung der Brandquelle nach McCaffrey

Im Plume-/Ähnlichkeitsbereich wurde messtechnisch eine Ähnlichkeit der Temperatur- und Geschwindigkeitsprofile festgestellt.

Bei instationären, d.h. sich ausbreitenden Bränden müssen die geometrischen Verhältnisse zwischen Flammenhöhe und Höhe der raucharmen Schicht regelmässig überprüft werden, damit entweder die Plume-Formeln für „kleine Brände“, mit nicht in die Rauchgasschicht eindringenden Flammen ($h_{fl} < d$), oder diejenigen für „grosse Brände“, mit in die Rauchgasschicht eindringenden Flammen ($h_{fl} \geq d$), angewendet werden können (vgl. Abbildungen 24-25). Weil die Formeln für den Plume-Massenstrom über kleinen und grossen Feuern nicht stetig ineinander übergehen, müssen für den Übergangsbereich Interpolationsregeln entwickelt werden. [26], S. 25

[2] Den drei obgenannten Bereichen einer Brandquelle strömt aus der Umgebung Luft zu. Insbesondere für grössere Aufstiegshöhen darf der Beitrag der vom Brand selbst erzeugten Rauchgasmenge, d.h. die Abbrand- bzw. Massenverlustrate, gegenüber der eingemischten Luftmenge vernachlässigt werden.

Damit gilt für den Plume-Massenstrom in der Regel: $\dot{m}_p = \dot{m} + \dot{m}_e \approx \dot{m}_e$.

Eine konsequente Unterscheidung zwischen Plume-Massenstrom $\dot{m}_p$ und eingemischtem Umgebungsluftmassenstrom $\dot{m}_e$ ist in der Literatur nicht durchgängig festzustellen. So sind für ein und dieselbe Plume-Formel beide Massenstromangaben zu finden.

Gewisse „Unschärfen“ sind auch bei der Definition der Brandleistung festzustellen, denn oft ist unsicher, ob die gesamte Brandleistung oder nur der konvektive Anteil zu berücksichtigen ist. Z.B. unterscheidet sich in dieser Hinsicht die Formel für den Abstand des virtuellen Ursprungs von der Brandgutebene nach [45], S. 54 von derjenigen nach [78], S. 8.

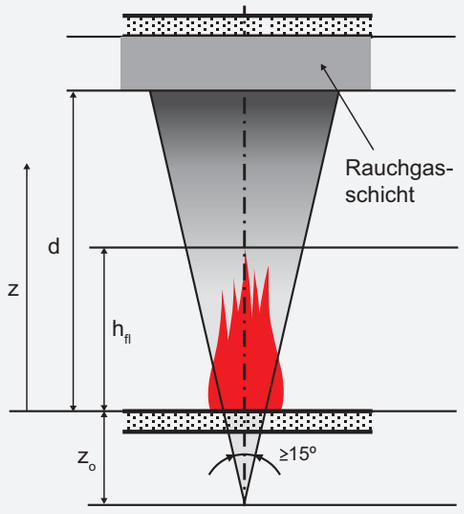


Abb. 24: Plume über kleinem Brand

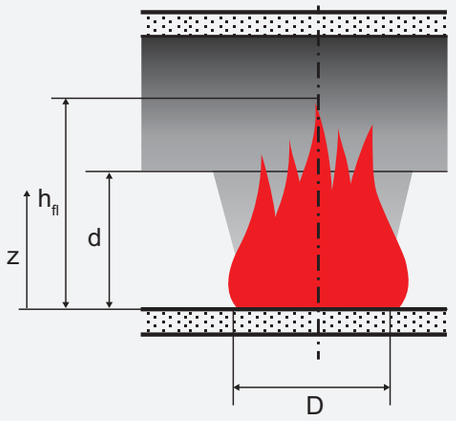


Abb. 25: Plume über grossem Brand

[3] Die Gleichungen für die Temperaturerhöhung ΔT_p und die Geschwindigkeit v_p beziehen sich auf die Plume-Mittelachse. Dabei verzichten Zukoski und Heskestad auf eine Einteilung der Brandquelle nach Abbildung 23.

[4] Weitere Randbedingungen und Erläuterungen zu relevanten Anwendungsbereichen sind den in Spalte 1 aufgeführten Quellen oder der weiterführenden Fachliteratur, wie z.B. [79], zu entnehmen.

[5] Formel für den eingemischten Umgebungsluftmassenstrom $\dot{m}_e$ nach [70], S. 24 und [79], S. 18. Für den Intermittenzbereich benutzt [71], S. 104 eine Formel, die für den Faktor und den Exponenten einen leicht modifizierten Wert aufweist.

[6] Um den Modellansatz der punktförmigen Brandquelle auf flächig verteilte Brandlasten erweitern zu können, wurde das Konzept des virtuellen Ursprungs eingeführt. Dabei wird der Ursprung der punktförmigen Brandquelle um die Höhe z_o nach unten verschoben (vgl. Abbildung 26). Im Fall des unterhalb des Bodens liegenden Ursprungs ist für z_o ein negativer Wert einzusetzen. Befindet sich hingegen bei einem hoch liegenden Brandherd der Ursprung über dem Boden, so nimmt z_o positive Werte an.

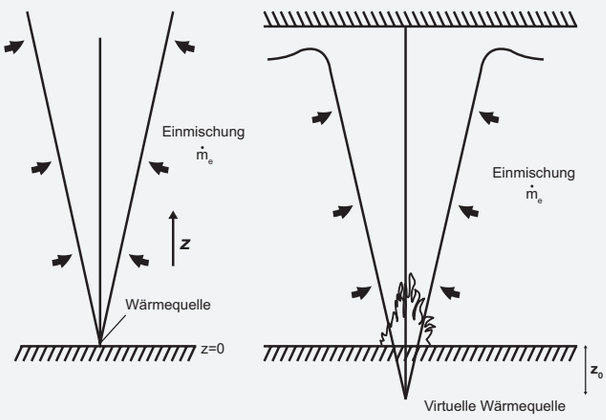


Abb. 26: Punkt- und flächenförmige Brandquellen

Hinweise

a) Die Zusammenstellung nach Tabelle 15 beschränkt sich vorwiegend auf in Normen und in technischen Richtlinien aufgeführte Modelle. Andere Modellansätze sind in der weiterführenden Fachliteratur, wie z.B. in [79], zu finden.

b) Bei der Anwendung von numerischen Modellen (Computersimulationen) ist, entsprechend dem gewählten Bemessungsbrandszenarium, automatisch zu überprüfen, ob die Plume-Modelle ihren Anwendungsbereich nicht verlassen. Werden Anwendungsgrenzen überschritten, so ist eine kombinierte Nutzung von mehreren Plume-Modellen mit unterschiedlichen Anwendungsbereichen erforderlich.

Formelzeichen für axialsymmetrische Plumes		
Zeichen	**Bezeichnung**	**Einheit**
A	Brandfläche	m^2
C	Konstante (vgl. Tabelle 15.3)	
C_e	Einmischkonstante, die verschiedene, die Einmischung im Brandraum beeinflussende Faktoren berücksichtigt (vgl. Tabelle 15.2)	$kg \cdot s^{-1} \cdot m^{-5/2}$
c	spezifische Wärmekapazität der Rauchgase in der Rauchgasschicht (c= 1.01 kJ/(kg·K) nach [27])	kJ/(kg·K)
$c_{p\infty}$	spezifische Wärmekapazität der Umgebungsluft bei konstantem Druck	kJ/(kg·K)
d	Höhe der raucharmen Schicht	m
D	Durchmesser einer runden bzw. Seitenlänge einer quadratischen Brandfläche; für rechteckige Brandflächen gilt: $D = (a \cdot b)^{1/2}$	m
g	Erdbeschleunigung (9.81 m/s^2)	m/s^2
h_{fl}	mittlere Flammenhöhe oberhalb der Brandgutoberfläche	m
k	Konstante (vgl. Tabelle 15.3)	nach Tab. 15.3
K_s	Anteil konvektiver Energiefreisetzung in der Rauchgasschicht	
$\dot{m}_e$	in die Rauchgassäule (Plume) eingemischter Umgebungsluftmassenstrom	kg/s
$\dot{m}_p$	Plume-Massenstrom (als Summe von Massenverlustrate und eingemischtem Luftmassenstrom)	kg/s
$\dot{Q}$	gesamte Brandleistung (Wärmestrom)	kW
$\dot{Q}_c$	konvektive Brandleistung	kW
$\dot{q}_c$	spezifische konvektive Brandleistung	kW/m^2
T	mittlere Temperatur in der Rauchgasschicht	K
ΔT_{hfl}	mittlere Temperaturerhöhung auf der Plume-Achse auf Höhe der Flammenspitze ($\Delta T_{hfl} = T_{hfl} - T_\infty$)	K
T_p	mittlere Temperatur auf der Plume-Achse	K
ΔT_p	mittlere Temperaturerhöhung auf der Plume-Achse ($\Delta T_p = T_p - T_\infty$)	°C
T_∞	Umgebungstemperatur	K
U	Umfang der Brandfläche	m
v_{ab}	flächenspezifische Abbrandrate	$kg/(m^2 \cdot s)$
v_p	mittlere (axiale) Geschwindigkeit auf der Plume-Achse	m/s
z	Aufstiegshöhe der Rauchgase oberhalb der Brandgutoberfläche	m
z_o	Abstand des virtuellen Ursprungs von der Brandgutebene (vgl. Abbildung 26)	m
η	Konstante (vgl. Tabelle 15.3)	
ρ_∞	Dichte der Umgebungsluft	kg/m^3

Tab. 15.1: Formelzeichen für axialsymmetrische Plumes

Einmischkonstante C_e			
C_e [kg·s^{-1}·m$^{-5/2}$]	**Anwendungsgrenzen**	**Beispiele**	**Quelle**
0.19	Grossflächige Räume [1] mit grossem Abstand zwischen Brandherd und Decke bzw. unterer Rauchgasschichtgrenzfläche sowie $3 \cdot A^{1/2} < z \leq 10 \cdot A^{1/2}$	Zuschauerräume, Stadien, Atrien	[45], S. 52 [80]
0.21	Grossflächige Räume [1] mit kleinem Abstand zwischen Brandherd und Decke bzw. unterer Rauchgasschichtgrenzfläche sowie $z \leq 3 \cdot A^{1/2}$	Grossraumbüros	[80]
0.34	Kleine, zellenartige Räume [2] sowie $z \leq 10 \cdot A^{1/2}$ mit nur einseitig zuströmender Verbrennungsluft	Einzelbüros, Hotelzimmer [3]	[80]
0.188	Grossflächige Räume [1] mit Seitenlängen $a > 5 \cdot A^{1/2}$ und $b > A^{1/2}$ sowie $z \leq 3 \cdot A^{1/2}$ (Kompromissvorschlag zur Anwendung des Plumes nach P.H. Thomas für alle Bemessungsbrände nach BS 7346-4)	Grossraumbüros	[59]
0.337	Kleine, zellenartige Räume [2] mit $z \leq 3 \cdot A^{1/2}$ (Kompromissvorschlag zur Anwendung des Plumes nach P.H. Thomas für alle Bemessungsbrände nach BS 7346-4)	Einzelbüros, Hotelzimmer	[45], S. 52

Tab. 15.2: Einmischkonstante C_e

Erläuterungen zu Tabelle 15.2

[1] Bei grossflächigen Räumen ist die grössere Raumseite s grösser als die fünffache Brandherdabmessung: $s \geq 5 \cdot D$.

[2] Bei kleinen, zellenartigen Räumen unterschreitet die grössere Raumseite s die fünffache Brandherdabmessung: $s < 5 \cdot D$.

[3] Die Lüftungsöffnungen liegen im Wesentlichen an einer Seite des Brandherdes, was eine einseitige Zuströmung und, infolge höherer Turbulenzen, eine verstärkte Einmischung bewirkt. [81], S. 73

Konstanten k, C und η				
	$z / \dot{Q}^{2/5}$	**k**	**C**	**η**
Flammenbereich	< 0.08 m/kW$^{2/5}$	6.8 m$^{1/2}$/s	0.9	0.5
Intermittenzbereich	0.08-0.20 m/kW$^{2/5}$	1.9 m/(kW$^{1/5}$·s)	0.9	0
Plume-Bereich	> 0.20 m/kW$^{2/5}$	1.1 m$^{4/3}$/(kW$^{1/3}$·s)	0.9	-0.333

Tab. 15.3: Konstanten k, C und η

Vereinfachte Naturbrandmodelle für horizontal strömende Rauchgasschichten [1]

Modell		Anwendungsbereich Randbedingungen [3]	Rauchgasmassenstrom Rauchgasschichtdicke
Vertikale Brandraumöffnung (1. Strömungsbereich) [2]	**Morgan Hansell** *[62] [80]*	$w >> d_w$	$\dot{m}_w = C_e \cdot U \cdot h^{3/2} \cdot w / \{w^{2/3} + C_d^{-1} \cdot (C_e \cdot U / \sigma)^{2/3}\}^{3/2}$ $d_w = C_d^{-1} \cdot [\dot{m}_w / (\sigma \cdot w)]^{2/3}$
	BSI PD 7974-2 *[82]*		$\dot{m}_w = 0.09 \cdot \dot{Q}_c^{1/3} \cdot h \cdot w^{2/3}$
	Morgan *[83]*		$\dot{m}_w = 2/3 \cdot C_d^{3/2} \cdot w \cdot \rho_\infty / T_{w,max} \cdot [2 \cdot g \cdot (T_{w,max} - T_\infty) \cdot T_\infty]^{1/2} \cdot d_w^{3/2} \cdot \kappa_m$
Vorsprung/Überlaufkante (2. Strömungsbereich) [2]	**Morgan Hansell** *[62] [84]*	Balkon-/Anliegender-Überlauf-Plume	$\dot{m}_s = 2 \cdot \dot{m}_w$ $d_s = 0.36 \cdot C_d^{-1} \cdot \{\dot{m}_s \cdot T_b / [w_s \cdot (T_b - T_\infty)^{1/2} \cdot T_\infty^{1/2}]\}^{2/3}$
	Ko Hadjisophocleous Lougheed *[85]*	Balkon-Überlauf-Plume Kanalisiert strömende Rauchgasschicht mit Unterzug	$\dot{m}_s = 1.2 \cdot (h_b / h)^{0.5} \cdot \dot{m}_w$
		Balkon-Überlauf-Plume Nicht kanalisiert strömende Rauchgasschicht ohne Unterzug	$\dot{m}_s = a \cdot \dot{m}_w$
	Harrison Spearpoint [4] *[209]*	Balkon-Überlauf-Plume $1.16 < (h / w)^{-0.92} \cdot (h_b / w) < 2.23$ $(h_b / h) \cdot [b / (h_b - h)] \geq 2.5$ Kanalisiert strömende Rauchgasschicht mit Unterzug	$\dot{m}_s = 0.89 \cdot (h / w)^{-0.92} \cdot (h_b \cdot \dot{m}_w / w)$
	Morgan Hansell *[62] [80]*	Balkon-/Anliegender-Überlauf-Plume $w_s >> d_s$ Kanalisiert strömende Rauchgasschicht ohne Unterzug	$\dot{m}_s = C_e \cdot U \cdot h_s^{3/2} \cdot w_s / \{ w_s^{2/3} + C_d^{-1} \cdot (C_e \cdot U / \sigma)^{2/3}\}^{3/2}$ $d_s = C_d^{-1} \cdot [\dot{m}_s / (\sigma \cdot w_s)]^{2/3}$
	BSI PD 7974-2 *[82]*	Balkon-/Anliegender-Überlauf-Plume Kanalisiert strömende Rauchgasschicht ohne Unterzug	$\dot{m}_s = 0.09 \cdot \dot{Q}_c^{1/3} \cdot h_s \cdot w_s^{2/3}$
	Harrison Spearpoint [4] *[86]*	Balkon-/Anliegender-Überlauf-Plume Nicht kanalisiert strömende Rauchgasschicht ohne Unterzug	$\dot{m}_s = 2/3 \cdot C_d^{'3/2} \cdot w_s \cdot \rho_\infty / T_{s,max} \cdot [2 \cdot g \cdot (T_{s,max} - T_\infty) \cdot T_\infty]^{1/2} \cdot d_s^{3/2} \cdot \kappa_m$ $d_s = C_d^{-1} \cdot [\dot{m}_s / (\sigma \cdot w_s)]^{2/3}$

Tab. 16: Vereinfachte Naturbrandmodelle für horizontal strömende Rauchgasschichten

Bemerkungen, Abbildungen

C_e nach Tabelle 15.2

C_d nach Tabelle 17.2

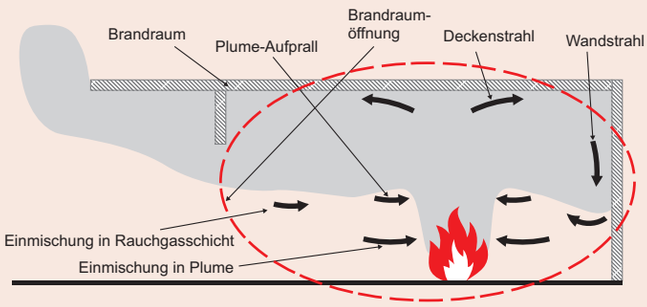


Abb. 27: Einmischprozesse im Brandraum (1. Strömungsbereich)

C_d nach Tabelle 17.2

H.P. Morgan gibt für den konvektiven Anteil der Brandleistung die folgende Beziehung an: $\dot{Q}_c = 2/3 \cdot C_d^{3/2} \cdot w \cdot \rho_\infty / T_{w,max} \cdot [2 \cdot g \cdot (T_{w,max} - T_\infty) \cdot T_\infty]^{1/2} \cdot d_w^{3/2} \cdot c_p \cdot (T_{w,max} - T_\infty) \cdot \kappa_q$

Grobe Annahme, die eine ungünstige geometrische Anordnung berücksichtigt und weit auf der sicheren Seite liegt

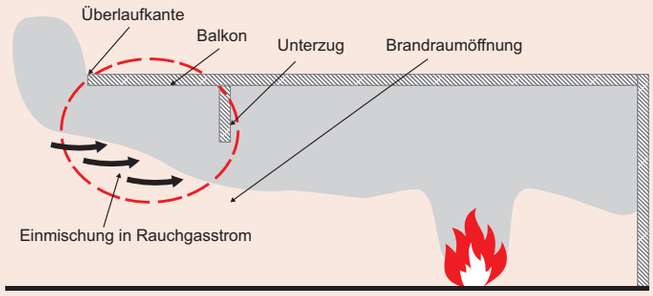


Abb. 28: Einmischung zwischen der Brandraumöffnung und der Überlaufkante (2. Strömungsbereich)

Grober ingenieurmässiger Ansatz

a nach Tabelle 17.3

Empirische Formel für eine grosse Bandbreite an typischen Brandraumöffnungsgeometrien

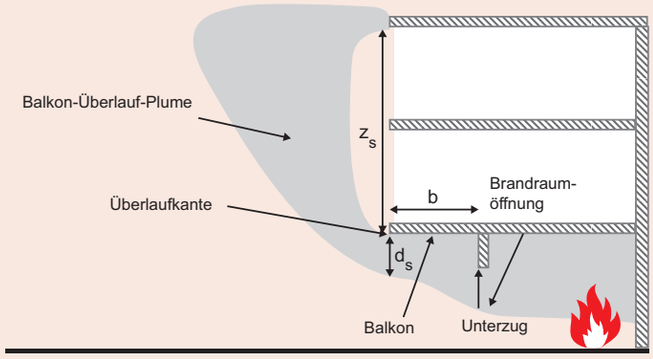


Abb. 29: Balkon-Überlauf-Plume

C_d = 1.0 (kein Unterzug)

C_e = 0.34 (zellenartiger Brandraum)

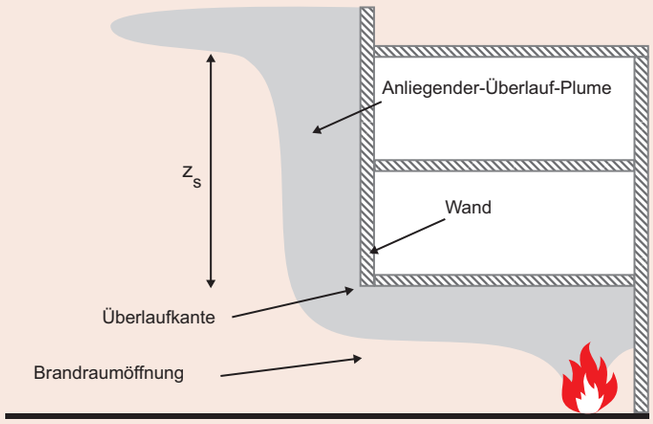


Abb. 30: Anliegender-Überlauf-Plume

C_d' nach Tabelle 17.4

Vereinfachte Naturbrandmodelle für nicht axialsymmetrische Plumes [1]

Modell		Anwendungsbereich Randbedingungen [3]	Rauchgasmassenstrom Rauchgasschichtdicke
Balkon-Überlauf-Plumes (3. Strömungsbereich) [2]	**Harrison Spearpoint** [4] *[86]*	2D-Balkon-Überlauf-Plume Kanalisiert strömende Rauchgasschicht unterhalb der Überlaufkante Kanalisiert aufsteigende Rauchgase oberhalb der Überlaufkante Pre-Flashover-Phase	$\dot{m}_{p,2D} = 0.16 \cdot \dot{Q}_c^{1/3} \cdot w_s^{2/3} \cdot z_s + 1.34 \cdot \dot{m}_s$ [5] $\dot{m}_{p,2D} = 0.16 \cdot \dot{Q}_c^{1/3} \cdot w_s^{2/3} \cdot (z_s + 3 \cdot d_s)$ [6] $d_s = C_d^{-1} \cdot [\dot{m}_s / (\sigma \cdot w_s)]^{2/3}$
		3D-Balkon-Überlauf-Plume $z_s \leq 3.4 \cdot (w_s^{2/3} + 1.56 \cdot d_s^{2/3})^{3/2}$ Kanalisiert strömende Rauchgasschicht unterhalb der Überlaufkante Pre-Flashover-Phase	$\dot{m}_{p,3D} = 0.16 \cdot \dot{Q}_c^{1/3} \cdot (w_s^{2/3} + 1.56 \cdot d_s^{2/3}) \cdot z_s + 1.34 \cdot \dot{m}_s$ [5] $\dot{m}_{p,3D} = 0.16 \cdot \dot{Q}_c^{1/3} \cdot w_s^{2/3} \cdot (z_s + 3 \cdot d_s) + 0.25 \cdot \dot{Q}_c^{1/3} \cdot d_s^{2/3} \cdot z_s$ [6] $d_s = C_d^{-1} \cdot [\dot{m}_s / (\sigma \cdot w_s)]^{2/3}$
		3D-Balkon-Überlauf-Plume $w/b \geq 2$ $z_s \leq 3.4 \cdot (w_s^{2/3} + 1.56 \cdot d_s^{2/3})^{3/2}$ Nicht kanalisiert strömende Rauchgasschicht unterhalb der Überlaufkante Pre-Flashover-Phase	$\dot{m}_{p,3D} = 0.16 \cdot \dot{Q}_c^{1/3} \cdot [(w + b)^{2/3} + 1.56 \cdot d_s^{2/3}] \cdot z_s + 1.34 \cdot \dot{m}_s$ [5] $d_s = C_d^{-1} \cdot [\dot{m}_s / (\sigma \cdot w_s)]^{2/3}$
		3D-Balkon-Überlauf-Plume $w/b < 2$ $z_s \leq 3.4 \cdot (w_s^{2/3} + 1.56 \cdot d_s^{2/3})^{3/2}$ Nicht kanalisiert strömende Rauchgasschicht unterhalb der Überlaufkante Pre-Flashover-Phase	
		3D-Balkon-Überlauf-Plume $z_s > 3.4 \cdot (w_s^{2/3} + 1.56 \cdot d_s^{2/3})^{3/2}$ Pre-Flashover-Phase	$\dot{m}_{p,3D} = 0.071 \cdot z_s^{5/3} \cdot \dot{Q}_c^{1/3}$

Tab. 17: Vereinfachte Naturbrandmodelle für nicht axialsymmetrische Plumes

Bemerkungen, Abbildungen

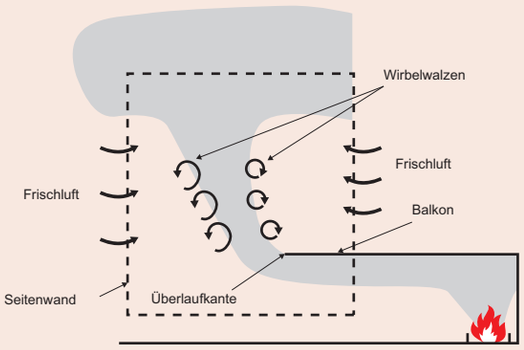


Abb. 31: 2D-Balkon-Überlauf-Plume mit seitlich abschliessenden Wänden (3. Strömungsbereich)

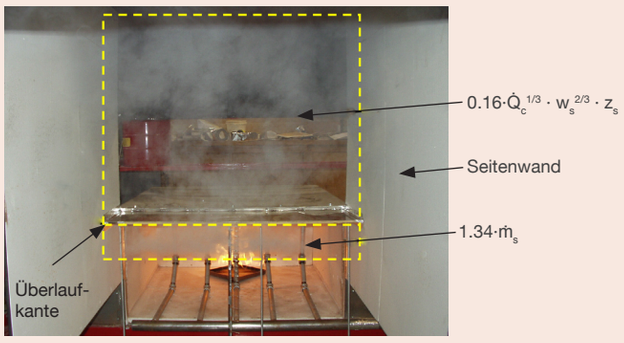
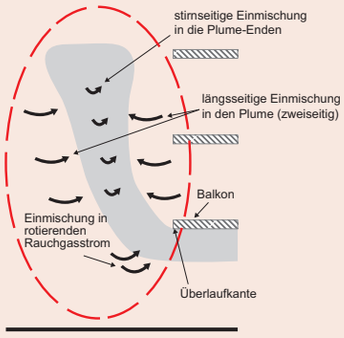


Abb. 32: 2D-Balkon-Überlauf-Plume mit seitlich abschliessenden Wänden und markierten Einmischbereichen

3D-Anliegender-Überlauf-Plume



3D-Balkon-Überlauf-Plume

Abb. 33: Einmischung oberhalb der Überlaufkante mit freiem (rechts) und anliegendem (links) 3D-Überlauf-Plume (3. Strömungsbereich)

Vereinfachter Modellansatz, der eine komplexe Rauchgasströmung beschreibt und daher nur für Grobentwürfe verwendet werden sollte.

Weil unterhalb der Überlaufkante die Gleichförmigkeit betreffend Schichtdicke, Temperatur- und Geschwindigkeitsverteilung im Strömungsquerschnitt nicht gegeben ist, ist die Modellungenauigkeit grösser. Idealerweise sollte die Untersuchung mit einem CFD-Modell begleitet werden.

Für solche Fälle existieren derzeit keine algebraischen Formeln, die zu belastbaren Ergebnissen führen, sodass CFD-Modelle verwendet werden sollten. Anhand des CFD-Modells „FDS“ (LES-Turbulenzmodell) durchgeführte Sensitivitätsanalysen von 3D-Balkon-Überlauf-Plumes mit unterhalb der Überlaufkante kanalisiert strömender Rauchgasschicht zeigen, dass bei Objekten in Originalgrösse die Modellierung der strömungsrelevanten Bereiche mit höchstens 0.25 m grossen Gitterabmessungen realistische Ergebnisse zulässt. [86], S. 336-337

Sensitivitätsanalysen von 3D-Balkon-Überlauf-Plumes ohne kanalisiert strömende Rauchgasschicht unterhalb der Überlaufkante sind Gegenstand der Masterarbeit von H.Y. Tiong. *[93]*

Durch die Einmischung von Umgebungsluft in die seitlichen, schmalen Enden des 3D-Balkon-Überlauf-Plumes, entwickelt sich dieser mit höher werdender Aufstiegshöhe zu einem axialsymmetrischen Plume (vgl. Tabelle 15).

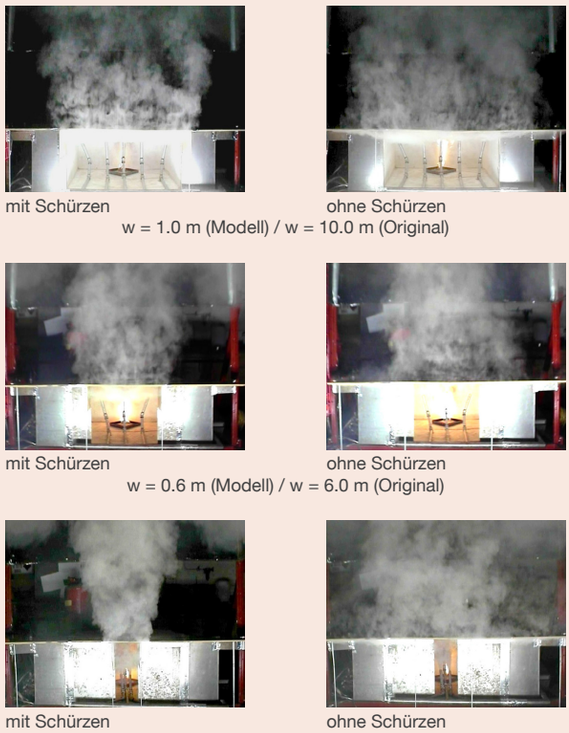


Abb. 34: Verhalten eines 3D-Balkon-Überlauf-Plumes bei unterschiedlichen Brandraumöffnungsweiten, mit/ohne Schürzen unter dem Balkon

Vereinfachte Naturbrandmodelle für nicht axialsymmetrische Plumes [1]

Modell		Anwendungsbereich Randbedingungen [3]	Rauchgasmassenstrom Rauchgasschichtdicke
Anliegende-Überlauf-Plumes (3. Strömungsbereich) [2]	**Harrison Spearpoint** [4] *[86]*	2D-Anliegender-Überlauf-Plume Kanalisiert aufsteigende Rauchgase oberhalb der Überlaufkante Pre-Flashover-Phase	$\dot{m}_{p,2D} = 0.08 \cdot \dot{Q}_c^{1/3} \cdot w_s^{2/3} \cdot z_s + 1.34 \cdot \dot{m}_s$ [7] $d_s = C_d^{-1} \cdot [\dot{m}_s / (\sigma \cdot w_s)]^{2/3}$
		3D-Anliegender-Überlauf-Plume $w_s/d_s \leq 13$ Pre-Flashover-Phase	$\dot{m}_{p,3D} = 0.3 \cdot \dot{Q}_c^{1/3} \cdot w_s^{1/6} \cdot d_s^{1/2} \cdot z_s + 1.34 \cdot \dot{m}_s$ [5] $d_s = C_d^{-1} \cdot [\dot{m}_s / (\sigma \cdot w_s)]^{2/3}$
		3D-Anliegender-Überlauf-Plume $w_s/d_s > 13$ Pre-Flashover-Phase Für 3D-Anliegende Überlauf-Plumes mit $w_s/d_s > 13$ sollte die Formel für 2D-Anliegende-Überlauf-Plumes verwendet werden. [86], S. 289	$\dot{m}_{p,3D} = 0.08 \cdot \dot{Q}_c^{1/3} \cdot w_s^{2/3} \cdot z_s + 1.34 \cdot \dot{m}_s$ $d_s = C_d^{-1} \cdot [\dot{m}_s / (\sigma \cdot w_s)]^{2/3}$
Anliegender-Überlauf-Plume (1. bis 3. Strömungsbereich) [2]	**NFPA 92B** *[25]*	3D-Anliegender-Überlauf-Plume Post-Flashover-Phase	$\dot{m}_{p,3D} = 0.68 \cdot (A_w \cdot h_w^{1/2})^{1/3} \cdot (z_s + y)^{5/3} + 1.59 \cdot A_w \cdot h_w^{1/2}$ $\dot{m}_{p,3D} = 0.68 \cdot (w \cdot h_w^{3/2})^{1/3} \cdot (z_s + y)^{5/3} + 1.59 \cdot w \cdot h_w^{3/2}$ wobei $y = 2.4 \cdot A_w^{2/5} \cdot h_w^{1/5} - 2.1 \cdot h_w$ $A_w = w \cdot h_w$

Tab. 17: Vereinfachte Naturbrandmodelle für nicht axialsymmetrische Plumes

Bemerkungen, Abbildungen

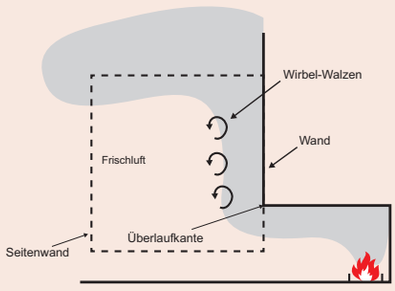
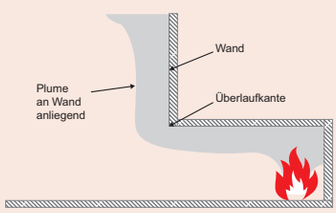


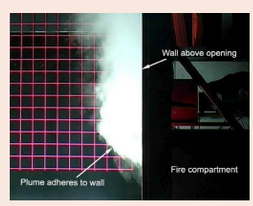
Abb. 35: 2D-Anliegender-Überlauf-Plume mit seitlich abschliessenden Wänden (3. Strömungsbereich)

Das Verhalten des 2D- und 3D-Anliegenden-Überlauf-Plumes in der Pre-Flashover-Phase hängt von den Eigenschaften der strömenden Rauchgasschicht unterhalb der Überlaufkante ab, namentlich von der Rauchgasschichtdicke d_s und von der Breite der strömenden Rauchgasschicht an der Überlaufkante w_s. [86], S. 288-289

w_s = 1.0 m (Modell)

w_s = 10 m (Original)

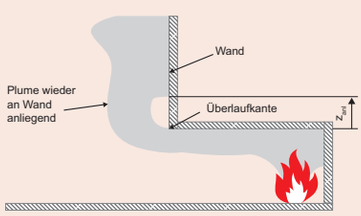


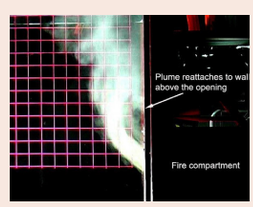


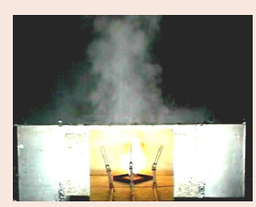
w_s = 0.6 m (Modell)

w_s = 6 m (Original)

$w_s/d_s > 3$



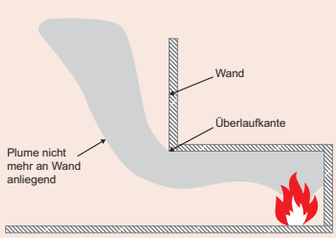


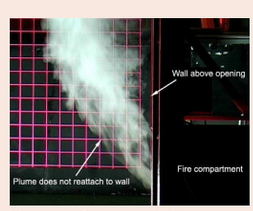


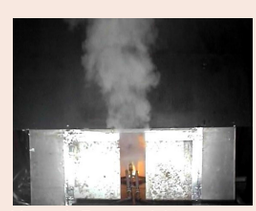
w_s = 0.2 m (Modell)

w_s = 2 m (Original)

$w_s/d_s \leq 3$

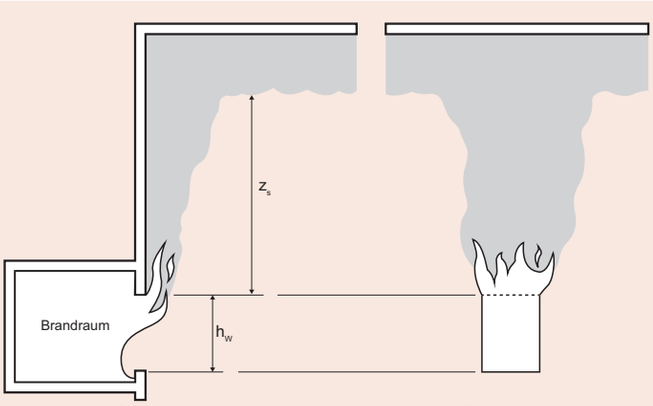






Schematisch | Versuch Seitenansicht | Versuch Frontansicht

Abb. 36: 3D-Anliegender-Überlauf-Plume mit unterschiedlichen Brandraumöffnungsbreiten [8)]



Seitenansicht | Frontansicht

Abb. 37: 3D-Anliegender-Überlauf-Plume in der Post-Flashover-Phase

NFPA 92B gibt für die gesamte Brandleistung die folgende Beziehung an: $\dot{Q} = 1260 \cdot A_w \cdot h_w^{1/2}$. [25], S. 13

Erläuterungen zu Tabellen 16 und 17

[1)] Horizontale Strömungen von deckennahen Rauchgasschichten werden durch den Aufprall einer auftriebsbehafteten Rauchgassäule an der Deckenuntersicht angetrieben. Hinsichtlich den bei Überlauf-Plumes (s.u.) möglichen Einmischprozessen sind die folgenden horizontalen Rauchgasmassenströme relevant:

- Rauchgasmassenstrom durch eine vertikale Brandraumöffnung,
- Rauchgasmassenstrom unter Vorsprüngen bzw. Balkonen und an Überlaufkanten.

Die **nicht axialsymmetrischen Plumes** werden anhand der räumlichen Konstellation wie folgt typisiert:

- Plumes an ebenen Wänden von Räumen (**Wand-Plumes**),
- Plumes in rechtwinkligen Ecken von Räumen (**Ecken-Plumes**),
- Plumes oberhalb der Kante von Vorsprüngen (**Überlauf-** bzw. **Linien-Plumes**).

Von **Wand-** und **Ecken-Plumes** existieren wenige empirische Formeln. Diese sind rudimentär, und weitere Forschungsarbeiten wären wünschenswert. Diesbezüglich sei auf die Fachliteratur verwiesen. *[88] [89]*

Ein **Überlauf-Plume** (auch Linien-Plume genannt) entsteht aus einer auftriebsbehafteten, sich im Allgemeinen seitlich ausbreitenden Rauchgasschicht, die durch eine vertikale Öffnung (Fenster, Tür) des Brandraums in einen angrenzenden höheren Gebäudebereich (Atrium) eindringt und dabei die Kante eines Vorsprungs bzw. Balkons umströmt und letztlich als breite, schmale Rauchgassäule zur Decke aufsteigt. Der Vorsprung kann auch mit Unterzügen (Fenster-, Türstürze) versehen sein.

[2)] Bei Überlauf-Plumes der Pre-Flashover-Phase entsteht der gesamte Rauchgasmassenstrom aus Einmischprozessen, die im Allgemeinen in den folgenden drei Strömungsbereichen stattfinden (vgl. Abbildung 38):

1. Strömungsbereich: Brandraum,

2. Strömungsbereich: Bereich zwischen der Brandraumöffnung und der Überlaufkante bzw. Vorsprung-Vorderkante,

3. Strömungsbereich: Bereich oberhalb der Überlaufkante.

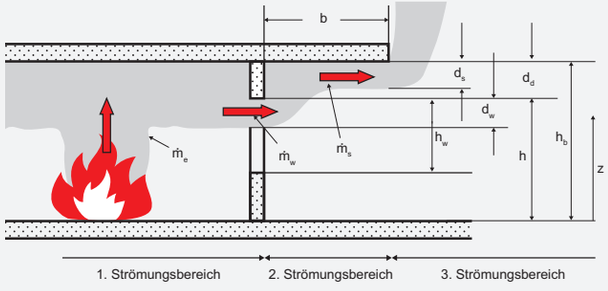


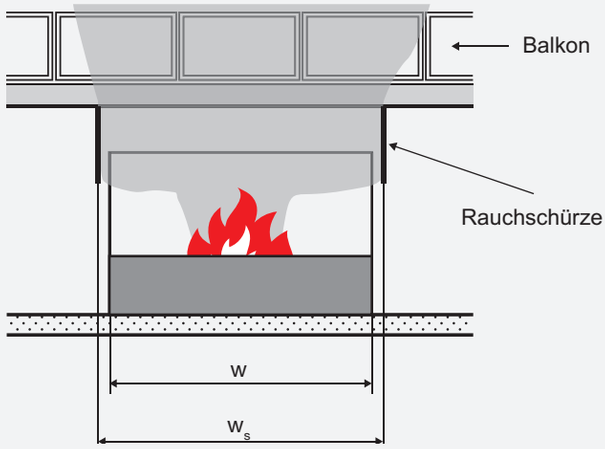
Abb. 38: Horizontaler Rauchgasmassenstrom an einer Brandraumöffnung und unter einem Vorsprung

Zum **1. Strömungsbereich**: Einmischprozesse im Brandraum (vgl. Abbildung 27)

Im Allgemeinen können die Abbrandrate (Massenverlustrate) des Brennstoffs, die Einmischung im Bereich des Zusammenstosses zwischen dem Plume und der Rauchgasschicht und die Einmischung in die sich horizontal bewegende Rauchgasschicht vernachlässigt werden, sodass für die Bestimmung des Rauchgasmassenstroms an der vertikalen Brandraumöffnung näherungsweise der in die Rauchgassäule eingemischte Umgebungsluftmassenstrom massgebend ist.

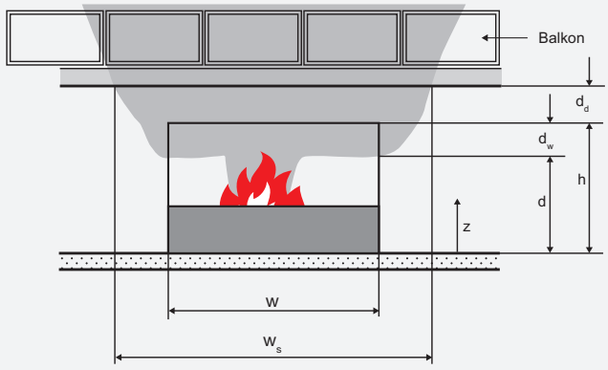
Zum **2. Strömungsbereich**: Einmischprozesse zwischen der Brandraumöffnung und der Überlaufkante (vgl. Abbildung 28)

Die Menge der eingemischten Umgebungsluft hängt von der Breite der vertikalen Brandraumöffnung und von der Höhe des Unterzuges ab. Fehlt ein Unterzug, so ist die zusätzlich eingemischte Umgebungsluft nicht signifikant. Die aus der vertikalen Brandraumöffnung ausströmenden Rauchgase breiten sich unter dem Vorsprung seitlich ungehindert aus, bis diese auf ein Hindernis (Seitenwand, Schürze etc.) treffen oder die thermischen Kräfte verschwinden. Daher lässt sich mit unter dem Vorsprung angeordneten Rauchschürzen die laterale Ausdehnung der Rauchgasschicht und folglich die eingemischte Umgebungsluft in den ins angrenzende Atrium aufsteigenden Überlauf-Plume begrenzen (vgl. Abbildungen 39-40).



Kanalisiert strömende Rauchgasschicht (mit Rauchschürzen)

Abb. 39: Laterale Ausdehnung eines Überlauf-Plumes mit Rauchschürzen



Nicht kanalisiert strömende Rauchgasschicht (ohne Rauchschürzen)

Abb. 40: Laterale Ausdehnung eines Überlauf-Plumes ohne Rauchschürzen

Zum **3. Strömungsbereich**: Einmischprozesse oberhalb der Überlaufkante (vgl. Abbildungen 31 und 33)

Die unter dem Vorsprung fliessende Rauchgasschicht rotiert um die Überlaufkante, worauf sie im Atrium als Rauchgassäule (Plume) hochsteigt. Die Menge der dabei eingemischten Umgebungsluft hängt von der Form des Überlauf-Plumes ab, wobei zu unterscheiden ist zwischen

- **Balkon-Überlauf-Plume** mit freiem, nicht anliegendem Plume und längsseits zweiseitiger Einmischung (vgl. Abbildung 29) und
- **Anliegendem-Überlauf-Plume** mit längsseits einseitiger Einmischung (vgl. Abbildung 30).

Die Existenz einer über der Kante angeordneten Wand beeinflusst das Verhalten des Plumes oberhalb der Überlaufkante, der wiederum auf die Rauchgasströmung unterhalb des Vorsprungs einwirkt. Somit scheint der sich stromabwärts bildende Plume einen Strömungswiderstand zu erzeugen, der das stromaufwärts anstehende Strömungsbild beeinflusst. [86], S. 15-20

Im Weiteren ist zu unterscheiden zwischen

- **Überlauf-Plumes der Pre-Flashover-Phase** mit im Brandraum verbleibenden Flammen (thermal spill plumes);
- **Überlauf-Plumes der Post-Flashover-Phase** mit ins Atrium und in die aufsteigende Rauchgassäule eindringenden Flammen (flame spill plumes);
- **zweidimensionalen Überlauf-Plumes** (2D-Plumes) ohne Einmischung von Umgebungsluft an den stirnseitigen, schmalen Enden des Plumes (was das Vorhandensein von begrenzenden Seitenwänden voraussetzt; vgl. Abbildungen 31-32);
- **dreidimensionalen Überlauf-Plumes** (3D-Plumes) mit stirnseitiger Einmischung von Umgebungsluft über die ganze Aufstiegshöhe des Plumes (vgl. Abbildung 33).

Die Einmischvorgänge von Überlauf-Plumes der Post-Flashover-Phase sind wenig erforscht. Diesbezüglich wurden lediglich Formeln für den Anliegenden-Überlauf-Plume publiziert. [86], S. 13, S. 20

In der britischen Literatur wird der Massenstrom für jeden Strömungsbereich gesondert ausgewiesen. Dagegen werden in der amerikanischen Literatur die drei Strömungsbereiche oft zusammengefasst. Im vorliegenden Handbuch soll die Bezeichnung „Plume“ ausschliesslich einer vertikal aufsteigenden Rauchgassäule vorbehalten werden, weshalb die Modelle für horizontal strömende Rauchgasschichten und diejenige für nicht axialsymmetrische Plumes in separaten Tabellenteilen zusammengestellt werden.

[3] Weitere Randbedingungen sind der in Spalte 1 aufgeführten Fachliteratur zu entnehmen. Beispielsweise wird für alle Modelle, welche die Einmischung von Umgebungsluft in den Überlauf-Plume beschreiben, die grundlegende Annahme getroffen, dass im Strömungsquerschnitt der Rauchgase, unterhalb der Überlaufkante, Gleichförmigkeit betreffend Schichtdicke, Temperatur- und Geschwindigkeitsverteilung herrscht. [86], S. 43

[4] R. Harrison und M. Spearpoint führten ihre Versuche mit den folgenden Brandleistungen und Brandraumöffnungsbreiten durch: $\dot{Q}$ = 1.6-4.7 MW bzw. w = 2.0-10.0 m (von der Versuchsmodellgrösse auf Originalgrösse umgerechnete Werte). [86], S. 117

[5] Von R. Harrison und M. Spearpoint, anhand eigener Versuche, weiter entwickelte Gleichung von P.H. Thomas, H.P. Morgan und N.R. Marshall. [90]

[6] Von R. Harrison und M. Spearpoint, anhand eigener Versuche, weiter entwickelte Gleichung von S.-L. Lee und H.W. Emmons. [91]

[7] Von R. Harrison und M. Spearpoint, sowohl anhand eigener Versuche als auch anhand der Versuche von N.R. Marshall, M. Poreh und A. Regev, weiter entwickelte Gleichung von P.H. Thomas, H.P. Morgan und N.R. Marshall. [90] [92]

[8] Das Verhalten 3D-Anliegender-Überlauf-Plumes hängt stark von der Brandraumöffnungsbreite w ab. Dabei sind die folgenden 3 Fälle zu unterscheiden:

- Bei grosser Brandraumöffnungsbreite legt sich die Rauchgassäule unmittelbar an die Wand an.
- Aus mittelgrossen Brandraumöffnungsbreiten entweichende Rauchgassäulen lösen sich zunächst von der Wand ab, rollen aber wenig später wieder zurück und legen sich wiederum an die Wand an, falls $w_s/d_s > 3$ ist. Falls $w_s/d_s \leq 3$ beträgt, legen sich die Rauchgassäulen nicht mehr an die oberhalb der Überlaufkante aufsteigende Wand an. Die Höhe, bei der sich der Plume wieder an die Wand anlegt, lässt sich anhand der folgenden empirischen Relation bestimmen: $z_{anl} = 8 \cdot d_s^2 / w_s$.
- Bei kleiner Brandraumöffnungsbreite heftet sich die Rauchgassäule nicht an die Wand an. [86], S. 288-289

Formelzeichen für horizontal strömende Rauchgasschichten und für nicht axialsymmetrische Plumes (vgl. Abbildungen 38-40)		
Zeichen	**Bezeichnung**	**Einheit**
a	Einmischkoeffizient (vgl. Tabelle 17.3)	
A_w	Fläche der Fensteröffnung ($A_w = w \cdot h_w$)	m^2
b	Tiefe des Unterzuges	m
c	spezifische Wärmekapazität der Rauchgase in der Rauchgasschicht (c = 1.01 kJ/(kg·K) nach [27])	kJ/(kg·K)
d_d	Höhe des Unterzuges	m
d_s	Dicke der strömenden Rauchgasschicht unterhalb bzw. an der Überlaufkante	m
d_w	Dicke der strömenden Rauchgasschicht in der vertikalen Brandraumöffnung	m
C_d	Durchflusskoeffizient (vgl. Tabelle 17.2)	
C_d'	Durchflusskoeffizient (vgl. Tabelle 17.4)	
C_e	Einmischkonstante (vgl. Tabelle 15.2)	$kg \cdot s^{-1} \cdot m^{-5/2}$
c_p	spezifische Wärmekapazität bei konstantem Druck	J/(kg·K)
g	Erdbeschleunigung (9.81 m/s^2)	m/s^2
h	Höhe der vertikalen Öffnungsoberkante über dem Boden	m
h_b	Höhe der Balkon-Untersicht über dem Boden	m
h_s	Höhe der Überlaufkante über dem Boden; in der Regel gilt: $h_s = h_b$ beim Balkon-Überlauf-Plume bzw. $h_s = h$ beim Anliegenden-Überlauf-Plume	m
h_w	Höhe der vertikalen Brandraumöffnung	m
$\dot{m}_{p,2D}$	Rauchgasmassenstrom oberhalb der Überlaufkante eines 2D-Plumes	kg/s
$\dot{m}_{p,3D}$	Rauchgasmassenstrom oberhalb der Überlaufkante eines 3D-Plumes	kg/s
$\dot{m}_s$	Rauchgasmassenstrom unterhalb bzw. an der Überlaufkante	kg/s
$\dot{m}_w$	Rauchgasmassenstrom, der durch die vertikale Brandraumöffnung strömt	kg/s
$\dot{Q}$	Gesamte Brandleistung unterhalb bzw. an der Überlaufkante	kW
$\dot{Q}_c$	konvektive Brandleistung unterhalb bzw. an der Überlaufkante	kW
T_b	Temperatur in der strömenden Rauchgasschicht unterhalb bzw. an der Überlaufkante	K
$T_{s,max}$	maximale Temperatur in der strömenden Rauchgasschicht unterhalb bzw. an der Überlaufkante	K
$T_{w,max}$	maximale Temperatur in der strömenden Rauchgasschicht bei der vertikalen Brandraumöffnung	K
T_∞	Umgebungstemperatur	K
U	Umfang der Brandfläche	m
w	Breite der vertikalen Brandraumöffnung	m
w_s	Breite der strömenden Rauchgasschicht an der Überlaufkante (vgl. Abbildungen 39-40)	m
z_{anl}	Höhe über der Überlaufkante, bei der sich ein 3D-Anliegender-Überlauf-Plume an die Wand anlegt	m
z_s	Abstand zwischen der Überlaufkante und der unteren Grenzfläche der Rauchgasschicht	m
κ_m	Korrekturfaktor für das Profil des Massenstroms; in der Regel gilt: $\kappa_m = 1.3$	
κ_q	Korrekturfaktor für das Profil der konvektiven Brandleistung; in der Regel gilt: $\kappa_q = 0.95$	
ρ_∞	Dichte der Umgebungsluft	kg/m^3
σ	Koeffizient, der verschiedene Parameter kombiniert; in der Regel gilt: $\sigma = 2.0$	$kg \cdot s^{-1} \cdot m^{-5/2}$

Tab. 17.1: Formelzeichen für horizontal strömende Rauchgasschichten und für nicht axialsymmetrische Plumes

Durchflusskoeffizient C_d		
C_d	Bedingung	Erläuterung
1.00	$0 \le d_d \le 0.25 \cdot d_W$	Öffnungen mit vernachlässigbaren Unterzugshöhen
0.80	$0.25 \cdot d_W < d_d < 2 \cdot d_W$	Öffnungen mit mittelgrossen Unterzugshöhen
0.65	$2 \cdot d_W \le d_d$	Öffnungen mit grossen Unterzugshöhen

Tab. 17.2: Durchflusskoeffizient C_d

Einmischkoeffizient a			
Szenarium	Unterzug	Rauchschürzen *)	a
1	Nein	Ja	1.15
2	Ja	Ja	1.60
3	Nein	Nein	1.40
4	Ja	Nein	2.00

*) Zur Begrenzung der seitlichen Ausdehnung eines Überlauf-Plumes

Tab. 17.3: Einmischkoeffizient a

Durchflusskoeffizient C_d'		
C_d'	Bedingung	Erläuterung
1.00		Vorsprung ohne Unterzug und ohne Wand über der Überlaufkante (Balkon-Überlauf-Plume)
1.00	$w_s/d_s \ge 8$	Vorsprung ohne Unterzug und mit Wand über der Überlaufkante (Anliegender-Überlauf-Plume)
$0.05 \cdot w_s/d_s + 0.62$	$3 < w_s/d_s < 8$	
0.76	$w_s/d_s \le 3$	

Tab. 17.4: Durchflusskoeffizient C_d'

Hinweise

a) Weiterführende Fachliteratur

Die vorliegende Zusammenstellung enthält nur einfach anwendbare und durch Experimente neueren Datums in ihrer Robustheit bestätigte Modelle. Andere Modellansätze und eingehendere Erläuterungen zu Randbedingungen und relevanten Anwendungsbereichen sind in der Fachliteratur, wie z.B. in [86], zu finden.

b) Flashover (Feuerüberschlag)

Der Flashover kennzeichnet den Übergang von der Brandausbreitungs- in die Vollbrandphase. In einem geschlossenen Raum ist nach erfolgtem Flashover die gesamte Oberfläche der brennbaren Stoffe am Brand beteiligt.

Werden mit algebraischen oder numerischen Methoden über 600 °C heisse Rauchgasschichttemperaturen ermittelt, so kann ein Vollbrand unterstellt werden.

Es gibt die folgenden Flashover-Parameter (vgl. Tabelle 17.5):

- Flashover-Temperatur in der Heissgasschicht ΔT_{fo}
- Spezifische Wärmestrahlung aus der Heissgasschicht zur zeitgleichen Entzündung der gesamten Brandlast im Raum $\dot{q}_{fo}$
- Flashover-Zeit t_{fo}
- Brandausbreitungsgeschwindigkeit v_{fo}

Flashover-Parameter			
Parameter	Wertebereich	Mittelwert	Einheit
ΔT_{fo}	500-700	600	°C
$\dot{q}_{fo}$	15-30	20	kW/m²
t_{fo}	10-15	12	min
v_{fo}	4.80-7.20	6	m/min

Tab. 17.5: Flashover-Parameter

Die effektive Flashover-Temperatur hängt von mehreren Einflussfaktoren ab, wie z.B. Brandraumgeometrie, Brandraumvolumen, Brandlast, Brennstoff, Ventilationsverhältnisse.

Zwischen den Wertebereichen für Heissgasschicht-Temperatur und -Wärmestrahlung existiert die folgende Abhängigkeit: Bei Temperaturen um 600 °C strahlt eine schwarze Rauchgasschicht, gemäss dem Stefan-Boltzmann-Gesetz ($\dot{q} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4$), mit mindestens 20 kW/m² nach unten auf brennbare Stoffe (ε = Emissionskoeffizient, σ = Stefan-Boltzmann-Konstante, T = Temperatur).

Einfache Formeln zur Überschlagung der minimalen Brandleistung, die in einem Raum einen Flashover zu erzeugen vermag, sind in Tabelle 17.6 zu finden.

Die Formeln zur näherungsweisen Bestimmung von $\dot{Q}_{fo}$ sollten nur dann angewendet werden, wenn die geometrischen Randbedingungen des zu beurteilenden Raumes mit denjenigen des Versuchsraumes übereinstimmen. [94], S. 29-30

Brandleistung zur Erzeugung eines Flashovers	
Babrauskas	$\dot{Q}_{fo} = 750 \cdot A_w \cdot h^{0.5}$
McCaffrey, Quintiere, Harkleroad	$\dot{Q}_{fo} = 610 \cdot [U \cdot A_T \cdot A_w \cdot (h)^{0.5}]^{0.5}$
Thomas	$\dot{Q}_{fo} = 7.8 \cdot A_T + 378 \cdot A_w \cdot h^{0.5}$

$\dot{Q}_{fo}$	Brandleistung zur Erzeugung eines Flashovers [kW]
A_T	für die Wärmeübertragung relevante totale Raumoberfläche (inkl. Türquerschnitt, exkl. Zuluftöffnungsquerschnitt) [m²]
A_w	Fläche der Zuluftöffnung [m²]
h	Höhe der Zuluftöffnung [m]
U	effektiver Wärmedurchgangskoeffizient [kW/(m²·K)]

Tab. 17.6: Brandleistung zur Erzeugung eines Flashovers

Konstante Brandleistung [1)]

Modell	Bemessungsbrände

CEN/TR 12101-5
BS 7346-4
BS 7346-7
[29] [45] [95]

Bemessungsbrände nach CEN/TR 12101-5, BS 7346-4 und BS 7346-7

Nutzung	Brandfläche [m^2]	Brandumfang [m]	$\dot{q}_{max}$ [kW/m^2]	$\dot{Q}_{max}$ [MW]
Verkauf				
• mit Normalsprinkler	10	12	625	6.25
• mit schnell ansprechendem Sprinkler	5	9	625	3.13
Grossraumbüro				
• mit Normalsprinkler	16	14	225	3.60
• ohne Sprinkler	47	24	255	11.99
Hotelzimmer mit Normalsprinkler	2	6	250	0.50
Einstellhalle mit einem brennenden PKW (CEN/TR 12101-5 und BS 7346-4)	10	12	400	4.00
Einstellhalle				
• ohne Sprinkler (BS 7346-7)	25	20	320	8.00
• mit Sprinkler (BS 7346-7)	10	14	400	4.00
• mit mechanischem Parksystem (2er-Stapel) und Sprinkler (BS 7346-7)	10	14	600	6.00

Tab. 18.1: Bemessungsbrände nach CEN/TR 12101-5, BS 7346-4 und BS 7346-7

NFPA 92B
NFPA 204
[25] [31]

Bemessungsbrände nach NFPA 92B und NFPA 204

Nutzung	$\dot{q}_{max}$ [kW/m^2]	$\dot{Q}_{max}$ [MW]	Nutzung	$\dot{q}_{max}$ [kW/m^2]	$\dot{Q}_{max}$ [MW]
Büro ohne Sprinkler	290		Möblierte Wohnung		4.0-8.0
Hotelzimmer	249		Matratze in Wohnung		1.2
Industriegebäude	260				

Tab. 18.2: Bemessungsbrände nach NFPA 92B und NFPA 204

VdS 2827
[60]

Bemessungsbrände nach VdS 2827

Nutzung	$\dot{q}_{max}$ [kW/m^2]	$\dot{Q}_{max}$ [MW]	Nutzung	$\dot{q}_{max}$ [kW/m^2]	$\dot{Q}_{max}$ [MW]
Büros mit Sprinkler	115		Einkaufszentrum mit Sprinkler	556	5.0
Hotelzimmer ohne Sprinkler		1.0	Einstellhalle (PKW-Brand)		2.5
Hotelzimmer mit Sprinkler		0.5	Warenannahme (Brand eines Sattelschlepper-Aufliegers)		7.0
Wohnung	500				

Tab. 18.3: Bemessungsbrände nach VdS 2827

Tab. 18: Konstante Brandleistung

Bemessungsgrundlagen, Bemerkungen

Bemessungsgrundlagen

In der Nähe des Brandherdes werden für den konvektiven Energiestrom 80 % der Brandleistung angesetzt (bzw. 66 % für Grossraumbüros gemäss [80]).

Bemerkungen

Im Entwurfsvorschlag zur europäischen Norm EN 12101-5 wurden die Inhalte der vom British Research Establishment (BRE) publizierten Berichte für überdachte Einkaufsstrassen (BR 186) und für Atrien (BR 258) aufgenommen. Dieser Vorschlag wurde jedoch aus politischen Gründen – es handelt sich um eine Bemessungsnorm, und in diesem Bereich wollten sich die Mitgliedsstaaten die Planungshoheit nicht entziehen lassen – nicht als Euronorm veröffentlicht. Dennoch erfuhr der Entwurfsvorschlag eine grosse Verbreitung und wurde sowohl als Buch (BR 258) als auch als englische Norm (BS 7346-4) und als technische Richtlinie der CEN (CEN/TR 12101-5) veröffentlicht. *[29] [45] [62] [96] [80]*

Bemessungsgrundlagen

Die angegebenen Brandleistungswerte gelten für brandlastgesteuerte Brände, bei denen die Abbrandgeschwindigkeit nicht durch die Heissgasschicht beeinflusst wird. [25], S. 30; [31], S. 64

Bemerkungen

NFPA 92B und NFPA 204 beinhalten mehrere Tabellen mit Brandleistungen für zahlreiche Zündquellen (vgl. Tabelle 18.6), Gebrauchsgüter und Lageranordnungen. Brandleistungen zu weiteren möglichen Zündquellen sind in Tabelle 18.5 zu finden.

Bemessungsgrundlagen

Die angegebenen Brandleistungswerte gelten für brandlastgesteuerte Brände, bei denen die Abbrandgeschwindigkeit nicht durch die Heissgasschicht beeinflusst wird.

Bemerkungen

Die Tabellen 7-9 von VdS 2827 beziehen sich auf verschiedene Literaturquellen, neben NFPA 92B und NFPA 204 unter anderem auf die beiden vom British Research Establishment (BRE) publizierten Berichte BR 186 und BR 258. *[25] [31] [62] [96]*

Die den BRE-Berichten BR 186 und BR 258 entnommenen Brandleistungswerte für gesprinklerte Einkaufszentren umfassen lediglich den konvektiven Anteil des Energiestroms (80 %) und stimmen demnach mit den die Konvektions- und Strahlungsanteile enthaltenden Leistungswerten von CEN/TR 12101-5 und BS 7346-4 überein.

Konstante Brandleistung [1)]

Modell

Vereinfachtes Naturbrandmodell für vollentwickelte Raumbrände

[20] [41]

Bemessungsbrände

Bemessungsbrände für vollentwickelte Raumbrände

Nutzung	Maximale Brandleistung	
	brandlastgesteuerte Brände	ventilationsgesteuerte Brände
Wohn-, Büro- und vergleichbare Nutzungen	$\dot{Q}_{max,f} = 0.25 \cdot 10^3 \cdot A_{max}$	$\dot{Q}_{max,v} = 1.21 \cdot 10^3 \cdot A_o \cdot h_o^{1/2}$
Räume mit beliebigen Nutzungen	$\dot{Q}_{max,f} = v_{ab} \cdot A_{max} \cdot \chi \cdot H_u$	$\dot{Q}_{max,v} = 0.1 \cdot \chi \cdot H_u \cdot A_o \cdot h_o^{1/2}$

$\dot{Q}_{max,f}$	maximale Gesamt-Brandleistung des brandlastgesteuerten Brandes [kW]
$\dot{Q}_{max,v}$	maximale Gesamt-Brandleistung des ventilationsgesteuerten Brandes [kW]
A_{max}	maximale Brandfläche, in der Regel die Grundfläche des Brandraumes [m^2]
A_O	Fläche der Ventilationsöffnungen [m^2]
h_O	gemittelte Höhe der Ventilationsöffnungen [m]
H_u	Heizwert der Stoffe (H_u = 17300 kJ/kg für Holz, vgl. auch Tabelle 11) [kJ/kg]
v_{ab}	flächenspezifische Abbrandrate [kg/m^2·s]
χ	Verbrennungseffektivität (χ = 0.7 für Mischbrandlasten, vgl. auch Tabelle 11) [-]

Tab. 18.4: Bemessungsbrände für vollentwickelte Raumbrände

Modelle und Daten zur Ermittlung der Brandleistungen für vollentwickelte Raumbrände lassen sich auch anderen als den hier erwähnten Quellen entnehmen, wie z.B. den Publikationen *[97]* oder *[98]*.

Tab. 18: Konstante Brandleistung

Brandleistung typischer Zündquellen

Gegenstand	$\dot{Q}$	Gegenstand	$\dot{Q}$
Zigarette	5 W	Papierkorb klein	30-50 kW
Streichholz	50-150 W	Papierkorb gross	50-150 kW
Gasfeuerzeug	70 W	Reisegepäck	75-150 kW
Papierlunte	1.4 kW	Polsterstuhl	150-250 kW
Glühbirne	60 W	Moderner Sessel	350-750 kW
Kerze	80 W	Couch	1-3 MW
Wunderkerze	390 W	Weihnachtsbaum	1-2 MW
Fackel (Paraffin in Jute-Gewebe)	3 kW	3 m hoher Holzpalettenstapel	7.0 MW
Flamme einer Spray-Dose	15 kW	Wohn- bzw. Schlafzimmer	bis 10 MW
Gasbrenner für Flämmarbeiten	60 kW	0.2 m^2 grosse Benzinlache (0.2 l)	15 kW
Kissen	20-80 kW	0.3 m^2 grosse Benzinlache (0.2 l)	30 kW
Papierkissen DIN 5510-2	11 kW	1 m^2 grosse Benzinlache	2.5 MW
Knüllpapier einer Zeitung	10 kW	4 l Ethanol auf ca. 2 m^2 textilem Bodenbelag	1.7 MW
Müllsack	50-300 kW		

Tab. 18.5: Brandleistung typischer Zündquellen

Bemessungsgrundlagen, Bemerkungen

Bemessungsgrundlagen

- Für brandlast- und ventilationsgesteuerte Brände von Wohn-, Büro- und vergleichbaren Nutzungen dürfen die Grundflächen der Räume bis zu 400 m² gross sein. [20], S. 73; [41], S. 10
- Für brandlastgesteuerte Brände in Räumen mit beliebiger Nutzung dürfen die Grundflächen maximal 400 m² gross sein. [20], S. 73
- Bei ventilationsgesteuerten Bränden in Räumen mit beliebiger Nutzung darf die Raumgrundfläche nach vfdb-TB 04-01 maximal 100 m² und nach DIN EN 1991-1-2/NA maximal 50 m² betragen. [20], S. 73; [41], S. 20
- Die Raumhöhe darf 6 m betragen. [20], S. 73; [41], S. 10
- Grundsätzlich gelten die Gleichungen für Räume mit einer Öffnung (Tür, Fenster). Sind mehrere Öffnungen vorhanden, so sollten diese die gleiche Brüstungs- und Sturzhöhe aufweisen. Dann dürfen die Flächen der Ventilationsöffnungen addiert werden. [99], S. 154

Bemerkungen

Bei Brandereignissen ist wegen des zufällig angeordneten Brandgutes und der nicht idealen Zuströmung der Verbrennungsluft eine vollständige Verbrennung erst bei einem Luftüberschuss von 100 % zu erwarten (Luftzahl $\lambda = 2$). [81], S. 50-51; *[56]*

Damit gilt für den Übergang vom ventilationsgesteuerten zum brandlastgesteuerten Brand das folgende Kriterium (vgl. Abbildung 42):

- ventilationsgesteuerter Brand: $\lambda < 2$
- brandlastgesteuerter Brand: $\lambda \geq 2$ [2) 3)]

Zündquellen nach NFPA 92B und NFPA 204	
Zündquelle	**$\dot{Q}$** [kW]
Lehnstuhl	160
Stuhl	63-66
Baumwoll-Gardinen	130-150
Papierkorb	4-18
Fernsehgerät	120-290

Tab. 18.6: Brandleistung typischer Zündquellen nach NFPA 92B und NFPA 204

Charakteristische CO/CO_2-Verhältnisse	
Brandzustand	**CO/CO_2**
Brandentwicklung	0.005-0.01
Vollbrand mit guter Ventilation	0.01-0.1
Vollbrand mit geringer Ventilation	> 0.1

Tab. 18.7: Charakteristische CO/CO_2-Verhältnisse

Erläuterungen zu Tabelle 18

[1)] Eine Beschreibung von Bränden mit einer zeitunabhängigen, maximalen Brandleistung über eine festgelegte Zeitdauer werden als „Steady-State-Brände“ bezeichnet (vgl. Abbildung 41). Steady-State-Brände gehen also davon aus, dass

- nach der Zündung die maximale Brandleistung rasch erreicht wird,
- die Brandleistung sich nicht ändert,
- eine brandlastgesteuerte Verbrennung mit unbeschränkter Luftzufuhr vorliegt.

Mit diesen Annahmen werden die Brandwirkungen in der Regel überschätzt. [60], S. 14

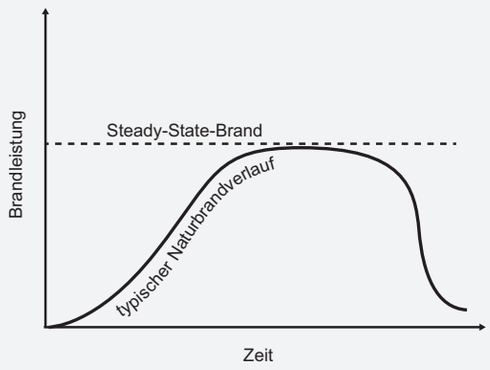


Abb. 41: Steady-State-Brände

[2)] Übergang vom ventilationsgesteuerten zum brandlastgesteuerten Brand.

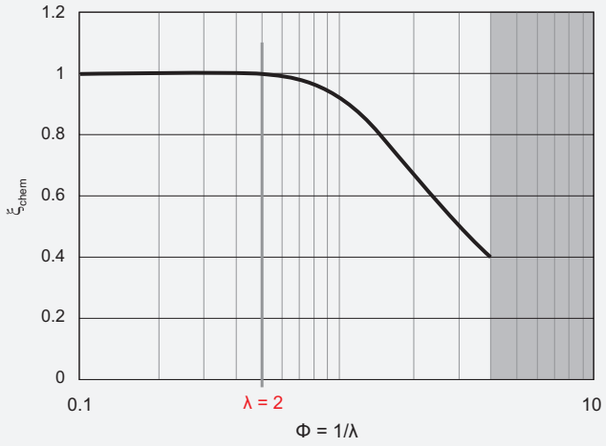
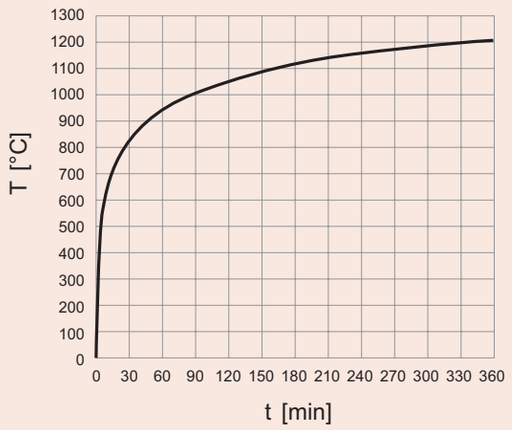
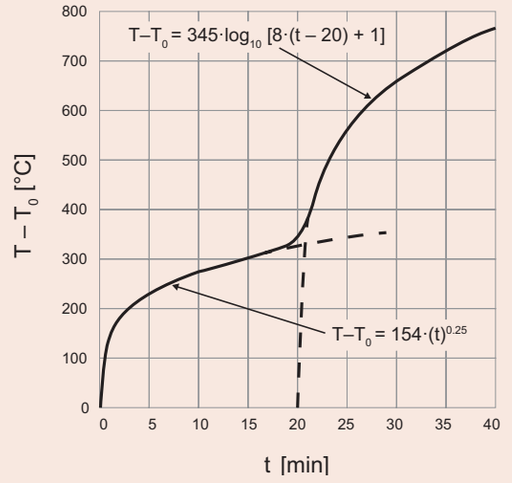
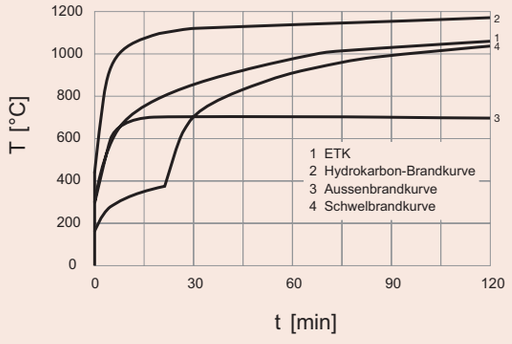


Abb. 42: Verhältniszahl ξ_{chem} der freigesetzten Energie zur maximal möglichen Energiefreisetzung in Abhängigkeit des Luftangebotes $\Phi = 1/\lambda$

[3)] Der Brandzustand lässt sich auch durch das Verhältnis der (molaren) CO/CO_2-Ausbeuten (CO/CO_2-Verhältnis) charakterisieren (vgl. Tabelle 18.7). [100], S. 101

Nominelle Temperaturzeitkurven

Modell	Formel	Abbildungen
Einheits-Temperatur-zeitkurve (ETK) *[2] [11] [101] [102]*	$T = 345 \cdot \log_{10}(8 \cdot t + 1) + T_0$ T mittlere Gastemperatur im Brandraum [°C] T_0 Ausgangstemperatur (T_0 = 20 °C) [°C] t Dauer der thermischen Einwirkung [min]	 Abb. 43: Einheits-Temperaturzeitkurve
Schwelbrandkurve *[2] [103] [104]*	$T = 154 \cdot (t)^{0.25} + T_0$ für $0 < t \leq 21$ min $T = 345 \cdot \log_{10}[8 \cdot (t - 20) + 1] + T_0$ für $t > 21$ min T mittlere Gastemperatur im Brandraum [°C] T_0 Ausgangstemperatur (T_0 = 20 °C) [°C] t Dauer der thermischen Einwirkung [min]	 Abb. 44: Schwelbrandkurve
Aussenbrandkurve *[11] [104]*	$T = 660 \cdot (1 - 0.687 \cdot e^{-0.32 \cdot t} - 0.313 \cdot e^{-3.8 \cdot t}) + T_0$ T mittlere Gastemperatur im Brandraum [°C] T_0 Ausgangstemperatur (T_0 = 20 °C) [°C] t Dauer der thermischen Einwirkung [min]	 Abb. 45: Aussenbrandkurve und Hydrokarbon-Brandkurve im Vergleich zur ETK und zur Schwelbrandkurve
Hydrokarbon-Brandkurve (Kohlenwasserstoffkurve) *[2] [11] [104]*	$T = 1080 \cdot (1 - 0.325 \cdot e^{-0.167 \cdot t} - 0.675 \cdot e^{-2.5 \cdot t}) + T_0$ T mittlere Gastemperatur im Brandraum [°C] T_0 Ausgangstemperatur (T_0 = 20 °C) [°C] t Dauer der thermischen Einwirkung [min]	

Tab. 19: Nominelle Temperaturzeitkurven

Anwendungsbereich

Auf Basis einer internationalen Vereinbarung dient die ETK der Bewertung des thermischen Verhaltens und der Leistung (Tragfähigkeit, Raumabschluss, Wärmedämmung) von im Hochbau verwendeten Produkten oder Konstruktionen unter Vollbrand-Bedingungen. [2], Nr. C 62/31

Die ETK legt – als eine von zahlreichen Prüfbedingungen einer Feuerwiderstandsprüfung – die Aufheizkurve für den Prüfofen fest. Sie gilt für vollständig in einem Brandabschnitt eingeschlossene Bauteile. [101], S. 14

Zur Berechnung der Wärmeübertragung vom Brand auf die brandbeanspruchten Oberflächen wird ein konvektiver Wärmeübergangskoeffizient von α_c = 25 W/m²·K verwendet. [11], S. 25

Kann bei einem Produkt ein nach der ETK geprüfter Feuerwiderstand unter Schwelbrandbedingungen erheblich reduziert werden, so wird zur Bewertung des thermischen Verhaltens und der Leistung die Verwendung der Schwelbrandkurve vorgeschlagen. [2], Nr. C 62/31; [104], S. 5-6

Sind Vollbrand-Bedingungen nicht zu erwarten, wie z.B. bei Bränden an Aussenwänden oder in grossvolumigen Gebäuden, so liegt eine im Vergleich zur ETK geringere Brandbeanspruchung vor, weil zusätzliche Möglichkeiten einer Wärmeabgabe existieren. In solchen Fällen ist die Aussenbrandkurve (externe Brandkurve) anwendbar. [104], S. 4-5

Die Aussenbrandkurve ist nur für die Beurteilung der Feuerwiderstandsdauer von raumabschliessenden Bauteilen relevant. Für die Beurteilung von Trägern und Stützen existieren andere Bewertungstechniken. [104], S. 4

Zur Berechnung der Wärmeübertragung vom Brand auf die brandbeanspruchten Oberflächen wird ein konvektiver Wärmeübergangskoeffizient von α_c = 25 W/m²·K verwendet. [11], S. 25

Bei sehr starken Bränden, wie z.B. bei Öllachenbränden, mit im Vergleich zur ETK höheren Temperaturen und schnelleren Temperaturanstiegen, kann zur Bewertung des thermischen Verhaltens und der Leistung die Hydrokarbon-Brandkurve verwendet werden. [2], Nr. C 62/31; [104], S. 3-4

Zur Berechnung der Wärmeübertragung vom Brand auf die brandbeanspruchten Oberflächen wird ein konvektiver Wärmeübergangskoeffizient von α_c = 50 W/m²·K verwendet. [11], S. 26

Brandleistungskurven

Modell	Formeln / Tabellen
αt^2-Modell *[18] [19] [25] [28] [31]*	$\dot{Q} = \alpha \cdot t^2 = \dot{Q}_0 \cdot (t/t_\alpha)^2$ mit $\alpha = \dot{Q}_0 / t_\alpha^2$

$\dot{Q}$ Brandleistung zum Zeitpunkt t [kW]

t Branddauer (ohne Schwelbrandphase) [s]

α Brandentwicklungsfaktor, Brandintensitätskoeffizient (kennzeichnet den nutzungsabhängigen Anstieg der Brandleistung) [kW/s², kJ/s³]

$\dot{Q}_0$ Referenz-Brandleistung:

- $\dot{Q}_0$ = 1000 kW nach ISO/TR 13387-2 und ISO/TS 16733. [18], S. 11; [19], S. 15
- $\dot{Q}_0$ = 1055 kW nach NFPA 92B und NFPA 204. [25], S. 8; [31], S. 11

t_α Referenz-Zeit [s], in welcher der Brand bis zum Erreichen der Referenz-Brandleistung $\dot{Q}_0$ anwächst. Werte für t_α sind beispielsweise in NFPA 204 und ISO/TS 16733 zu finden. *[19] [31]*

Für die Brandentwicklung werden die folgenden 4 typischen Kategorien verwendet:

Brandentwicklungs-Kategorien und Brandintensitätskoeffizienten von αt^2-Bränden

Brandentwicklungs-Kategorie	t_α [s]	Brandintensitätskoeffizient (α) [kW/s²]	
		NFPA 92B NFPA 204 BS 7346-5	ISO/TR 13387-2 ISO/TS 16733
langsam	600	0.002931	0.002778
mittel	300	0.011720	0.011110
schnell	150	0.046890	0.044440
sehr schnell	75	0.187600	0.177800

Tab. 20.1: Brandentwicklungs-Kategorien und Brandintensitätskoeffizienten von αt^2-Bränden

αt^2-Brände können als sich kreisförmig ausbreitende Brände mit verschiedenen Ausbreitungsgeschwindigkeiten v_{aus} und konstanter spezifischer Brandleistung $\dot{q}$ aufgefasst werden. Beispielhaft fasst Tabelle 20.2 die Brandausbreitungsgeschwindigkeiten v_{aus} für $\dot{q}$ = 300 kW/m² und $\dot{q}$ = 600 kW/m² zusammen.

Die kreisförmige Brandfläche A mit dem Radius r und die Brandleistung $\dot{Q}$ entwickeln sich dabei wie folgt: $A = \pi \cdot r^2 = \pi \cdot (v_{aus} \cdot t)^2$ sowie $\dot{Q} = \dot{q} \cdot A = \dot{q} \cdot \pi \cdot v_{aus}^2 \cdot t^2 = \alpha \cdot t^2$, woraus $\alpha = \dot{q} \cdot \pi \cdot v_{aus}^2$ folgt.

Brandentwicklungs-Kategorien und Brandausbreitungsgeschwindigkeiten von sich kreisförmig ausbreitenden αt^2-Bränden

Brandentwicklungs-Kategorie	t_α [s]	Brandausbreitungsgeschwindigkeit (v_{aus}) [m/min]			
		$\dot{q}$ = 300 kW/m²		$\dot{q}$ = 600 kW/m²	
		NFPA 92B NFPA 204 BS 7346-5	ISO/TR 13387-2 ISO/TS 16733	NFPA 92B NFPA 204 BS 7346-5	ISO/TR 13387-2 ISO/TS 16733
langsam	600	0.1058	0.1030	0.0748	0.0728
mittel	300	0.2116	0.2060	0.1496	0.1457
schnell	150	0.4232	0.4120	0.2993	0.2913
sehr schnell	75	0.8465	0.8241	0.5986	0.5827

Tab. 20.2: Brandentwicklungs-Kategorien und Brandausbreitungsgeschwindigkeiten von sich kreisförmig ausbreitenden αt^2-Bränden

Tab. 20: Brandleistungskurven

Bemessungsgrundlagen, Abbildungen, Anwendungsbereich

Bemessungsgrundlagen

- Abbrandrate $\dot{m}$, spezifische Brandleistung $\dot{q}$, Heizwert H_u und Brandausbreitungsgeschwindigkeit v_{aus} sind konstant und von Stoffeigenschaften unabhängig,
- kreisförmige Brandfläche mit zeitlich linear wachsendem Radius,
- Strahlungseffekte sind nicht berücksichtigt,
- Rauchgasschichttemperatur ≤ 550 °C (Pre-Flashover-Phase), [28], S. 21
- unbeschränkte Luftzufuhr (Brandlaststeuerung). [20], S. 65

Brandleistungskurven

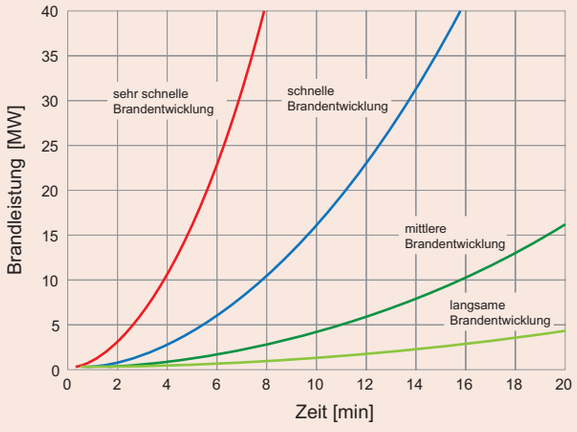


Abb. 46: Brandleistungskurven für das αt^2-Modell

Brandleistungen [MW]				
$t_{Brandentwicklung}$ [min]	**Brandentwicklungs-Kategorie**			
	langsam	**mittel**	**schnell**	**sehr schnell**
5	0.25	1	4	16
10	1	4	16	64
15	2.25	9	36	
20	9	36		

Brandleistungen für das αt^2-Modell nach Abbildung 46

Ein umfangreiches, hauptsächlich aus Brandversuchen gewonnenes Tabellenwerk mit der Zuordnung der Brandentwicklungs-Kategorien zu Nutzungen, Nutzungseinheiten, Möbeln und Warenlager ist im Anhang der technischen Regel VdS 2827 zu finden. *[60]*

Die Brandleistung muss über festzulegende Randbedingungen kontrolliert werden. Dies lässt sich mit den folgenden Ereignissen bewerkstelligen:

- Erreichen der maximal möglichen Brandfläche, z.B. wegen
  - den geometrischen Randbedingungen des Brandraumes,
  - der verfügbaren Brandlast,
  - der Anordnung der Brandlast,
  - anlagentechnischen, betrieblichen oder abwehrenden Brandschutzmassnahmen;
- Eintritt des Vollbrandes (vgl. Tabelle 17.6: Brandleistung zur Erzeugung eines Flashovers);
- Erreichen der unter den gegebenen Ventilationsbedingungen maximal möglichen Brandleistung (vgl. Tabelle 18: Vereinfachtes Naturbrandmodell für vollentwickelte Raumbrände);
- Abbrand von ca. 70-80 % der gesamten Brandlast (vgl. Tabelle 20: Abnahme der Brandleistung ohne Löschmassnahmen);
- Einsatz von Löschmassnahmen (vgl. Tabelle 20: Abnahme der Brandleistung mit Löschmassnahmen).

Anwendungsbereich

- Verbreitete Anwendung bei geringer Bestimmtheit der Brandbedingungen: Brandfläche, spezifische Brandleistung, Brandausbreitungsgeschwindigkeit oder die Brennstoffart werden nicht explizit angegeben und daher in der Berechnung nicht berücksichtigt.
- Nicht für leicht brennbare Stoffe anwendbar.

Brandleistungskurven

Modell	Formeln / Tabellen
DIN 18232-2 **DIN 18232-5** *[26] [27]*	

Parameter zu den Bemessungsbränden nach DIN 18232-2 und DIN 18232-5

Parameter	**Einheit**	**Bemessungsgruppe** (BMG)				
		1	**2**	**3**	**4**	**5**
Brandfläche	m^2	5	10	20	40	80
Seitenlänge	m	2.236	3.162	4.472	6.325	8.944
Durchmesser	m	2.523	3.568	5.046	7.136	10.093
Umfang (Kreis)	m	7.927	11.210	15.853	22.420	31.707
Brandleistung DIN 18232-2/-5	kW	1500	3000	6000	12000	24000
• konvektiver Anteil (80 %)	kW	1200	2400	4800	9600	19200
Brandleistung DIN 18232-5, Anhang A	kW	3000	6000	12000	24000	48000
• konvektiver Anteil (80 %)	kW	2400	4800	9600	19200	38400

Tab. 20.3: Parameter zu den Bemessungsbränden nach DIN 18232-2 und DIN 18232-5

Bemessungsgruppen nach DIN 18232-2 und DIN 18232-5 [1)]

Brandentwicklungsdauer [2)] $t_{Brandentwicklung}$	**Gemittelte Brandausbreitungsgeschwindigkeit** (v_{aus})		
	besonders gering 0.15 m/min	***mittel*** ***0.25 m/min***	besonders gross 0.45 m/min
≤ 5 Minuten	1	2	3
≤ 10 Minuten	2	*3*	4
≤ 15 Minuten	3	4	5
≤ 20 Minuten	4	**5**	
> 20 Minuten	(5)		

Fett	Durchschnittswerte (BMG 5) ohne besonderen Nachweis für natürliche RWA (NRWA).
Kursiv	In der Regel anzusetzende Werte (BMG 3) für maschinelle RWA (MRWA).
Leere Felder	Die Schutzziele der Norm sind durch RWA alleine nicht erreichbar, sodass weitere Massnahmen (z.B. Sprinkleranlage) erforderlich sind.
()	Eine Brandentwicklungsdauer > 20 Minuten ist für MRWA nach DIN 18232-5 nicht relevant.

Tab. 20.4: Bemessungsgruppen nach DIN 18232-2 und DIN 18232-5

Bemessungsbrände nach DIN 18232-2 und DIN 18232-5

Nr.	**Bezeichnung**	**BMG**	v_{aus} [m/min]	$t_{Brandentwicklung}$ [min]	$\dot{Q}$ [kW]	α [kW/s²]
1	BMG 1-Langsam	1	0.15	5	1500	0.0167
2	BMG 2-Langsam	2	0.15	10	3000	0.0083
3	BMG 2-Mittel		0.25	5	3000	0.0333
4	BMG 3-Langsam	3	0.15	15	6000	0.0074
5	BMG 3-Mittel		0.25	10	6000	0.0167
6	BMG 3-Schnell		0.45	5	6000	0.0667
7	BMG 4-Langsam	4	0.15	20	12000	0.0083
8	BMG 4-Mittel		0.25	15	12000	0.0148
9	BMG 4-Schnell		0.45	10	12000	0.0333
10	BMG 5-Mittel	5	0.25	20	24000	0.0167
11	BMG 5-Schnell		0.45	15	24000	0.0296

Tab. 20.5: Bemessungsbrände nach DIN 18232-2 und DIN 18232-5

Tab. 20: Brandleistungskurven

Bemessungsgrundlagen, Abbildungen, Anwendungsbereich

Bemessungsgrundlagen

- Die erforderlichen Rauchabzugsflächen (NRWA) bzw. Rauchgasvolumenströme (MRWA) werden mithilfe eines vereinfachten Zonenmodells auf Basis einer stationären Betrachtung ermittelt.
- Es werden die folgenden spezifischen Brandleistungen vorgegeben:
  - bei NRWA: 300 kW/m² (Tabellenwerte gelten bis 600 kW/m²)
  - bei MRWA: 300 kW/m² (Tabellenwerte für 600 kW/m² im Anhang A)
- In den BMG 1 und 2 bleibt die Zeit von der Brandentwicklung bis zur Branderkennung unberücksichtigt, weil eine Brandmeldeanlage vorausgesetzt wird.
- Die Werte der Tabelle 20.3 stellen sich zum Zeitpunkt wirksamer Löschmassnahmen ein und verstehen sich somit als Maximalwerte.
- Ist eine Sprinkleranlage vorhanden, so darf bei NRWA die errechnete BMG 4 oder BMG 5 durch die BMG 3 ersetzt werden, bei MRWA darf die ermittelte BMG um eine Stufe reduziert werden.
- Beträgt bei MRWA die Lagerguthöhe > 1.5 m, so ist die BMG um eine Stufe zu erhöhen.
- 80 % der Brandleistung werden konvektiv in die Heissgasschicht eingetragen, 20 % werden durch Strahlung im Bereich des Flammenherdes (Plume) abgegeben.
- Räume sind durch Rauchschürzen in Rauchabschnittsflächen ≤ 1600 m² aufzuteilen. Der Abstand zwischen Rauchschürzen bzw. zwischen Wand und Rauchschürze darf maximal 60 m betragen. [3)]
- Es werden die Risiken von Feststoffbränden mit einem effektiven Heizwert von 15.0 MJ/kg und unbegrenzter Brandlast abgedeckt.
- Eine ausreichend gross dimensionierte und gleichmässig verteilte bodennahe Zuluftzuführung, die unmittelbar nach Auslösung der RWA wirksam wird, ist unabdingbar.
- Das Ende der jeweiligen Brandentwicklungsdauer – als Zeitspanne zwischen der Brandentstehung und dem Beginn der wirksamen Brandbekämpfung – fällt mit dem Zeitpunkt des Erreichens der maximalen Brandfläche zusammen. Auf dieser Annahme beruht die Berechnung der gemittelten Brandausbreitungsgeschwindigkeit (vgl. Tabelle 20.4).
- Zeit von der Brandentstehung bis zur Brandmeldung (Branderkennungszeit):
  - im Regelfall (nur für DIN 18232-2) 10 min
  - bei Brandmeldung durch Rauchmelder ohne Alarmübermittlung 5 min
  - bei Brandmeldung durch Brandmeldeanlage mit Alarmübermittlung 0 min
- Zeit von der Brandmeldung bis zur Brandbekämpfung:
  - im Regelfall 10 min
  - bei Vorhandensein einer Betriebsfeuerwehr 5 min
  - bei ungünstigen Verhältnissen 15 min
  - bei aussergewöhnlich ungünstigen Verhältnissen 20 min
- Ab dem Eintreffen der Feuerwehr am Brandort findet keine weitere Brandausbreitung mehr statt. [26], S. 6-10, S. 21-23; [27], S. 5-9, S. 31

Bei Annahme einer quadratischen Leistungszunahme (αt^2-Modell) bis zum Erreichen der maximalen Brandleistung nach Tabelle 20.3, lassen sich aus den Zeit- und Geschwindigkeitswerten von Tabelle 20.4 Brandleistungskurven erzeugen. Abbildung 47 zeigt beispielhaft die Brandleistungskurven zu den Bemessungsbränden „BMG 4-Langsam“, „BMG 4-Mittel“ und „BMG 4-Schnell“.

Die Werte von Tabelle 20.5, Spalten 6-7, verstehen sich für eine spezifische Brandleistung von 300 kW/m². Werden nach DIN 18232-5, Anhang A 600 kW/m² angesetzt, so verdoppeln sich die Werte von Tabelle 20.5, Spalten 6-7.

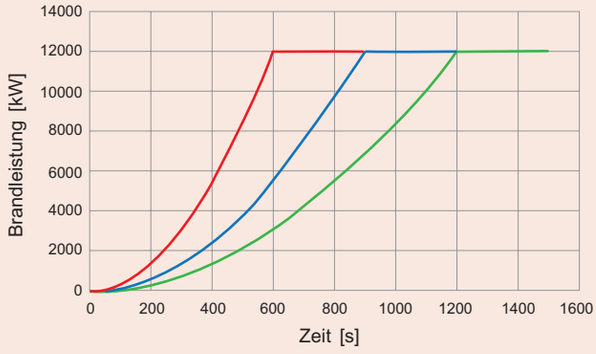


Abb. 47: Brandleistungskurven zu den Bemessungsbränden „BMG 4-Langsam“, „BMG 4-Mittel“ und „BMG 4-Schnell“

Anwendungsbereich

Dimensionierung von Elementen des technischen Brandschutzes (RWA).

Brandleistungskurven

Modell	Formeln / Tabellen

TRVB S 125

[30]

Parameter zu den Bemessungsbränden für Lagerhöhen ≤ 2 m nach TRVB S 125, Anhang 9

BRE-Gruppe	Brandfläche [m²]	Brandumfang [m]	BRE (NRWA)				BRA (MRWA)			
			Brandleistung [kW]		spezifische Brandleistung [kW/m²]		Brandleistung [kW]		spezifische Brandleistung [kW/m²]	
			total	konv.	total	konv.	total	konv.	total	konv.
1	10	12	1250	1000	125	100	6250	5000	625	500
2	20	18	2500	2000	125	100	12500	10000	625	500
3	40	25	5000	4000	125	100	25000	20000	625	500

BRE-Gruppe Brandrauchentlüftungs-Gruppe (vgl. TRVB A 126 [48])
BRE Brandrauchentlüftungsanlage (NRWA)
BRA Brandrauchabsauganlage (MRWA)

Tab. 20.6: Parameter zu den Bemessungsbränden für Lagerhöhen ≤ 2 m nach TRVB S 125, Anhang 9

Parameter zu den Bemessungsbränden für Lagerhöhen > 2 m nach TRVB S 125, Anhang 9

Regalfläche [m²]	Regalsprinkler	Brandfläche [m²]	Brandumfang [m]	spezifische Brandleistung [kW/m²]
$A_L \le A_{(\le 2m)}$	nein	$A_L = l_L \cdot b_L$	$U_L = 2 \cdot (l_L + b_L)$	$\dot{q}_{(>2m)} = \dot{q}_{(\le 2m)} \cdot h_L / 2$
$A_L > A_{(\le 2m)}$	nein	$A_{(\le 2m)}$	$U_L = 2 \cdot (A_{(\le 2m)} / b_L + b_L)$	
A_L	ja	$A_L = 2 \cdot S \cdot b_L$	$U_L = 2 \cdot (2 \cdot S + b_L)$	

$\dot{q}_{(\le 2m)}$ spezifische Brandleistung nach Tabelle 20.6 [kW/m²]

h_L Regal-/Blocklagerhöhe [m]
l_L Regal-/Blocklagerlänge [m]
b_L Regal-/Blocklagerbreite bzw. -tiefe [m]
A_L Regal-/Blocklagerfläche [m²]
$A_{(\le 2m)}$ Brandfläche nach Tabelle 20.6 [m²]
U_L Regal-/Blocklagerumfang [m]
S Regalsprinklerabstand [m]

Tab. 20.7: Parameter zu den Bemessungsbränden für Lagerhöhen > 2 m nach TRVB S 125, Anhang 9

Bemessungsbrände für Lagerhöhen ≤ 2 m nach TRVB S 125, Anhang 9

Nr.	Bezeichnung	BRE-Gruppe	A [m²]	RWA-Typ	Q̇ [kW]	α [kW/s²]		
						12 Minuten *)	10 Minuten *)	7 Minuten *)
1	BRE 1	1	10	NRWA	1250	0.0024	0.0035	0.0071
				MRWA	6250	0.0121	0.0174	0.0354
2	BRE 2	2	20	NRWA	2500	0.0048	0.0069	0.0142
				MRWA	12500	0.0241	0.0347	0.0709
3	BRE 3	3	40	NRWA	5000	0.0096	0.0139	0.0283
				MRWA	25000	0.0482	0.0694	0.1417
4	BRE 2+BMA	2+BMA	10	NRWA	1250	0.0024	0.0035	0.0071
				MRWA	6250	0.0121	0.0174	0.0354
5	BRE 3+BMA	3+BMA	20	NRWA	2500	0.0048	0.0069	0.0142
				MRWA	12500	0.0241	0.0347	0.0709
6	BRE 3+SPA	3+SPA	10	NRWA	1250	0.0024	0.0035	0.0071
				MRWA	6250	0.0121	0.0174	0.0354

*) Dauer bis zum Erreichen der maximalen Brandleistung (Brandentwicklungsdauer)

Tab. 20.8: Bemessungsbrände für Lagerhöhen ≤ 2 m nach TRVB S 125, Anhang 9

Tab. 20: Brandleistungskurven

Bemessungsgrundlagen, Abbildungen, Anwendungsbereich

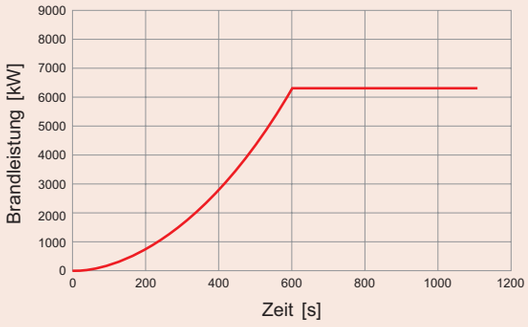
Bemessungsgrundlagen

- Vorzugsweise sollte der Bemessungsbrand in Abhängigkeit der Nutzung festgelegt werden, wobei für die zu erwartende Brandfläche und spezifische konvektive Brandleistung aus den folgenden Quellen akzeptable Erfahrungswerte herangezogen werden sollten:
  - statistisch abgesicherte Daten,
  - veröffentlichte Ergebnisse von repräsentativen Brandversuchen,
  - Ergebnisse durchgeführter Brandversuche im Einzelfall,
  - Daten aus internationalen Normen,
  - Daten aus europaweit anerkannten technischen Richtlinien,
  - begrenzte Fläche mit Brandlast (= maximal mögliche Brandfläche).

  Falls solche Daten nicht verfügbar sind, können die Bemessungsbrände nach TRVB S 125, Anhang 9 festgelegt werden.
- 80 % der Brandleistung werden konvektiv in die Heissgasschicht eingetragen, 20 % werden durch Strahlung im Bereich des Flammenherdes abgegeben.
- Von der grössten Brandfläche (BRE-Gruppe 3) ausgehend, kann bei
  - Vorhandensein einer Brandmeldeanlage um 1 BRE-Gruppe bzw. die Brandfläche um die Hälfte,
  - Vorhandensein einer Sprinkleranlage um 2 BRE-Gruppen bzw. die Brandfläche um drei Viertel

  reduziert werden.
- Grundsätzlich sollte für die Dimensionierung keine geringere Brandfläche als 10 m^2 mit einem Brandumfang von 12 m herangezogen werden. Hiervon ausgenommen sind:
  - auf einer Fläche < 10 m^2 angeordnete brennbare Gegenstände, wenn eine Brandausbreitung auf entferntere Brandlasten unwahrscheinlich ist;
  - mit Sprinklern der Ansprechempfindlichkeit „schnell“ (RTI < 50 $m^{0.5} \cdot s^{0.5}$) ausgerüstete, maximal 4 m hohe Räume (in diesem Fall ist für die Bemessung eine Brandfläche von 5 m^2 mit einem Brandumfang von 9 m zulässig).
- Für die folgenden Nutzungen kann generell eine Brandfläche von 10 m^2 und ein Brandumfang von 12 m (BRE-Gruppe 1) angenommen werden:
  - Foyers und Verkehrsflächen mit singulären Brandlasten, wie z.B. Sitzgelegenheiten, Stehpulte, Exponate und Vitrinen,
  - Ausstellungsräume – ausgenommen Messehallen – und Galerien.
- Bei Regal-/Blocklagerabständen von mehr als 2 m ist der Bemessungsbrand anhand Tabelle 20.7 zu ermitteln. Beträgt der Regal-/Blocklagerabstand weniger als 2 m, so sind auch die benachbarten Regal-/Blocklager als brennend zu betrachten, sofern kein Sprinklerschutz vorhanden ist.
- Sowohl für NRWA als auch für MRWA wird zur Kontrolle der Rauchgasschichttemperatur die spezifische konvektive Brandleistung von 500 kW/m^2 angesetzt.
- Das Ende der jeweiligen Brandentwicklungsdauer fällt mit dem Zeitpunkt des Erreichens der maximalen Brandfläche zusammen. [30], S. 7-9, S. 51-53

Bei Annahme einer quadratischen Leistungszunahme (αt^2-Modell) bis zum Erreichen der maximalen Brandfläche bzw. maximalen Brandleistung nach Tabelle 20.6, lassen sich für die angenommenen Brandentwicklungsdauern von 7, 10 oder 12 Minuten entsprechende Brandleistungskurven erzeugen. Abbildung 48 zeigt beispielhaft die Brandleistungskurve zum Bemessungsbrand „BRE 1“ für die Dauer von 10 Minuten bis zum Erreichen der maximalen Brandleistung für MRWA.



Anwendungsbereich

Dimensionierung von Elementen des technischen Brandschutzes (RWA).

Abb. 48: Brandleistungskurve zum Bemessungsbrand „BRE 1“ für die Dauer von 10 Minuten bis zum Erreichen der maximalen Brandleistung für MRWA

Brandleistungskurven

Modell

Formeln / Tabellen

Geometrisches Brandausbreitungsmodell

[5] [20]

Brandleistung auf der Brandfläche A(t) bei unvollständiger Verbrennung:

$\dot{Q} = v_{ab} \cdot H_u \cdot A(t) \cdot \chi$

Für sich quadratisch, kreisförmig, winkelförmig, seitlich und einseitig ausbreitende Brandflächen gilt:

- quadratisch: $A(t) = v_{aus}^2 \cdot t^2$
- kreisförmig: $A(t) = \pi \cdot v_{aus}^2 \cdot t^2$ (vgl. Abbildung 49, Figur 1)
- winkelförmig: $A(t) = \pi \cdot v_{aus}^2 \cdot t^2 \cdot \omega/360°$ (vgl. Abbildung 49, Figur 2)
- seitlich: $A(t) = 2 \cdot v_{aus} \cdot t \cdot b$ (vgl. Abbildung 49, Figur 3)
- einseitig: $A(t) = v_{aus} \cdot t \cdot b$

$\dot{Q}$	Brandleistung zum Zeitpunkt t [kW]
v_{ab}	flächenspezifische Abbrandrate [kg/(m²h)]
H_u	Heizwert [kWh/kg]
A(t)	von der Zeit abhängige, aktuelle Brandfläche [m²]
t	Branddauer (ohne Schwelbrandphase) [s]
v_{aus}	Brandausbreitungsgeschwindigkeit in x-, y- oder radialer Richtung [m/s]
χ	Verbrennungseffektivität (χ = 1 für vollständige Verbrennung) [-] [20], S. 68

Zwischen dem geometrischen Brandausbreitungsmodell und dem αt^2-Modell besteht die folgende, aus dem Vergleich der Brandleistungsgleichungen resultierende Beziehung: $v_{aus} = [\alpha / (v_{ab} \cdot H_u)]^{1/2}$.

Die Brandausbreitungsgeschwindigkeit v_{aus} kann die folgenden praxisbezogenen Werte annehmen:

Brandentwicklung	**Brandausbreitungsgeschwindigkeit** (v_{aus}) [m/min]			
	DIN 18232-2 [26] **DIN 18232-5** [27]	**DIN 18230-4** [47]	**Fachliteratur** [55]	**Fachliteratur** [49]
langsam	0.15	0.25	0.30	0.10
mittel	0.25	0.50	0.48	0.30
schnell	0.45	1.00	0.72-1.20	1.00
sehr schnell			1.80-3.00	> 1.00

Tab. 20.9: Brandausbreitungsgeschwindigkeiten für geometrische Ausbreitungsmodelle

Abnahme der Brandleistung ohne Löschmassnahmen

[11] [18] [19] [94]

Existieren von der abklingenden Brandphase keine spezifischen Informationen, so wird eine mit der Zeit linear abnehmende Brandleistungskurve angenommen. Dabei ergibt sich der Funktionsverlauf aus den folgenden Bedingungen:

- Die Abklingphase wird eingeleitet, nachdem 70 % (SN EN 1991-1-2, PD 7974-1) bzw. 80 % (ISO/TR 13387-2, ISO/TS 16733) der Brandlast bzw. der insgesamt auf der Brandfläche freisetzbaren Energie umgesetzt wurden.
- Das Integral der Brandleistung über die Zeitdauer der Abklingphase muss 30 % (SN EN 1991-1-2) bzw. 20 % (ISO/TR 13387-2, ISO/TS 16733) der Brandlast bzw. der insgesamt auf der Brandfläche freisetzbaren Energie entsprechen. [11], S. 56; [18], S. 11; [19], S. 15; [94], S. 22

Für die Branddauer bzw. Zeitspanne zwischen Brandbeginn und Beginn der Abklingung gilt näherungsweise:

$\tau_{Brand} = 0.7 \cdot q / \dot{q}$ bzw. $\tau_{Brand} = 0.8 \cdot q / \dot{q}$ [s]

q	spezifische Brandlast [kJ/m²]
$\dot{q}$	spezifische Brandleistung [kW/m²]

Tab. 20: Brandleistungskurven

Bemessungsgrundlagen, Abbildungen, Anwendungsbereich

Bemessungsgrundlagen

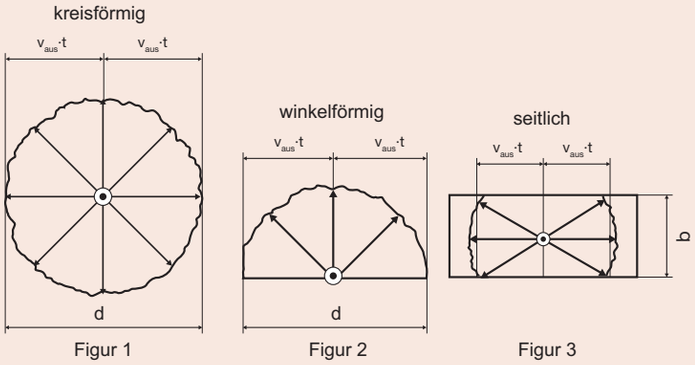
- Flächenspezifische Abbrandrate v_{ab}, spezifische Brandleistung $\dot{q}$, Heizwert H_u und Brandausbreitungsgeschwindigkeit v_{aus} sind konstant,
- die Brandausbreitung erfolgt in radialer Richtung bzw. in zwei horizontale Richtungen,
- unbeschränkte Luftzufuhr (Brandlaststeuerung),
- Rauchgasschichttemperatur ≤ 550 °C (Pre-Flashover-Phase).

Brandleistung

Beim geometrischen Brandausbreitungsmodell resultiert die Brandleistungskurve aus

- der zeitabhängigen Brandfläche bzw. der Brandausbreitungsgeschwindigkeit und Geometrie der Brandausbreitung,
- der stoffbezogenen flächenspezifischen Abbrandrate und
- dem brandlastabhängigen Heizwert. [20], S. 66

Brandfläche



Figur 1 Figur 2 Figur 3

Abb. 49: Ermittlung der Brandfläche über die Geometrie der Brandausbreitung

Die Brandfläche kann beispielsweise begrenzt werden durch:

- die geometrischen Randbedingungen des Brandraumes,
- die verfügbare Brandlast,
- die Anordnung der Brandlast,
- anlagentechnische, betriebliche oder abwehrende Brandschutzmassnahmen.

Anwendungsbereich

- Das geometrische Brandausbreitungsmodell gilt für vertikal und horizontal angeordnete Flächen mit einer Brandlasthöhe von maximal 1.5 m (bzw. maximal 1.8 m für in Räumen angeordnete Möbel). Mit dieser Brandlasthöhenbegrenzung sind die brennenden Seitenflächen berücksichtigt. [20], S. 68
- Brandsimulationen mit numerischen Modellen.

Der zeitliche Beginn der abklingenden Brandphase kann (noch) nicht genügend genau definiert werden. Für zutreffende Vorhersagen sind weitere Forschungsarbeiten erforderlich. [18], S. 11; [19], S. 15

Brandleistungskurven

Modell	Formeln / Tabellen
Abnahme der Brandleistung mit Löschmassnahmen *[24] [60]*	**Löschmassnahmen der Feuerwehr** In der Regel dürfen in der Brandschutzplanung die Löschmassnahmen der Feuerwehr nicht berücksichtigt werden, und zwar aus den folgenden Gründen: • Das Einhalten der angenommenen Hilfsfrist kann nicht garantiert werden; • der Beginn der Löschmassnahmen kann durch andere Aufgaben der Feuerwehr, wie z.B. Menschenrettung und Sicherungsmassnahmen, erheblich verzögert werden. **Löschmassnahmen mit Sprinkleranlagen** [4)] Für die Beschreibung der zeitlichen Entwicklung der Brandleistung eines gesprinklerten Brandes existieren die folgenden methodischen Ansätze: • Modell der konstanten Brandleistung ab Zeitpunkt der Sprinklerauslösung (Kurve „Brandbeherrschung“ gemäss Abbildungen 50-51); • algebraische Methode: empirische Relationen und Algorithmen; • numerische Methode: Abbildung der im Innern von Sprinklern (Sprinklerkennwerte) und ausserhalb davon (Umgebungsbedingungen, Brandszenarien) vorhandenen brandphysikalischen Zustände und ablaufenden Vorgänge mit CFD-Brandsimulationsmodellen. Eine nähere Beschreibung der genannten algebraischen und numerischen Modelle ist Kapitel 4.7, Tabelle 10 zu entnehmen.

Tab. 20: Brandleistungskurven

Erläuterungen zu Tabelle 20

[1)] Die Ermittlung der Bemessungsgruppen erfolgt anhand

- der Brandausbreitungsgeschwindigkeit und
- der Brandentwicklungsdauer, die abhängt von
  - der Branderkennungszeit und
  - der Zeitdauer, bis zur Einleitung des Löschangriffs durch die Feuerwehr.

[2)] Die Brandentwicklungsdauer, d.h. die Zeitspanne zwischen der Brandentstehung und dem Beginn der wirksamen Brandbekämpfung, lässt sich aus der Qualität des technischen, betrieblichen und abwehrenden Brandschutzes ermitteln (vgl. Tabelle 20.10)

[3)] Rauchabschnittsflächen dürfen von 1600 m² auf maximal 2600 m² erweitert werden, wenn die Tabellenwerte für die aerodynamisch wirksamen Rauchabzugsflächen (NRWA) bzw. abzuführenden Rauchgasvolumenströme (MRWA) entsprechend erhöht werden. [26], S. 17; [27], S. 7

[4)] Abhängig von der Tragweite und Komplexität der jeweiligen Aufgabenstellung, kann eine Pauschalberücksichtigung von automatischen Löschanlagen bei Berechnungsansätzen fraglich sein, falls die Zuverlässigkeit der Anlage im Rahmen eines semiprobabilistischen Ansatzes nicht berücksichtigt wird. Diesbezüglich sei auf die Inhalte von DIN EN 1991-1-2/NA verwiesen. *[41]*

Brandentwicklungsdauer nach DIN 18232-2 und DIN 18232-5

Branderkennungszeit [min]	**Abwehrender Brandschutz** / **Technischer Brandschutz**		**Richtzeiten für Einsätze** [min]			
			Betriebsfeuerwehr	Öffentliche Feuerwehr		
			5	**10**	**15**	**20**
	0	Brandmeldeanlage mit Alarmübermittlung	5	10	15	20
	0	Ständige, dauerhafte Personalbesetzung	5	10	15	20
	5	Rauchmelder mit Alarmübermittlung	10	15	20	25
	10	Keine Massnahme	15	20	25	30

Tab. 20.10: Brandentwicklungsdauer nach DIN 18232-2 und DIN 18232-5

Bemessungsgrundlagen, Abbildungen, Anwendungsbereich

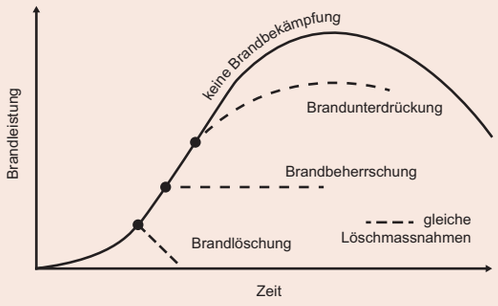


Abb. 50: Brandleistungsverläufe bei verschiedenen Auslösezeitpunkten und gleicher Effektivität der Löschmassnahmen

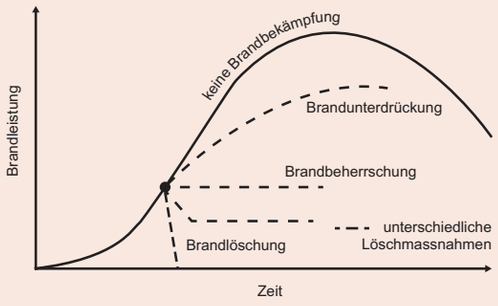


Abb. 51: Brandleistungsverläufe bei gleichem Auslösezeitpunkt und unterschiedlicher Effektivität der Löschmassnahmen

Hinweis

Die Richtlinie VdS CEA 4020 legt für natürliche Rauch- und Wärmeabzugsanlagen (NRWA) die Grösse der erforderlichen aerodynamisch wirksamen Öffnungsfläche mithilfe eines Prozentsatzes fest, der als Multiplikator einer über die Raumgrösse zu bestimmenden Fläche anzuwenden ist. Dabei werden die folgenden Berechnungsparameter eingeführt:

- Nutzung des Gebäudes (Risiko),
- Brandentwicklungsdauer t [min],
- Deckenhöhe h [m],
- Höhe der raucharmen Schicht d [m],
- Raumfläche A [m^2] oder Dachabschnittsfläche A_R [m^2]. [105], S. 10

Explizit werden die dem Bemessungsverfahren zugrunde liegenden Bemessungsbrände jedoch nicht erwähnt.

Schematisierte Naturbrandmodelle

Modell	Gleichungen
VDI 6019 Blatt 1 *[24]*	

Schematisierter Brandverlauf nach VDI 6019 Blatt 1 (Phasen 1-5)

Phase	Zeitvariable	Zeitintervall	Gesamt-Brandleistung ($\dot{Q}$)	Brandfläche (A)
Brandentstehungsphase				
1	$\tau_1 = t$	$0 \le \tau_1 \le 300$ s	$\dot{Q}(\tau_1) = 0.333$ kW/s $\cdot \tau_1$ (Gl. 1)	$A(\tau_1) = 0.4$ m^2 = konst.
		300 s $< \tau_1 \le t_i$ i = 4, 5	$\dot{Q}(\tau_1) = 100$ kW = konst. (Gl. 2)	
Fortentwickelte Brandphase				
2	$\tau_2 = t$	$0 < \tau_2 \le t_i$ i = 3, 4, 5	$\dot{Q}(\tau_2) = \dot{q} \cdot A(\tau_2)$	$A(\tau_2) = (v_{aus} \cdot \tau_2)^2$ $v_{aus}^2 = \alpha / \dot{q}_f$
Konstante Brandphase				
3	$\tau_3 = t - t_3$	$t_3 < \tau_3 \le t_i$ i = 4, 5	$\dot{Q}(\tau_3) = \dot{Q}(t_3) =$ konst.	$A(\tau_3) = A(t_3) =$ konst.
Kontrollierte Brandphase				
4	$\tau_4 = t - t_4$	$t_4 < \tau_4 \le t_5$	$\dot{Q}(\tau_4) = \dot{Q}(t_4) \cdot \exp(-0.0023 \cdot \tau_4)$ (Gl. 1)	$A(\tau_4) = A(t_4) =$ konst.
		$t_4 = t_a$	$\dot{Q}(\tau_4) = \dot{Q}(t_4) =$ konst. (Gl. 2)	
Manuelle Brandbekämpfung durch die Feuerwehr				
5		t_5 $t_5 = t_a + t_b$		

t	globale Zeitvariable [s]
t_i	Zeitpunkt vor Beginn der Phase i mit i = 3, 4, 5 [s]
τ_i	Zeitvariable in der Brandphase i mit i = 1, 2, 3, 4, 5 [s]
$\dot{Q}$	Gesamt-Brandleistung [kW]
$\dot{q}_f$	maximale spezifische Brandleistung nach VDI 6019 Blatt 1, Tabelle 2 (vgl. Tabelle 18.3) [kW/m^2]
A	Brandfläche [m^2]
α	Brandintensitätskoeffizient nach VDI 6019 Blatt 1, Tabelle 1 (vgl. Tabelle 20.1) [kW/s^2]
v_{aus}	horizontale mittlere Brandausbreitungsgeschwindigkeit [m/s]
t_a	Zeit bis zur Brandmeldung nach VDI 6019 Blatt 1, Tabelle 3 bzw. Zeit bis zur Auslösung der SPA nach VDI 6019 Blatt 1, Tabellen 5-8 [s]
t_b	Interventionszeit der Feuerwehr nach VDI 6019 Blatt 1, Tabelle 4 [s]

Tab. 21.1: Schematisierter Brandverlauf nach VDI 6019 Blatt 1 (Phasen 1-5)

Niedrigenergetische Brände beschreiben die Brandentstehungsphase und dienen der Untersuchung der Wirksamkeit einer RWA und/oder einer Brandmeldeeinrichtung (Brandverläufe Nr. 1 und Nr. 2).

Hochenergetische Brände beschreiben die fortentwickelte Brandphase und dienen der Bemessung der maximal erforderlichen Leistung einer RWA (Brandverläufe Nr. 3 bis Nr. 4).

Tab. 21: Schematisierte Naturbrandmodelle

Bemessungsgrundlagen, Abbildungen

Bemessungsgrundlagen

- Die brandtechnologischen Parameter von VDI 6019 Blatt 1 gelten für brandlastgesteuerte Verbrennungen mit ausreichender Luftzufuhr; [24], S. 9, S. 13
- Pre-Flashover-Phase; [24], S. 9
- die konvektive Brandleistung berechnet sich zu: $\dot{Q}_{konv} = 0.7 \cdot \dot{Q}$; [24], S. 27
- Feststoffbrände (keine Flüssigkeitsbrände); [24], S. 9
- horizontale Brandflächen (keine dominierende vertikale Brandausbreitung, wie z.B. Regalbrände); [24], S. 9
- Szenarien mit niedrigenergetischen Bränden vermögen eine Sprinkleranlage nicht auszulösen; [24], S. 10
- das Verhalten niedrigenergetischer Brände hängt nicht von der Nutzung ab. [24], S. 13

Niedrigenergetische Brände (Phasen 1, 4 und 5)

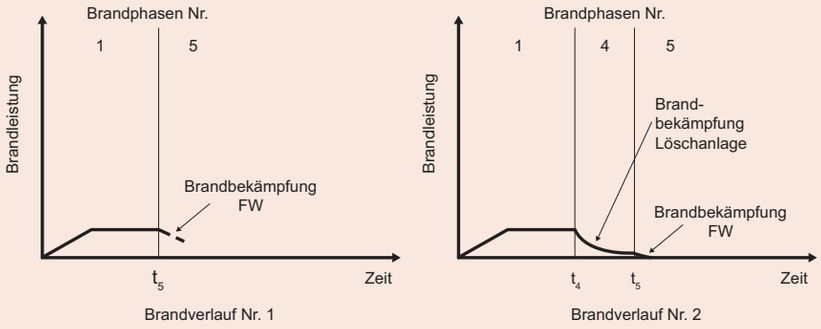


Abb. 52: Brandverläufe und -phasen für niedrigenergetische Brände

Hochenergetische Brände (Phasen 2 bis 5)

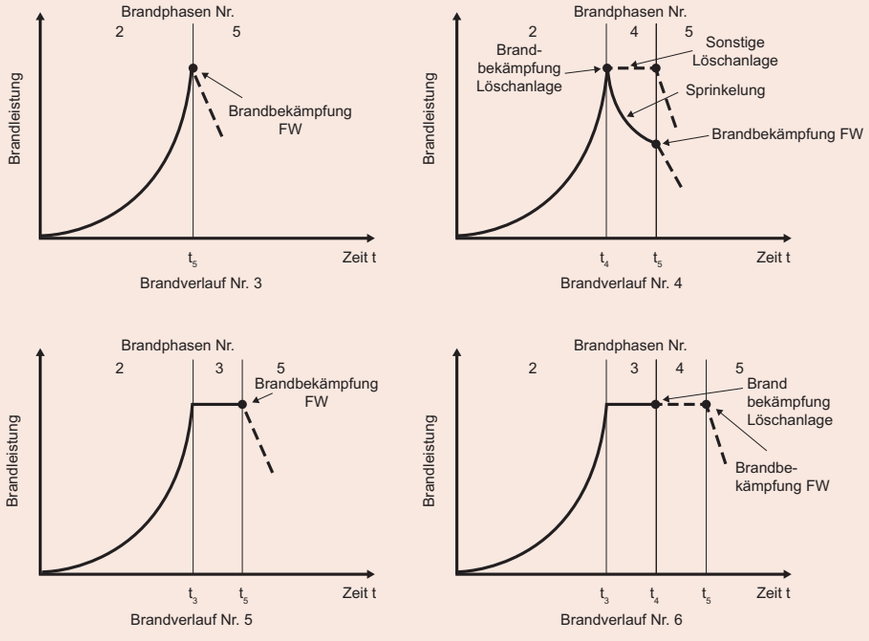


Abb. 53: Brandverläufe und -phasen für hochenergetische Brände

Beschreibung der Brandphasen

In der Brandentstehungsphase (**Phase 1**) steigt die Brandleistung innerhalb der ersten 300 s auf einen Wert von 100 kW linear an (Gleichung 1) und bleibt danach konstant (Gleichung 2). Dabei wird die Brandfläche vereinfachend als konstant angenommen. [24], S. 13

Die fortentwickelte Brandphase (**Phase 2**) zeichnet sich durch eine quadratische Zunahme der Brandleistung und der Brandfläche aus. [24], S. 13

In der konstanten Brandphase (**Phase 3**) ist die gesamte brennbare Fläche eines örtlich begrenzten Brandes am Brandgeschehen beteiligt, sodass die Brandleistung und Brandfläche konstant bleiben und die entsprechenden Endwerte der vorangehenden Phase annehmen. [24], S. 14

Wird eine Sprinkleranlage aktiviert, so kann in der kontrollierten Brandphase (**Phase 4**) von einer Abminderung der Brandleistung ausgegangen werden (Gleichung 1). Sofern Abschattungseffekte die Wirksamkeit einer Sprinkleranlage beeinträchtigen oder falls das Löschverhalten von anderen automatischen Löschanlagen, wie z.B. Sprühwasser-Löschanlagen, nicht durch umfassende Untersuchungen bestätigt wurde, wird die Brandleistung ab dem Auslösezeitpunkt konstant gehalten (Gleichung 2). [24], S. 14

Der Zeitpunkt bis zur Einleitung der manuellen Brandbekämpfung durch die Feuerwehr (**Phase 5**) resultiert aus der Summe der Zeit bis zur Brandmeldung (t_a) und der Interventionszeit (t_b). [24], S. 15

Schematisierte Naturbrandmodelle

Modell	Gleichungen
DIN EN 1991-1-2/NA, Anhang BB *[41]*	

Schematisierter Brandverlauf nach DIN EN 1991-1-2/NA (Phasen 1-3)

Phase	Zeitintervall	Gesamt-Brandleistung ($\dot{Q}$)	
		Brandentwicklungs- und Brandausbreitungsphase	
1	$0 < t \leq t_1$	$\dot{Q} = \dot{Q}_0 \cdot (t/t_\alpha)^2$	
		Stationäre Phase des vollentwickelten Brandes	
2	$t_1 < t \leq t_2$	$\dot{Q}_{max} = \text{MIN}\,(\dot{Q}_{max,f}, \dot{Q}_{max,v})$	
		$\dot{Q}_{max,f} = \dot{q}_{max} \cdot A_{max}$	brandlastgesteuerter Brand
		$\dot{Q}_{max,v} = 0.1 \cdot \chi \cdot H_u \cdot A_O \cdot h_O^{1/2}$	ventilationsgesteuerter Brand
		Abklingende Brandphase	
3	$t_2 < t \leq t_3$	$\dot{Q} = \dot{Q}_{max} \cdot (t_3 - t) / (t_3 - t_2)$	

t	Zeit nach der Brandentstehung [s]
t_i	Zeitpunkt am Ende der Phase i mit i = 1, 2, 3 [s]
t_α	erforderliche Zeit, um eine Brandleistung von 1000 kW zu erreichen, und zwar nach DIN EN 1991-1-2/NA, Tabelle BB.2 (vgl. Tabelle 21.3) [s]
$\dot{Q}$	Gesamt-Brandleistung [kW]
$\dot{Q}_0$	Referenz-Brandleistung (1000 kW)
$\dot{Q}_{max}$	maximale Gesamt-Brandleistung [kW]
$\dot{Q}_{max,f}$	maximale Gesamt-Brandleistung des brandlastgesteuerten Brandes (vgl. Tabelle 18.4) [kW]
$\dot{Q}_{max,v}$	maximale Gesamt-Brandleistung des ventilationsgesteuerten Brandes (vgl. Tabelle 18.4) [kW]
$\dot{q}_{max}$	maximale spezifische Brandleistung nach DIN EN 1991-1-2/NA, Tabelle BB.2 (vgl. Tabelle 21.3) [kW/m²]
χ	Verbrennungseffektivität (χ = 0.7 für Mischbrandlasten) [-]
H_u	Heizwert der Brandlast (H_u = 17300 kJ/kg für Holz) [kJ/kg]
A_{max}	maximale Brandfläche, in der Regel die Grundfläche des Brandraumes [m²]
A_O	Fläche der Ventilationsöffnungen [m²]
h_O	gemittelte lichte Höhe der Ventilationsöffnungen [m]

Tab. 21.2: Schematisierter Brandverlauf nach DIN EN 1991-1-2/NA (Phasen 1-3)

DIN EN 1991-1-2/NA ist der nationale Anhang zu DIN EN 1991-1-2 bzw. Eurocode 1 (Einwirkungen auf Tragwerke, Teil 1-2: Allgemeine Einwirkungen – Brandeinwirkungen auf Tragwerke). Tabelle 21.4 zeigt eine Zusammenstellung der länderspezifischen nationalen Anhänge.

Tab. 21: Schematisierte Naturbrandmodelle

Bemessungsgrundlagen, Abbildungen

Bemessungsgrundlagen

- Die Brandbelastung kann entweder pauschal über eine nutzungsspezifische Brandlastklassifizierung oder durch eine objektspezifische Brandlasterhebung ermittelt werden. [41], S. 16
- In Deutschland wird zur Beibehaltung des nationalen Sicherheitsniveaus die maximale Gesamt-Brandleistung $\dot{Q}_{max}$ aus Phase 2 mit dem Teilsicherheitsbeiwert γ_{fi} gewichtet. Somit ist für brandschutztechnische Dimensionierungen der Bemessungswert $\dot{Q}_{max,d} = \dot{Q}_{max} \cdot \gamma_{fi}$ relevant. Dem Teilsicherheitsbeiwert γ_{fi} liegt ein Sicherheitskonzept zugrunde, das die Auftretenswahrscheinlichkeit eines Schadenfeuers und die zulässige Versagenswahrscheinlichkeit von Bauteilen berücksichtigt. [41], S. 20-25
- Die maximale Brandleistung $\dot{Q}_{max}$ der stationären Phase ist der kleinere der beiden Maximalwerte des ventilationsgesteuerten und des brandlastgesteuerten Brandes. [41], S. 20
- Für die Abklingphase wird vereinfacht ein linearer Verlauf angenommen, und sie beginnt, wenn 70 % der gesamten Brandlast umgesetzt sind. [41], S. 20
- Die angegebene Gleichung von Phase 2 für ventilationsgesteuerte Brände gilt in Räumen bis 50 m² Grundfläche. [41], S. 20
- Es werden Feststoffbrände vorausgesetzt.

Zeitlicher Verlauf der Brandleistung

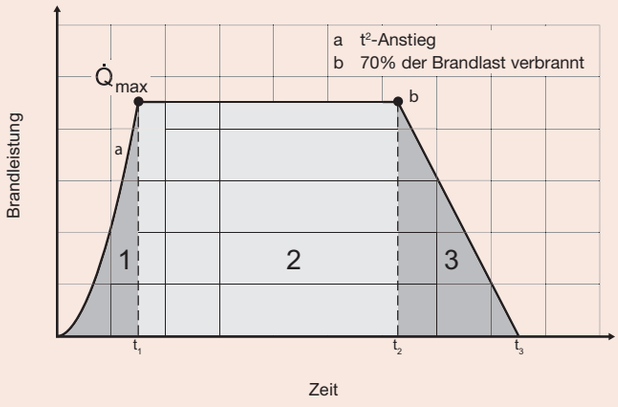


Abb. 54: Zeitverlauf der Brandleistung nach DIN EN 1991-1-2/NA, Anhang BB

Charakteristische Werte für t_α und $\dot{q}_{max}$ nach DIN EN 1991-1-2/NA

Nutzung	Brandausbreitung	t_α [s]	$\dot{q}_{max}$ [kW/m²]
Wohnen, Büro, Spitalzimmer, Hotelzimmer	mittel	300	250
Bibliothek, Bücherei	mittel	450	250-500
Schule (Klassenzimmer)	mittel	300	150
Verkauf, Einkaufszentrum	schnell	150	250
Versammlungsstätte (Theater, Kino)	schnell	150	500
Verkehrsanlage (öffentlicher Bereich)	langsam	600	250

Tab. 21.3: Charakteristische Werte für t_α und $\dot{q}_{max}$ nach DIN EN 1991-1-2/NA

Eurocode 1 mit nationalen Anhängen

Land	Bezeichnung	Titel	Jahr
CH	SN EN 1991-1-2	Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke, Teil 1-2: Allgemeine Einwirkungen – Brandeinwirkungen auf Tragwerke	2002
D	DIN EN 1991-1-2	Eurocode 1: Actions sur les structures, Partie 1-2: Actions générales – Actions sur les structures exposées au feu	2010
A	ÖNORM EN 1991-1-2		2013
F	NF EN 1991-1-2		2003
D	DIN EN 1991-1-2/NA	Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter – Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke, Teil 1-2: Allgemeine Einwirkungen – Brandeinwirkungen auf Tragwerke	2010
A	ÖNORM B 1991-1-2	Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke, Teil 1-2: Allgemeine Einwirkungen – Brandeinwirkungen auf Tragwerke – Nationale Festlegungen zur ÖNORM EN 1991-1-2	2003
F	NF EN 1991-1-2/NA	Eurocode 1: - Actions sur les structures, Partie 1-2: Actions générales – Actions sur les structures exposées au feu – Annexe nationale à la NF EN 1991-1-2	2007

Tab. 21.4: Eurocode 1 mit nationalen Anhängen

Allgemeine Naturbrandmodelle	
Modell	**Gleichungen**
Computersimulation (Zonen- und Feldmodelle) *[11]*	**Zonenmodelle** Vereinfachte Gleichungssysteme (Gleichungen vom algebraischen Typ und gewöhnliche, gekoppelte Differenzialgleichungen 1. Ordnung). **Feldmodelle** Fundamentale Gleichungen, welche die grundsätzlichen Gesetzmässigkeiten der Strömungsmechanik (Navier-Stokes-Gleichungen) und der Thermodynamik berücksichtigen (Systeme von gekoppelten, nicht linearen, partiellen Differenzialgleichungen). Einflussfaktoren, die bei der Entwicklung von allgemeinen Naturbrandmodellen zu berücksichtigen sind, sollten zumindest sein: • Art und Anordnung der Brandlast (Heizwert), • Fläche des Brandherdes zum Zeitpunkt t = 0, • maximale Fläche des Brandherdes im Raum, • Ausbreitungsgeschwindigkeit des Brandes, gegebenenfalls in Abhängigkeit von der Brandbelastung und der Temperatur, • flächenspezifische Abbrandgeschwindigkeit der brennbaren Stoffe bei gegebener Ventilation bzw. Sauerstoffzufuhr, • Form und Verteilung sowie Luftbedarf des Brandgutes, • Verbrennungseffektivität, auch bei Löschmassnahmen, • Geometrie des massgebenden Brandabschnittes oder Raumbereiches, • thermische Eigenschaften (Wärmekapazität) der umgebenden Bauteile. [5], S. 116-117

Tab. 22: Allgemeine Naturbrandmodelle

Bemessungsgrundlagen, Abbildungen

Die Gleichungssysteme beschreiben (vgl. Tabelle 13)

- den Massenaustausch (Zonen- und Feldmodelle),
- den Energieaustausch (Zonen- und Feldmodelle),
- den Impulsaustausch (Feldmodelle),
- die Gaseigenschaften (Zonen- und Feldmodelle),
- den Austausch von Stoffkomponenten (in der Regel nur Feldmodelle).

Experimentelle Brandleistungskurven

Brandobjekt	Brandleistung
1. Stoffe und Waren	
Holzpaletten **Benzinlachen**	

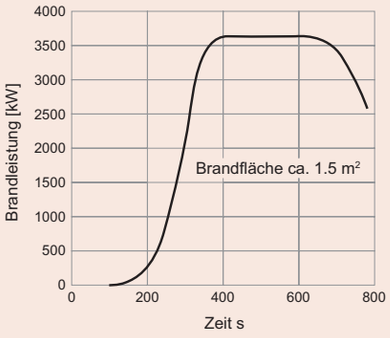


Abb. 55: Brandleistungskurve eines 1.22 m x 1.22 m x 1.22 m grossen Holzpalettenstapels

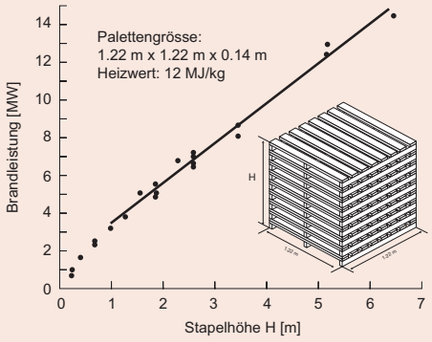


Abb. 56: Brandleistung in Abhängigkeit der Höhe eines aus 1.22 m x 1.22 m grossen Holzpaletten bestehenden Stapels

Bekleidung **Gepäck** **Kissen**	

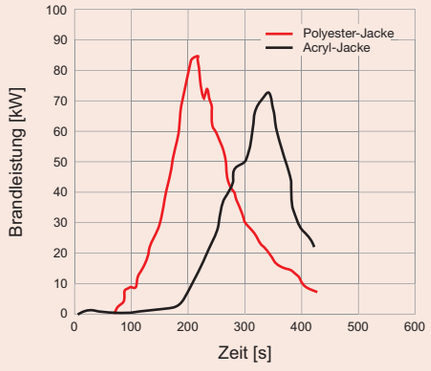


Abb. 58: Brandleistungskurven von Windjacken

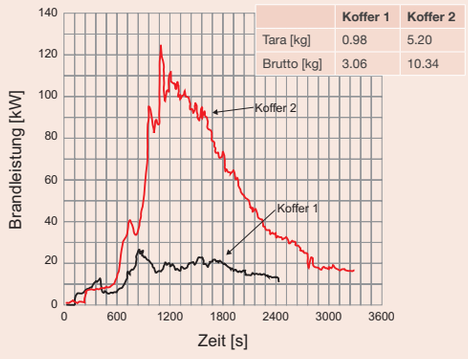
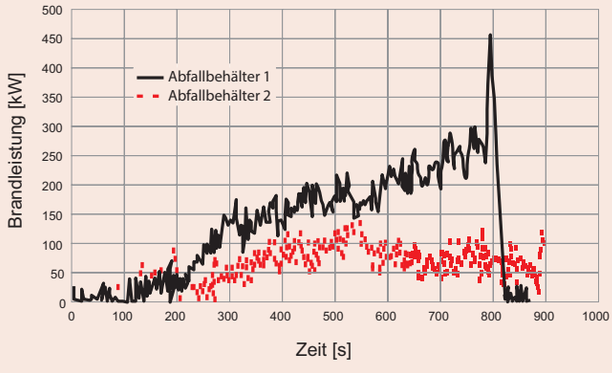


Abb. 59: Brandleistungskurven von Handkoffern

Abfallbehälter **Tannenbaum**	



Behälter 1

Behälter 2

Abb. 61: Brandleistungskurven eines Abfallbehälters aus HDPE mit 136 l zellulosischem Inhalt

Tab. 23: Experimentelle Brandleistungskurven

Bemerkungen

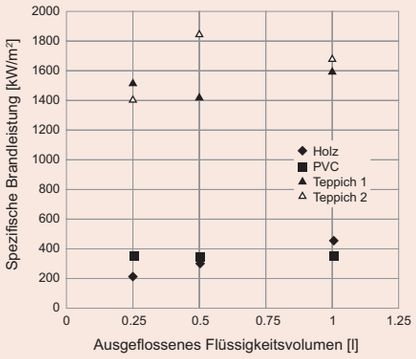


Abb. 57: Spezifische Brandleistung einer Benzinlache auf verschiedenen Bodenbelägen

Holzparkett

PVC-Fliessenfussboden

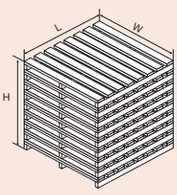
Teppich 2

Abbildungen 55-56

Brandleistung eines Holzpalettenstapels:

$$\dot{Q} = 919 \cdot L \cdot W \cdot (1 + 2.14 \cdot H) \cdot (1 - 0.03 \cdot M)$$

$\dot{Q}$	Brandleistung	[kW]
L	Palettenlänge	[m]
W	Palettenbreite	[m]
H	Stapelhöhe	[m]
M	Holzfeuchtigkeit	[%]



Annahme: H_u = 12 MJ/kg. [51], S. 3/32-3/33

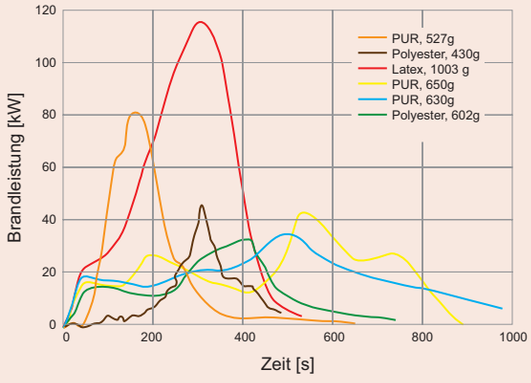


Abb. 60: Brandleistungskurven von (Kopf-)Kissen

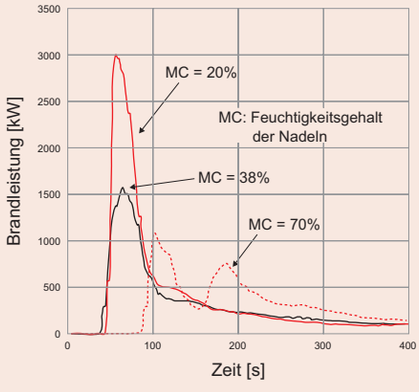


Abb. 62: Brandleistungskurven von 2.1 m hohen und 11 kg schweren Douglasien (Christbäume)

Abbildung 61

Der Verlauf der Brandleistungskurve hängt bei aus Polyethylen mit hoher Dichte (HDPE) bestehenden Kunststoffbehältern von deren Schmelzverhalten ab. [216], S. 4

Abbildung 62

Der Verlauf der Brandleistungskurve von brennenden Christbäumen wird hauptsächlich von den folgenden Parametern beeinflusst:

- Feuchtigkeitsgehalt der Nadeln,
- Baummasse,
- Baumart,
- Zündquelle.

Trockene Bäume brennen bei hoher Brandleistung sehr schnell ab. [51], S. 3/33

Experimentelle Brandleistungskurven

Brandobjekt	Brandleistung
1. Stoffe und Waren	
Matratzen	

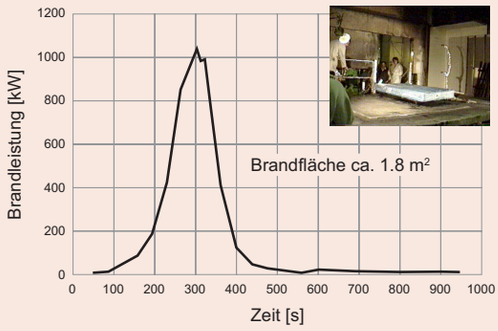


Abb. 63: Brandleistungskurve einer Matratze ohne Bettwaren, mit Brandentstehung in der Matratzenecke

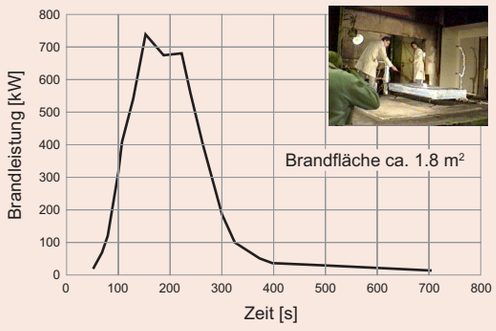


Abb. 64: Brandleistungskurve einer Matratze ohne Bettwaren, mit Brandentstehung in der Matratzenmitte

2. Elektrische Geräte	
Haushalt-geräte	

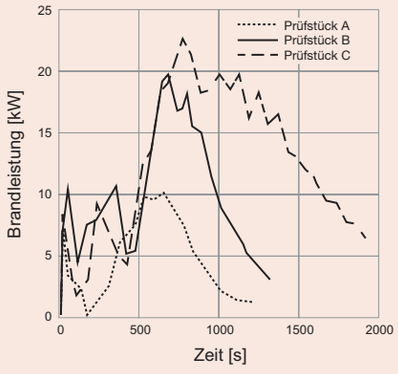


Abb. 65: Brandleistungskurven von Kaffeemaschinen

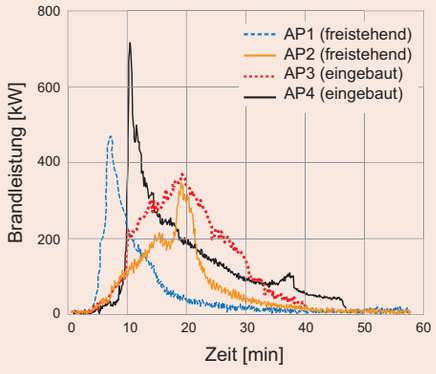


Abb. 66: Brandleistungskurven von freistehenden und eingebauten Geschirrspülern (ohne Inhalt)

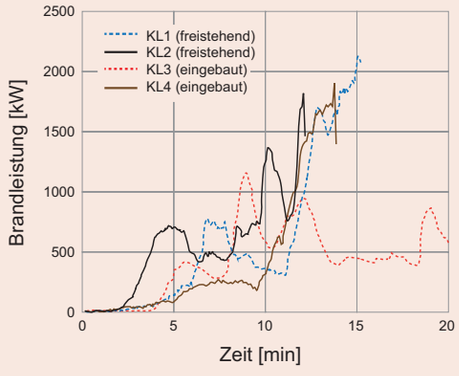


Abb. 68: Brandleistungskurven von freistehenden und eingebauten Kühl-/Gefrierschränken (ohne Inhalt)

Tab. 23: Experimentelle Brandleistungskurven

Bemerkungen

Maximale Brandleistung von Matratzen		
Füllmaterial	**Bezug**	**$\dot{Q}_{max}$**
Latex	PVC	2720 kW
Polyurethan	PVC	2630 kW
Polyurethan	Viskose	1580 kW

Tab. 23.1: Maximale Brandleistung von Matratzen inkl. Bettwaren (ohne Raum- und Ventilationsbeeinflussung, mit Zündung durch einen brennenden Papierkorb)

Es ist schwierig, die Brandleistung von brennenden Matratzen vorherzusagen, weil diese stark von der Raumgrösse, den Lüftungsbedingungen und dem Ort der Brandentstehung (Matratzenecke oder -mitte) abhängt. [51], S. 3/29

Für Bettwaren konnten maximale Brandleistungen von 38-200 kW ermittelt werden. [107], S. 20

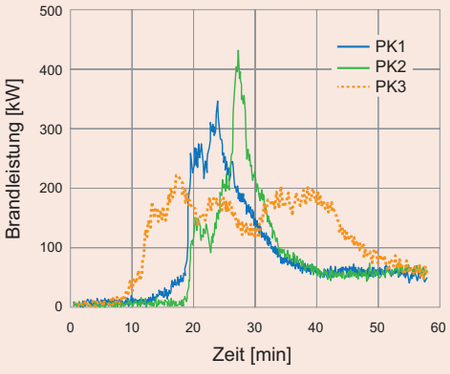


Abb. 67: Brandleistungskurven von freistehenden Waschmaschinen (ohne Inhalt)

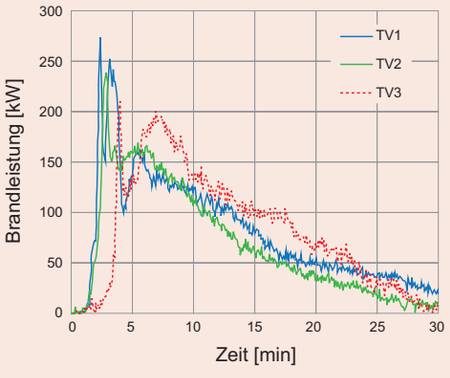


Abb. 69: Brandleistungskurven von Fernsehgeräten

Bei den von Valtion Teknillinen Tutkimuskeskus (VTT) in einem Versuchsraum nach ISO 9705 durchgeführten Tests wurden die elektrischen Haushaltgeräte mit einem 1-kW-Propangas-Brenner angezündet (mit Ausnahme des Waschmaschinen-Tests PK3). Die Zündung erfolgte im Bereich der elektrischen Einrichtung. [108], S. 15-16

Mit den Tests wurden im Durchschnitt die folgenden maximalen Brandleistungen ermittelt: [108], S. 46

- freistehende Kühl-/Gefrierschränke: 1970 kW
- eingebaute Kühl-/Gefrierschränke: 1526 kW
- freistehende Geschirrspüler: 411 kW
- eingebaute Geschirrspüler: 548 kW
- Waschmaschinen: 333 kW
- 25“/28“-CRT-Fernsehgeräte: 241kW
  CRT: cathode ray tube (Kathodenstrahlröhre)

Experimentelle Brandleistungskurven

Brandobjekt	Brandleistung
2. Elektrische Geräte	
IT-Geräte	

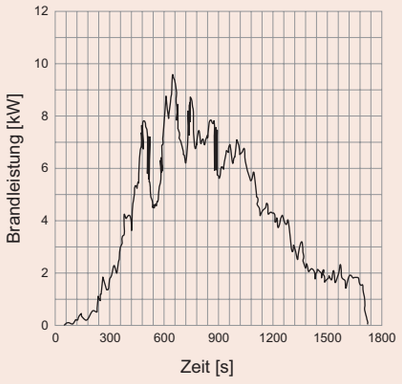


Abb. 70: Brandleistungskurve eines PC (Zentraleinheit)

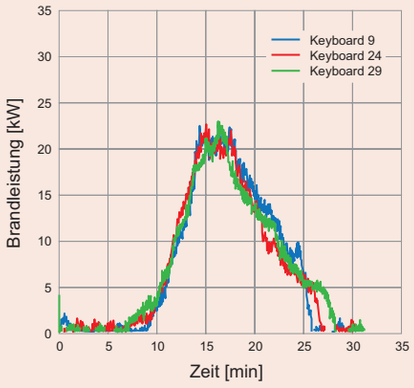


Abb. 71: Brandleistungskurven von PC-Tastaturen (Nadelflammen-Prüfverfahren)

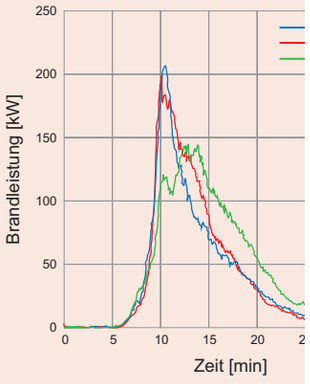


Abb. 72: Brandleistungskurven vo PC-Monitoren mit HIPS-Gehäuse flammen-Prüfverfahren)

3. Einrichtungsgegenstände	
Möbel	

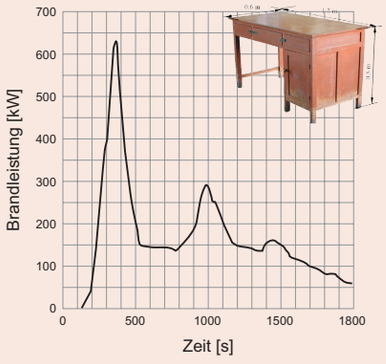


Abb. 74: Brandleistungskurve eines hölzernen Schreibtisches

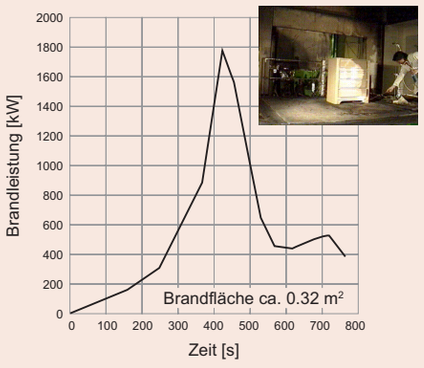


Abb. 75: Brandleistungskurve einer hölzernen Kommode

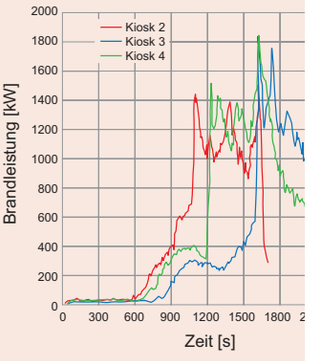


Abb. 76: Brandleistungskurven ei hölzernen Verkaufsstandes mit Ab flächen und ausgestellter Ware

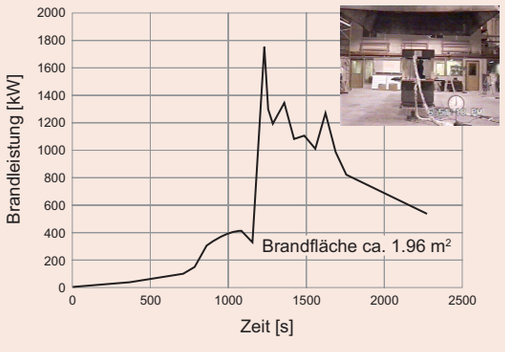


Abb. 78: Brandleistungskurve eines Verkaufs-standes

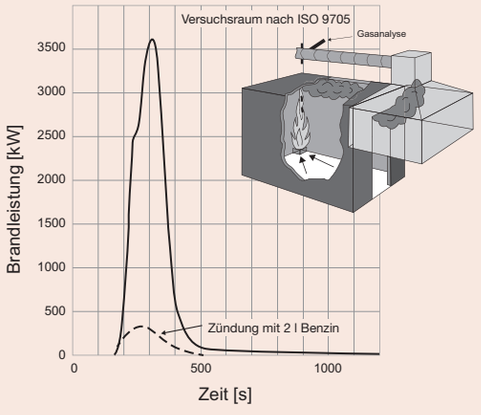
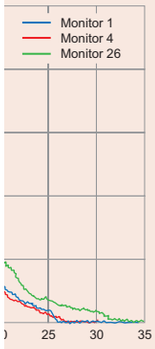


Abb. 79: Brandleistungskurve von 2 metallenen Zeitschriften-Ablagegestellen mit total 15 kg Papier

Tab. 23: Experimentelle Brandleistungskurven

Bemerkungen



]

en von 19“-CRT-
äusen (Nadel-

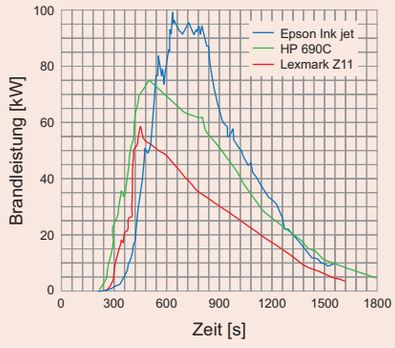
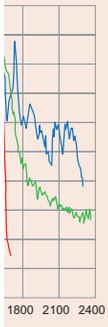


Abb. 73: Brandleistungskurven von PC-Druckern (ohne Papier und Toner)

Abbildung 72

Bei der von NIST durchgeführten Testserie mit 19“-CRT-Computer-Monitoren wurden sowohl aus verschiedenen Kunststoffarten bestehende Gehäuse als auch verschiedene Zündverfahren (Nadelflammen-Prüfverfahren, Strahlungsquelle, brennende Tastatur) berücksichtigt [CRT = cathode ray tube (Kathodenstrahlröhre)]. Die in Abbildung 72 dargestellte Versuchsreihe mit Gehäusen aus hochschlagfestem Polystyrol (HIPS = high impact polystyrene) und Zündung mit der Nadelflamme lieferten besonders hohe Brandleistungen. *[109]*



en eines
nit Ablege-
ıre

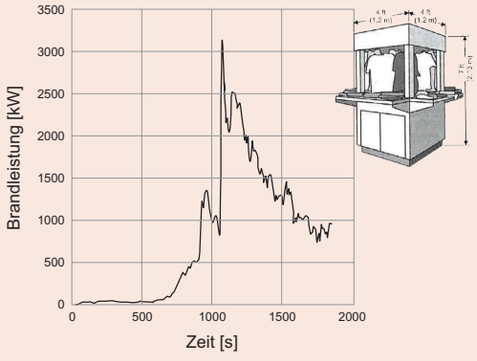


Abb. 77: Brandleistungskurve eines hölzernen Verkaufsstandes mit hochgeklappten Ablegeflächen

Abbildungen 76-77

Bei der von NIST im Möbel-Kalorimeter durchgeführten Versuchsreihe mit 1.2 m x 1.2 m grossen und 2.1 m hohen hölzernen Ständen für den Verkauf von T-Shirts wurde die Brandleistung nicht anhand des Sauerstoffbedarfs, sondern mithilfe des Massenverlustes ermittelt. Dabei wurden die Verkaufsstände zur Nachstellung eines elektrischen Kurzschlusses mit einem elektrischen Heizband entzündet.

Bei den in Abbildung 76 dargestellten Versuchen wurde die Konfiguration der Verkaufsstände möglichst identisch gehalten. Der Versuch von Abbildung 77 mit hochgeklappten Ablegeflächen und im Verkaufsstand verstauter Ware lieferte eine besonders hohe Brandleistung. *[110]*

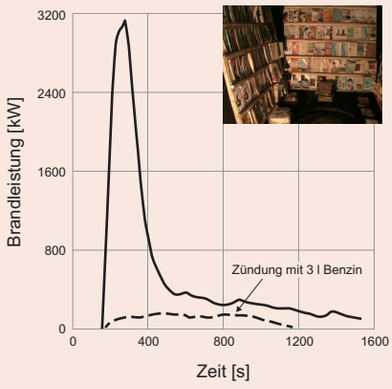


Abb. 80: Brandleistungskurve von 3 metallenen Zeitschriften-Ablagegestellen mit total 90 kg Papier

Abbildungen 79-80

Chow et al. führten die Tests in einem Versuchsraum nach ISO 9705 mit den folgenden Anordnungen durch:

- je ein Zeitschriften-Ablagegestell à 1.0 m x 2.2 m an der Seiten- und Rückwand, mit einer Belegung von insgesamt 15 kg Papier, wobei die Zündung mit 2 l Benzin erfolgte (vgl. Abbildung 79);
- je ein Zeitschriften-Ablagegestell à 2.0 m x 2.2 m an der linken und rechten Seitenwand sowie an der Rückwand, mit einer Belegung von insgesamt 90 kg Papier, wobei die Zündung mit 3 l Benzin erfolgte (vgl. Abbildung 80). *[111]*

Experimentelle Brandleistungskurven

Brandobjekt	Brandleistung
3. Einrichtungsgegenstände	
Möbel	

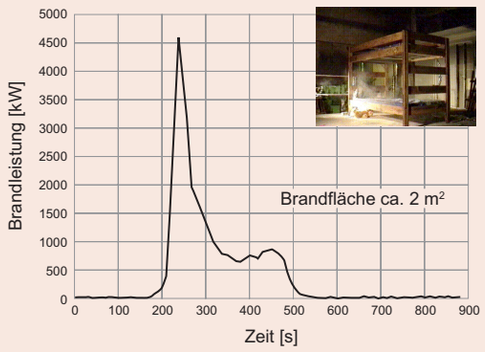


Abb. 81: Brandleistungskurve eines Etagenbettes

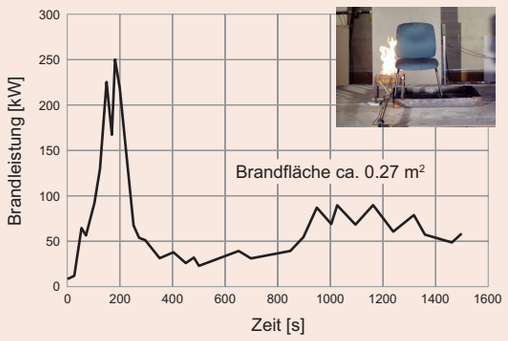


Abb. 82: Brandleistungskurve eines gepolsterten Schalenstuhls

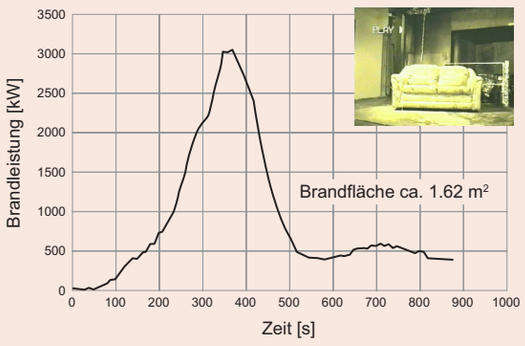


Abb. 84: Brandleistungskurve eines 2er-Sofas

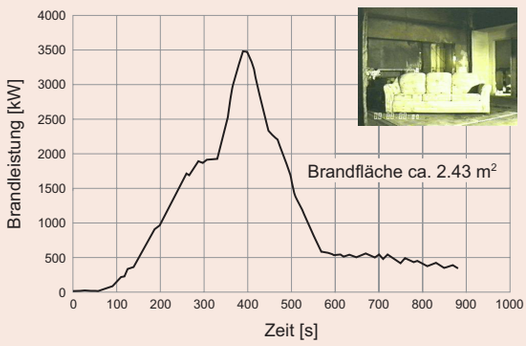
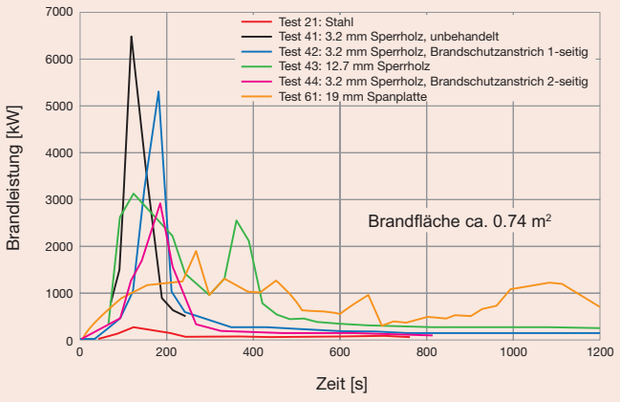


Abb. 85: Brandleistungskurve eines 3er-Sofas



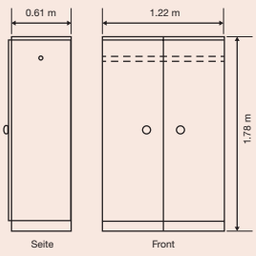


Abb. 87: Brandleistungskurven von Garderoben

Tab. 23: Experimentelle Brandleistungskurven

Bemerkungen

Abb. 83: Brandleistungskurve eines Bürostuhls

Abbildungen 82-83

Madrzykowski und Walton benutzten zur Nachstellung eines Papierkorbbrandes als Zündquelle einen 50 kW starken und 0.09 m² grossen Erdgasbrenner, der nach 200 s wieder abgeschaltet wurde. Die Möbelstücke wurden auf einer Bühne und unter einer Abgashaube derart platziert, dass keine Raumeffekte zu erwarten waren. [112], S. 34-35

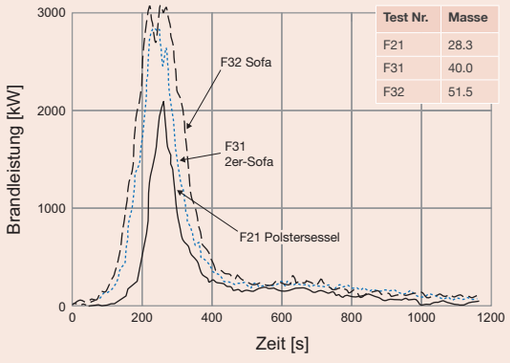


Abb. 86: Brandleistungskurven eines Polstersessels, 2er- und 3er-Sofas

Abbildung 86

Babrauskas, Lawson, Walton und Twilley benutzten zur Nachstellung eines Papierkorbbrandes als Zündquelle einen 50 kW starken und 0.05 m² grossen Erdgasbrenner, der nach 200 s wieder abgeschaltet wurde. Polstersessel und 2er-Sofa bestanden aus den folgenden Materialien:

- Polsterung: brandtechnisch verbesserter PU-Schaum (california foam),
- Bezug: Gewebe aus Polyolefinen,
- Rahmen: Holz. [50], S. 12, S. 29

Test Nr.	Aufbau / Material	Masse bb Material Garderobe [kg]	Masse bb Inhalt (Kleider/Papier) [kg]	$\dot{Q}_{max}$ [kW]
21	Stahl	0	1.93	270
43	12.7 mm Sperrholz	68.3	1.93	3100
41	3.2 mm Sperrholz, unbehandelt	36.0	1.93	6400
42	3.2 mm Sperrholz, einschichtiger Brandschutzanstrich	37.3	1.93	5300
44	3.2 mm Sperrholz, zweischichtiger Brandschutzanstrich	37.3	1.93	2900
61	19 mm Spanplatte	120.3	0.81	1900

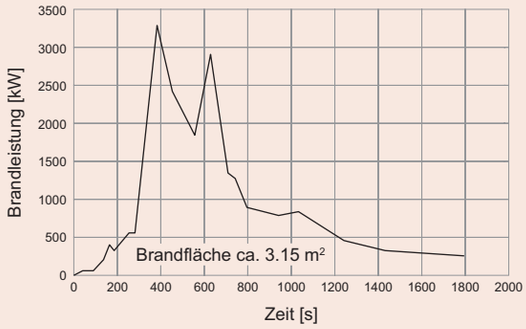
Prüflinge

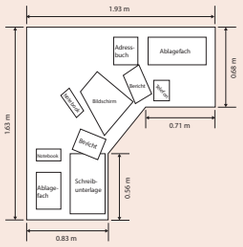
Die Versuche wurden im Möbel-Kalorimeter vom National Bureau of Standards (NBS), dem heutigen NIST, durchgeführt. Die aus Holzplatten gefertigten Garderoben wurden mit aus Polyester-Baumwoll-Geweben bestehenden Kleidungsstücken gefüllt.

Die Brandtests zeigten, dass sich die maximale Brandleistung umgekehrt proportional zur Stärke der Garderobenwand verhält, da dicke Platten die Flammenausbreitung behindern. Die mit den stärkeren Holzplatten einhergehende Brandlasterhöhung beeinflusst den Maximalwert der Brandleistung nicht. [51], S. 3/51-3/52; *[113]*

Experimentelle Brandleistungskurven

Brandobjekt	Brandleistung
4. Einrichtungen	
Arbeitsplatz	





Brandlast: 273.2 kg

Abb. 88: Brandleistungskurve eines Einzelarbeitsplatzes

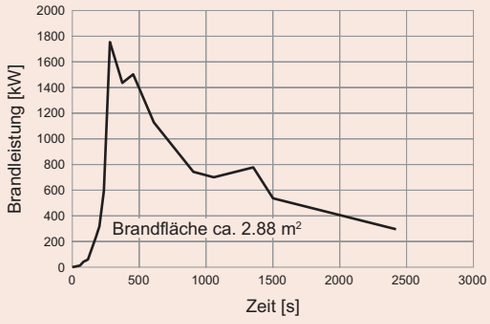
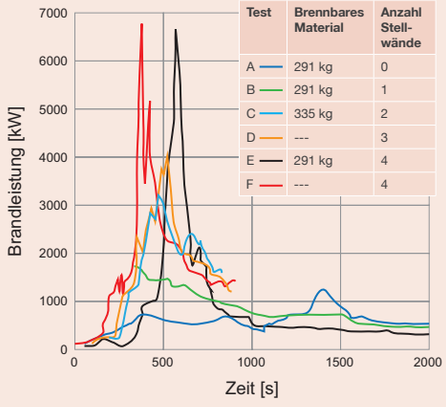
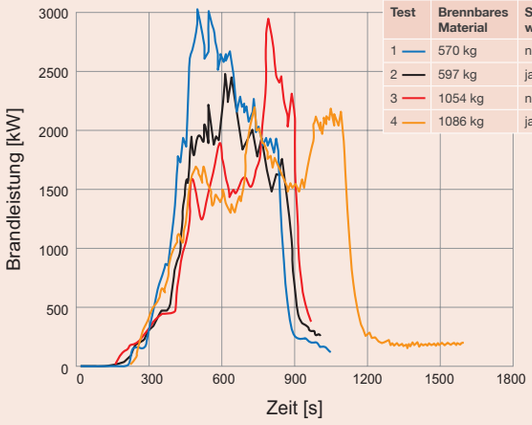


Abb. 90: Brandleistungskurve eines Einzelarbeitsplatzes mit 2 Stellwänden



Test	Brennbares Material	Anzahl Stellwände
A	291 kg	0
B	291 kg	1
C	335 kg	2
D	---	3
E	291 kg	4
F	---	4

Abb. 92: Brandleistungskurven von Einzelarbeitsplätzen



Test	Brennbares Material	Stellwände	$\dot{Q}_{max}$
1	570 kg	nein	3035 kW
2	597 kg	ja	2476 kW
3	1054 kg	nein	2957 kW
4	1086 kg	ja	2271 kW

Abb. 93: Brandleistungskurven von 4er-Arbeitsplätzen

Tab. 23: Experimentelle Brandleistungskurven

Bemerkungen

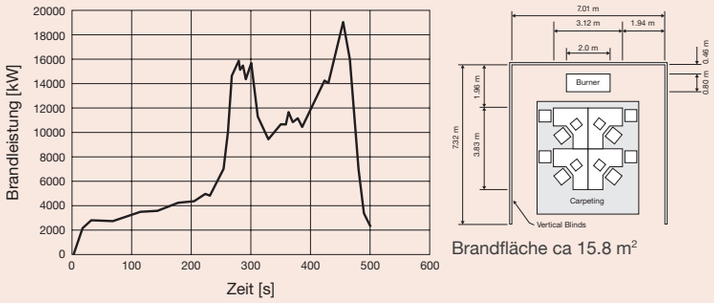
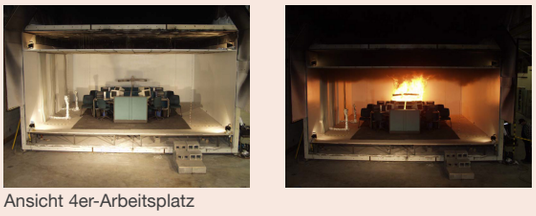


Abb. 89: Brandleistungskurve eines Mehrfach-Arbeitsplatzes



Ansicht 4er-Arbeitsplatz

Abbildung 88

Madrzykowski und Walton benutzten zur Nachstellung eines Papierkorbbrandes als Zündquelle einen 50 kW starken und 0.09 m² grossen Erdgasbrenner, der unter dem Tisch platziert und nach 200 s wieder abgeschaltet wurde. Die Möbelstücke wurden auf einer Bühne und unter einer Abgashaube derart platziert, dass keine Raum- und Ventilationseffekte zu erwarten waren. [112], S. 34-35

Abbildung 89

Madrzykowski und Walton benutzten als Zündquellen einen 50 kW Erdgasbrenner zur Nachstellung eines Papierkorbbrandes und einen 2 MW Heptanbrenner zur Simulation des Flammenübertritts aus einem benachbarten Brandraum. Die Möbel wurden in einem 7.0 m x 7.3 m x 3.4 m grossen Raum aufgestellt. [112], S. 56-60

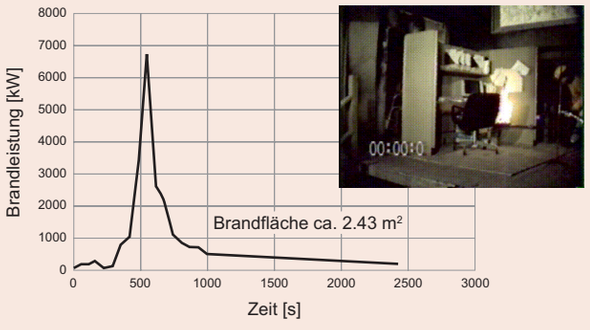


Abb. 91: Brandleistungskurve eines Einzelarbeitsplatzes mit 3 Stellwänden

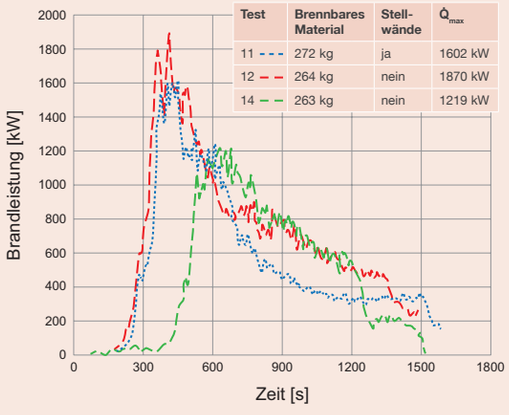


Abb. 94: Brandleistungskurven von Einzelarbeitsplätzen

Abbildung 92

Madrzykowski und Walton benutzten zur Nachstellung eines Papierkorbbrandes als Zündquelle einen 50 kW Erdgasbrenner, der nach 200 s wieder abgeschaltet wurde. Dabei wurden die Einzelarbeitsplätze mit einer variierenden Anzahl von gewebebespannten Stellwänden abgewandet. Abbildung 92 zeigt, dass Arbeitsplätze mit mehreren Stellwänden höhere Brandleistungen entwickeln. [106], S. 47-49; *[114]*

Abbildungen 93-94

Kakegawa verwendete als Zündquelle einen mit 0.2 kg Papier gefüllten Papierkorb aus Polypropylen, der eine maximale Brandleistung von 50-60 kW entwickelte. [51], S. 3/31-3/32; *[115]*

Experimentelle Brandleistungskurven

Brandobjekt	Brandleistung
5. Fahrzeuge	
Personen-wagen	

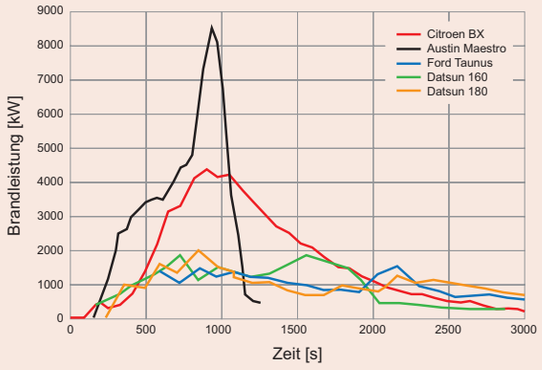


Abb. 95: Brandleistungskurven einzelner Personenwagen mit Baujahr Ende 70er- bis Mitte 80er-Jahre

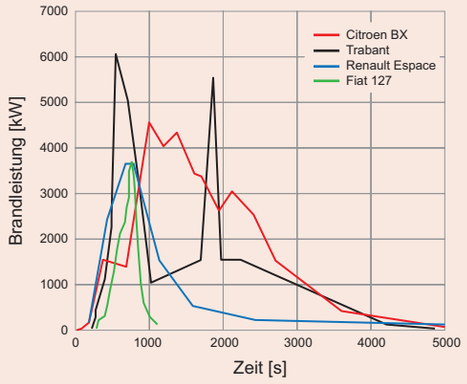


Abb. 96: Brandleistungskurven einzelner Personenwagen (Baujahr unbekannt)

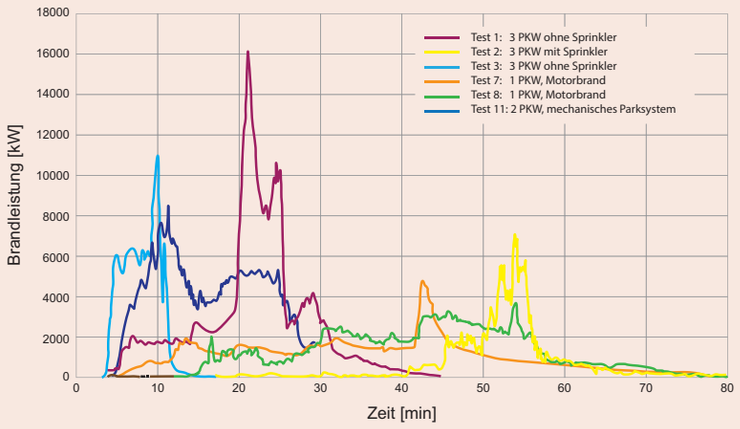
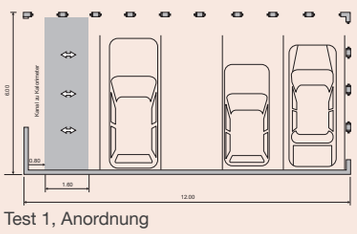
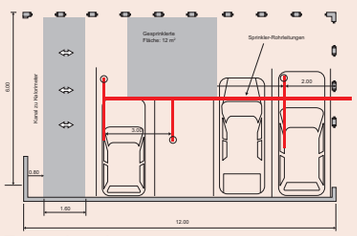


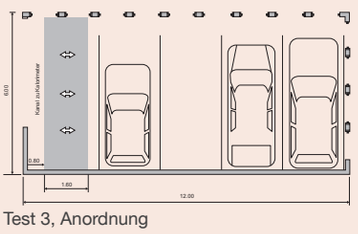
Abb. 98: Brandleistungskurven von mehreren bzw. einzelnen Personenwagen



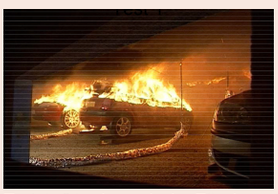
Test 1, Anordnung



Test 2, Anordnung



Test 3, Anordnung



Test 1, 21 min nach der Zündung

Test 2, 41 min nach der Zündung

Test 3, 7 min nach der Zündung

Tab. 23: Experimentelle Brandleistungskurven

Bemerkungen

Abbildungen 95-96

Das „Southwest Research Institute“ (SwRI) in San Antonio (Texas, USA) hat im Auftrag des „Motor Vehicle Fire Research Institute” (MVFRI) in Charlottesville (Virginia, USA) eine Datenbank für Brandversuche mit Personenwagen erstellt. Die „MS Access“-Datenbank beinhaltet die Ergebnisse von 34 Tests, die im Rahmen von 12 verschiedenen, in den Jahren 1994 bis 2004 weltweit durchgeführten Studien gewonnen wurden. Die zu den Prüflingen, Prüfinstituten, Publikationen und Prüfergebnissen erfassten Daten lassen sich in beliebiger Kombination abfragen. So kann unter anderem eine Grafik über die jährliche Zunahme des Heizwertes von Personenwagen erzeugt werden (vgl. Abbildung 97). *[116]*

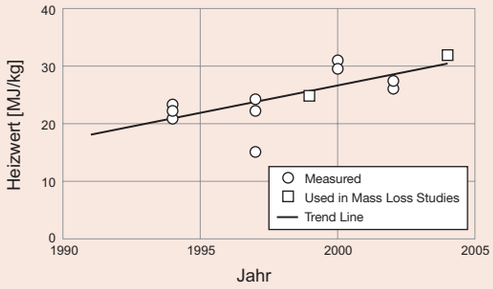


Abb. 97: Heizwert eines PKW in Abhängigkeit des Publikationsjahres der Versuchsergebnisse

Abbildung 98

Das „Department for Communities and Local Government“ (DCLG) und das „Building Research Establishment“ (BRE) verwendeten für die Tests betriebsbereite Personenwagen mit einem Tankinhalt von je 20 l. Die Zündung erfolgte mit einer auf dem Fahrersitz des Personenwagens Nr. 1 platzierten Holzkrippe und sollte eine Brandstiftung simulieren. Das auf der Fahrerseite liegende Fenster blieb geöffnet. *[117]*

Aus dem Forschungsvorhaben ergaben sich unter anderem die folgenden Erkenntnisse:

- Ein Feuerübersprung auf benachbarte Personenwagen kann unter Umständen innerhalb weniger Minuten (in einem Test innerhalb von 10 Minuten) erfolgen.
- Anhand der Brandtests konnte die Anwendbarkeit von CFD-Simulationen zur Ermittlung der Rauchausbreitung in Parkhäusern bestätigt und validiert werden. [117], S. 99-100

Test	Anzahl PKW	PKW-Nr.	Modell	Baujahr	Q̇
1	3	1	Renault Laguna	2002	16 MW
		2	Renault Clio	1998	
		3	Ford Mondeo	2003	
2	3	1	Renault Espace	2000	7 MW
		2	Seat Ibiza	2002	
		3	Land Rover Freelander	2002	
3	3	1	Renault Espace	1998	11 MW
		2	Peugeot 307	2004	
		3	Land Rover Freelander	2002	
7	1	1	Ford Focus	2002	4.8 MW
8	2	1	Renault Espace	2001	3.8 MW
		2	Peugeot 406	2001	
11	2	1	Peugeot 406	2001	8.5 MW
		2	Land Rover Freelander	2001	

Prüflinge

Test 7, Zündung

Test 11, Anordnung

Test 8, Anordnung

Test 11, 10 min nach der Zündung

Experimentelle Brandleistungskurven

Brandobjekt	Brandleistung
5. Fahrzeuge	

Bus

Lastwagen

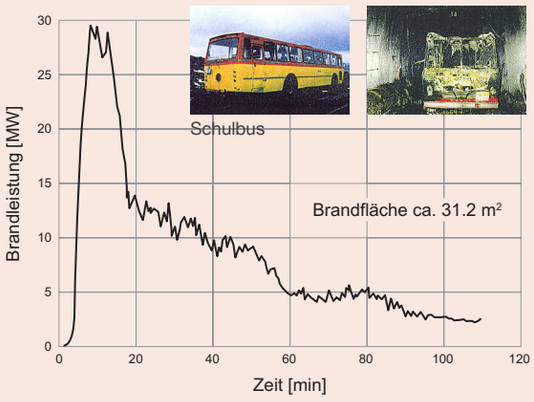


Abb. 99: Brandleistungskurve eines Schulbusses der Marke „Volvo“ aus den 60er-Jahren

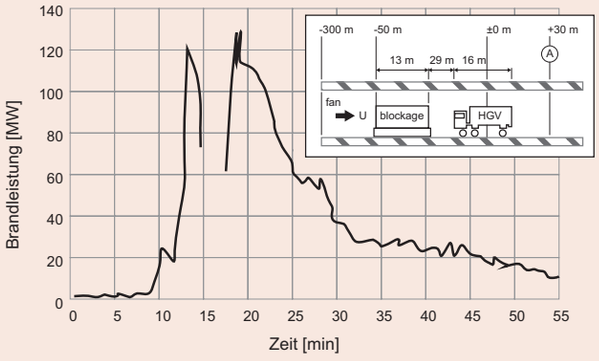
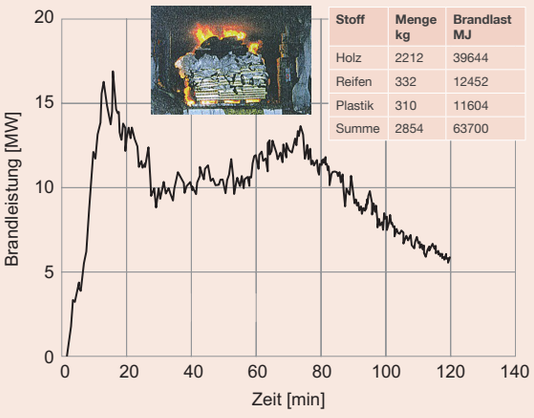


Abb. 100: Brandleistungskurve eines Sattelschleppers der Marke „Leyland DAF“ mit einer Ladung von 2 t Möbel



Stoff	Menge kg	Brandlast MJ
Holz	2212	39644
Reifen	332	12452
Plastik	310	11604
Summe	2854	63700

Abb. 101: Brandleistungskurve einer nachgestellten Lastwagenladung

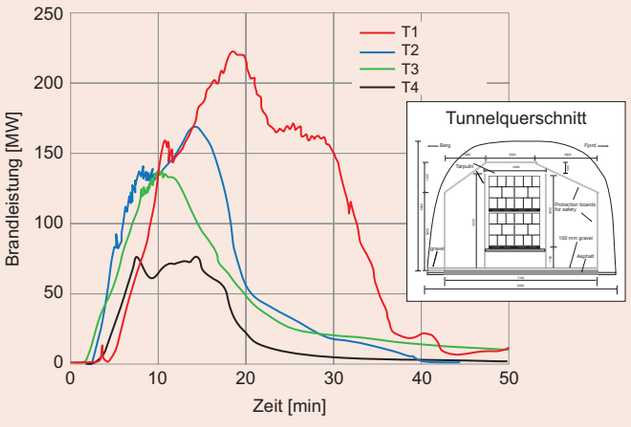


Abb. 102: Brandleistungskurven von nachgestellten Sattelschlepper-Aufliegern mit Ladung

Eisenbahn-wagen

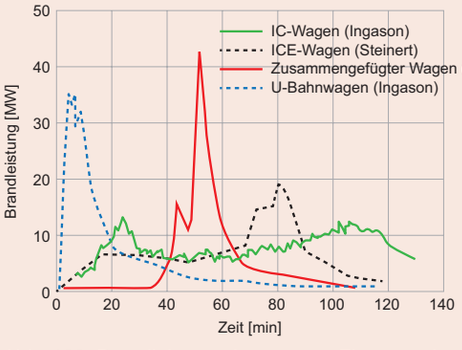
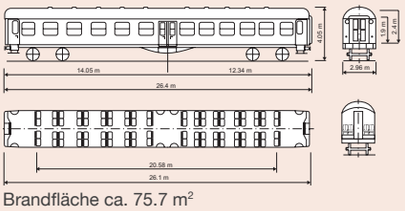


Abb. 103: Brandleistungskurven von Eisen- und U-Bahnwagen



Brandfläche ca. 75.7 m²

Innenansicht IC-Wagen

Prüfling	Autor(in)	Masse L x B x H [m]	Karosseri
IC-Wagen	Ingason	26.1 x 2.9 x 2.4	Stahl
ICE-Wagen	Steinert	26.1 x 2.9 x 2.4	Stahl
Zusammengefügter Wagen	Steinert		Stahl/Alu
U-Bahnwagen	Ingason	18.0 x 2.9 x 2.4	Aluminiu

Prüflinge

Tab. 23: Experimentelle Brandleistungskurven

Bemerkungen

Bauteil	Menge [kg]	Brandlast [MJ]
Möbel	1994	42750
Fussboden	600	11100
Reifen	600	23400
Führerhaus		7000
Treibstoff	50	1650
Summe		87400

Brandlasten für den gesamten LKW

LKW mit 2-t-Ladung

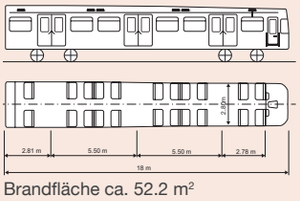
Brandfläche ca. 38.8 m²

Test Nr.	Ladung	Masse [kg]	Brandlast [GJ]
1	380 Holzpaletten 74 PE-Paletten	11010	244
2	216 Holzpaletten 240 PUR-Matratzen	6853	135
3	Polster-/Plastik-/Holzmöbel 10 grosse Reifen	8506	179
4	600 Wellkartons mit 18000 PS-Bechern, 40 Holzpaletten	2849	62

Prüflinge

Runehamar Tunnel

Brandfläche ca. 30.3 m²



Brandfläche ca. 52.2 m²

U-Bahnwagen

sserie	Brandlast [GJ]	$\dot{Q}_{max}$ [MW]	Literatur
	76.9	13	[118] [119]
	63.0	19	[198]
/Aluminium	55.0	43	[198]
inium	41.4	35	[118] [119]

Abbildungen 99-101

Die im Rahmen des EUREKA-Projektes EU 499 „FIRETUN“ vom „SP Technical Research Institute of Sweden“ durchgeführten Brandversuche fanden in einem 2.3 km langen, ca. 6 m breiten und ca. 5.5 m hohen Transporttunnel einer alten Kupfermine Nord-Norwegens statt. Die Prüflinge wurden 295 m von der Tunnelöffnung entfernt platziert. Beim Versuch nach Abbildung 101 wurde zusätzlich eine Tunnelventilation in Betrieb genommen. [118], S. 7-9; *[119] [120]*

Abbildung 102

Das „SP Technical Research Institute of Sweden“ führte die Brandversuche im stillgelegten 1600 m langen, 9 m breiten und 6 m hohen norwegischen Strassentunnel „Runehamar“ durch. Die Prüflinge wurden 1037 m von der ostseitigen Tunnelöffnung entfernt platziert und bestanden aus ca. 80 % zellulosischem und ca. 20 % plastischem Material. Zudem war die Auflieger-Attrappe mit einer Plane aus Polyester bedeckt. Alle Tests wurden unter Ventilation, welche die Tunnelluft mit etwa 3 m/s strömen liess, durchgeführt. Aus Sicherheitsgründen wurde das Tunnelgewölbe mit Brandschutzplatten verkleidet. [121], S. 57-59; [122], S. 11-14

Die im Rahmen des EUREKA-Projektes EU 499 „FIRETUN“ vom „SP Technical Research Institute of Sweden“ durchgeführten Brandversuche fanden in einem 2.3 km langen, ca. 6 m breiten und ca. 5.5 m hohen Transporttunnel einer alten Kupfermine Nord-Norwegens statt. Die Prüflinge wurden 295 m von der Tunnelöffnung entfernt platziert. [118], S. 7-9; *[119]*

Ergänzungen zu Tabelle 23

1. Versuchsrandbedingungen

Die Versuchsrandbedingungen, wie

- Brandraumgrösse,
- Ventilationsverhältnisse,
- Zündquelle (Ort, Brandleistung),
- Raumkonfiguration,
- Anteil der brennbaren Stoffe beim Prüfling (Menge, Heizwert und Brandlast),
- Anordnung der brennbaren Stoffe etc.,

sind im Einzelnen den angegebenen Quellen zu entnehmen.

Bei Brandversuchen werden Kurven und Gleichungen für die Brandleistungen in der Regel mithilfe der indirekten Kalorimetrie ermittelt. Weil das materialspezifische Verbrennungsluft-Heizwert-Verhältnis bekannt ist (vgl. Tabelle 27), lässt sich dabei die freigesetzte Brandleistung anhand des beim Abbrand gemessenen Sauerstoffbedarfs errechnen (oxygen consumption calorimetry).

Im Allgemeinen werden die Tests in einem auf die Dimensionen des Versuchsobjektes abgestimmten, grossvolumigen Raum durchgeführt (open-burning calorimeter). Anhand des beim brandlastgesteuerten Abbrand gemessenen Sauerstoffbedarfs wird mithilfe der indirekten Kalorimetrie die freigesetzte Brandleistung errechnet.

Bei aus solchen Versuchen gewonnenen Daten bleiben normalerweise die folgenden Effekte unberücksichtigt:

- die Wärmestrahlung der heissen Rauchgasschicht und der umgebenden Raumwände,
- ein allfällig begrenztes Sauerstoffangebot,
- die Wechselwirkung unter Objekten. [94], S. 27

Brandversuche zur Ermittlung der Brandleistung können auch in genormten, 3.6 m langen, 2.4 m breiten und 2.4 m hohen Versuchsräumen nach ISO 9705 durchgeführt werden, in denen der Abbrand brandlast- und ventilationsgesteuert abläuft und gegebenenfalls eine Flashover-Situation eintreten kann (room calorimeter). Auf in Räumen nach ISO 9705 durchgeführte Tests wird in Tabelle 23 explizit hingewiesen.

In jedem Fall muss durch ingenieurmässige Überlegungen das Zahlenmaterial des Experiments auf die objektspezifischen Randbedingungen des zu untersuchenden Problems übertragen und gegebenenfalls angepasst werden.

2. Festlegung der relevanten Brandleistungskurve

Für ein Brandszenarium sollte ein auf der sicheren Seite liegender Brandverlauf verwendet werden. Ein konservativer Brandverlauf lässt sich aus der umhüllenden Kurve einer Schar von aus mehreren Brandversuchen gewonnenen Brandleistungskurven erzeugen.

Aus Experimenten mit brennenden PKW abgeleitete Brandleistungskurven wurden beispielsweise publiziert:

- von U. Schneider, Technische Universität Wien (vgl. Abbildung 104) und
- vom Bureau de Normalisation, Norme belge NBN S 21-208-2/prA1 (vgl. Abbildungen 105-106).

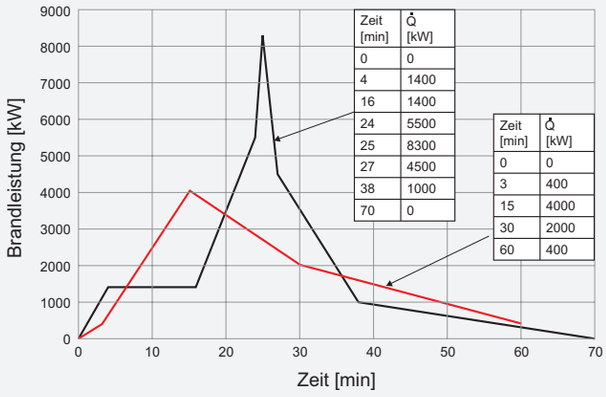


Abb. 104: Umhüllende Brandleistungskurven von betriebsbereiten Personenwagen

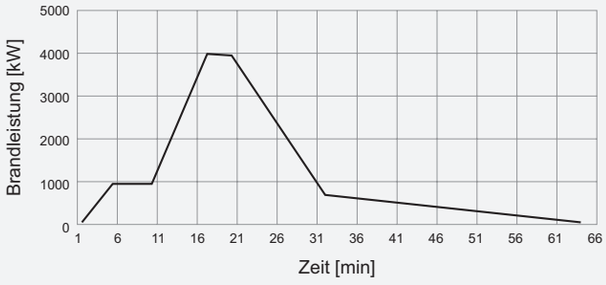


Abb. 105: Kurve der konvektiven Brandleistung eines brennenden Personenwagens

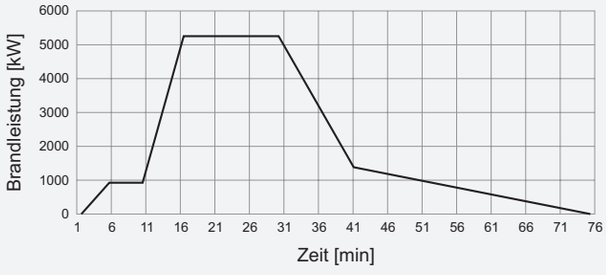


Abb. 106: Kurve der konvektiven Brandleistung von zwei brennenden Personenwagen

Die belgische Norm NBN S 21-208-2/prA1 ergänzt die beiden Brandleistungskurven gemäss Abbildungen 105-106 mit je einer Datentabelle, die minütlich die totale und konvektive Brandleistung, den Umfang und die Fläche des Brandes, die freigesetzte totale Energie, den Massenverlust, die Massenverlustrate, die Rauchproduktion und die Rauchproduktionsrate angibt. Es ist zu beachten, dass die beiden Brandleistungskurven den konvektiven Anteil Q_c der Gesamt-Brandleistung Q_t angeben ($Q_c = 0.66 \cdot Q_t$). [123], S. 15-17, S. 21-24

5.5 Anwendung der Feldmodelle

Anhand der in Tabelle 24 aufgelisteten Themen betreffend

- Diskretisierungsverfahren – d.h. Verfahren zur Umwandlung der Differenzialgleichungen in algebraische Gleichungen – im Speziellen:
  - Einsatzgrenzen verfügbarer Netztypen,
  - Gestaltung des Netzaufbaus,
  - Wahl der Ordnung des Diskretisierungsfehlers;
- Bestimmung der Berechnungszeitschrittweite;
- Verwendung von Submodellen, wie
  - Turbulenzmodelle,
  - Verbrennungs- bzw. Brandquellenmodelle,
  - Strahlungsmodelle,
  - Auftriebsmodell,
  - Sprinklermodelle,
  - Wandmodelle;
- Umgang mit nicht oder ungenau definierten Randbedingungen

wird vorgeschlagen, wie Feldmodelle anzuwenden sind, indem der Ansatz oder das Problem der Modellierung beschrieben und die daraus entstehenden Effekte, Konsequenzen und Massnahmen zur Umgehung der Probleme aufgezeigt werden.

Anwendung der Feldmodelle				
Thematik		**Modellierungsansatz, Modellierungsproblem**	**Effekte,**	**K**
Netztypen	**Strukturierte kartesische Netze**	Die Netze spannen geradlinige, sechsflächige (hexaedrische) Elemente auf.	**Eine sinnvolle Netzgenerierung mithilfe eines adäquaten Netztyps verlangt vom Anwender eine Vorstellung über das Verhalten des Strömungsfeldes bereits vor der eigentlichen Simulation!**	
	Strukturierte krummlinige Netze	Die Netze erzeugen krummlinige, sechsflächige (hexaedrische) Elemente.		
	Unstrukturierte Netze	Die Netze formen vierflächige (tetraedrische) oder komplexer geformte Elemente. Es sind keine stetigen Netzlinien erkennbar.		
	Hybride Netze	Kombinationen aus strukturierten und unstrukturierten Netzen.		
Netzaufbau (Diskretisierung)		Strömungsgebiete mit grossen/kleinen Gradienten. Grosse Längenskalen.		
		Expansionsrate des Netzes (= Grössenverhältnis von jeweils zwei benachbarten Netzelementen).		
		Seitenverhältnisse von Netzelementen (Aspect Ratio).		
		Netzwinkel (= Winkel zwischen den Gitterlinien).		
		Grösse der Netzelemente. Anzahl Knoten (Gitterpunkte).		
Diskretisierungsfehler		Wahl der Ordnung des Diskretisierungs- oder Abbruchfehlers.		

Tab. 24: Anwendung der Feldmodelle

Konsequenzen	Massnahmen
Gekrümmte oder schräge Oberflächen von Raumbegrenzungen lassen sich nur durch treppenförmige Gitter abbilden, wodurch die Oberflächen vergrössert modelliert werden.	Abschätzung des Einflusses der Oberflächenvergrösserung, die eine Strömungsverzögerung durch erhöhte Wandreibung sowie einen verstärkten Wärmeübergang an die umgebende Wand bewirkt, auf die Ergebnisse.
Die Netzlinien bzw. Netzelemente können den gekrümmten oder schrägen Oberflächen von Raumbegrenzungen folgen.	
Die Netze sind einfach zu erzeugen und lassen sich an beliebig kompliziert geformte Oberflächen anpassen. Hingegen ist das diskretisierte Gleichungssystem komplexer als bei den strukturierten Netzen und somit schwieriger und ungenauer zu lösen.	
Kompromiss zwischen strukturierten und unstrukturierten Netzen.	
Um tragfähige Ergebnisse zu erhalten, erfordern Gebiete, in denen die strömungs- und brandphysikalischen Grössen starke Änderungen erfahren, feinmaschige Netze mit vielen bzw. kleinen Netzelementen. Die grossen Längenskalen (z.B. Flamme versus Gebäudeabmessungen) verunmöglichen, aufgrund beschränkter Rechenleistung, in vielen Fällen homogene Netze.	Erzeugung inhomogener Netze mit vielen kleinen Netzelementen in Strömungsgebieten mit hohen Gradienten und entsprechend grösseren Elementen in Gebieten mit kleinen Gradienten (Netzkompression mit ungleichmässiger Verteilung der Netzelemente im Strömungsraum).
Beeinflussung des Abbruch- und Diskretisierungsfehlers (Rechengenauigkeit).	Grössenverhältnis ≤ 1.5 wählen. [64], S. 41
Beeinflussung des Konvergenzverhaltens.	Der Grenzwert für das Aspect Ratio ist dem Handbuch des verwendeten CFD-Programms zu entnehmen. [64], S. 41
Beeinflussung des Abbruchfehlers (Rechengenauigkeit).	Der Netzwinkel soll zwischen 20° und 160° liegen. [64], S. 40
Ein Netz mit hohem Feinheitsgrad erzeugt eine hohe Rechengenauigkeit, aber auch einen grossen Rechenaufwand (und umgekehrt).	Strömungsrelevante Geometrien sollten mit mindestens 5 Knoten pro Kantenlänge abgebildet werden. [64], S. 41; [124], S. 281-282 Öffnungen und Durchlässe sollten mit mindestens 5 Knoten auf der kurzen Achse abgebildet werden. [64], S. 41 Im Bereich der Konvektionsströmung oberhalb der Brandquelle, Kantenlänge ≤ 0.15 m wählen. [64], S. 41 Galerien sollten in der Höhe mit mindestens 10 Knoten bzw. mit einer Kantenlänge ≤ 0.30 m über der lichten Höhe abgebildet werden. [64], S. 41 Der Feinheitsgrad des Netzes wird ebenfalls durch die verwendeten physikalischen Submodelle festgelegt (s.u.). Im Allgemeinen liegen sinnvolle Zellgrössen bei 1-20 cm. [5], S. 138
Beeinflussung des Konvergenzverhaltens und der Qualität von Ergebnissen.	Für gute Ergebnisse sollten Diskretisierungsverfahren mit einem Abbruchfehler ≥ 2. Ordnung verwendet werden. [64], S. 42; [124], S. 278 Abbruchfehler 1. Ordnung sollten nur bei fehlender Konvergenz verwendet und immer mit einer gründlichen Fehlerabschätzung gekoppelt werden. [64], S. 42

Anwendung der Feldmodelle				
Thematik		**Modellierungsansatz, Modellierungsproblem**	**Effekte,**	**K**
Zeitschrittweite der Berechnung		Wahl eines hinreichend kleinen Zeitschrittes.		
Turbulenzmodelle	**Direct-Numerical-Simulation** (DNS-Turbulenzmodell)	Direkte Auflösung (Berechnung) der turbulenten Strömung. Erfassung der turbulenten Bewegung mit den Navier-Stokes-Gleichungen.	**Die Verwendung einer Turbulenzmethode auf zu groben Netzen und/oder mit zu grossen Zeitschritten kann zu grossen Fehlern führen!** [64], S. 38	
	Large-Eddy-Simulation (LES-Turbulenzmodell) oder **Detached-Eddy-Simulation** (DES-Turbulenzmodell)	Mehrgleichungs-Turbulenzmodelle. Abbildung der kleineren Wirbel mit einem Turbulenzmodell und Auflösung bzw. direkte Berechnung der grösseren Turbulenzstrukturen mit den Navier-Stokes-Gleichungen.		
	Standard-k-ε-Turbulenzmodell oder **k-ω-SST-Turbulenzmodell**	Zweigleichungs-Turbulenzmodelle.		
	Reynolds-gemitteltes Navier-Stokes-Turbulenzmodell (RANS-Turbulenzmodell)	Keine Auflösung (Berechnung) der turbulenten Strömung. Zeitliche und/oder räumliche Mittelung der charakteristischen Strömungsgrössen bzw. Navier-Stokes-Gleichungen.		
Verbrennungs-/Brandquellenmodelle [1)]	**Volumen-Wärmequelle**	Erfassung der Effekte des Verbrennungsprozesses von Feststoffbränden, wie Energie- und Rauchfreisetzung, über einem vorgegebenen, endlichen Raumvolumen. Dabei wird die Freisetzung über das Volumen gleichmässig verteilt angenommen.	**Das Verbrennungsmodell muss das Verhalten der Flammenzone und der Rauchgassäule angemessen abbilden, weil dies den Rauchgastransport in den brandfernen Zonen massgeblich beeinflusst. Für die Brandleistung und die Schadstoffproduktionsrate werden i.A. separate Quellterme benutzt.** [125], S. 28	
	Flächen-Wärmequelle	Erfassung der Effekte des Verbrennungsprozesses – im Wesentlichen die Energie- und Rauchfreisetzung – von Flüssigkeitsbränden auf einer vorgegebenen, endlichen Fläche, wobei die Freisetzung auf der Fläche gleichmässig verteilt angenommen wird.		
	Detaillierte Verbrennungsmodelle	Das Volumen (Flammenzone), in dem die Verbrennung und die Wärmefreisetzung stattfinden, wird errechnet. Die meisten Modellansätze unterstellen, dass der Verbrennungsprozess ohne Verzögerung in einer einstufigen Reaktion der folgenden Form abläuft: Brennstoff + Luft → Produkt.		

Tab. 24: Anwendung der Feldmodelle

Konsequenzen	Massnahmen
Genügend genaue Auflösung von physikalischen und zeitabhängigen (transienten) Effekten. Beeinflussung des Konvergenzverhaltens und der Qualität von Ergebnissen.	Die Zeitschrittweite muss mit dem Feinheitsgrad des Netzes übereinstimmen: je kleiner die Netzelemente, desto kleiner die Zeitschrittweite. Bei Verwendung des LES-Turbulenzmodells oder kleiner Netzelemente sollte die Zeitschrittweite ca. 0.1-0.01 s betragen. [5], S. 138; [64], S. 43
Sehr feines Rechengitter bzw. sehr kleine Netzelemente und sehr kleine Zeitinkremente erforderlich (mehr als 1000 Knoten pro cm), was immens lange Rechenzeiten bewirkt.	Infolge des hohen Rechenaufwandes für kommerzielle Zwecke kaum anwendbar.
Feines Rechengitter erforderlich, jedoch weniger fein als beim DNS-Turbulenzmodell. Der Rechenaufwand für DES-Simulationen liegt um das 10-fache, für LES-Simulationen um das 100-fache höher als bei der Verwendung von Zweigleichungs-Turbulenzmodellen.	In strömungstechnisch relevanten Bereichen sollte die Kantenlänge der Netzelemente fallspezifisch hinreichend klein, z.B. ≤ 10-20 cm, gewählt werden. [64], S. 42 Zudem sei auf die Vorschläge betreffend Wahl der Netzelementgrösse und Anzahl Knoten bei strömungsrelevanten Geometrien hingewiesen (vgl. Themenzeile „Netzaufbau“).
Guter Kompromiss zwischen Rechenaufwand und Zuverlässigkeit.	
Weniger feines Rechengitter erforderlich, jedoch fein genug, um die zeitlich und/oder räumlich gemittelten Strömungseigenschaften korrekt abzubilden.	
Einfachste Art, einen Brand zu modellieren (Normalfall). Grösse und Form des Volumens oder der Fläche sollten der Charakteristik der zu erwartenden Flammenzone entsprechen. Die Flammenhöhe wird mit empirischen Gleichungen (Plume-Formeln) ermittelt. Der Verbrennungsprozess in der Flamme wird nicht modelliert, sondern nur der damit verbundene Transport von Energie und Rauch an die Umgebung.	Die Energiefreisetzung im endlichen Raumvolumen bzw. auf einer endlichen Fläche sollte derart festgelegt werden, dass die durch den Bemessungsbrand vorgegebene konvektive Brandleistung $\dot{Q}_C$ (= gesamte Brandleistung $\dot{Q}$ abzüglich Strahlungsanteil) exakt erreicht wird. Dabei sollte darauf geachtet werden, dass die Grösse des Volumens bzw. der Fläche und die Brandleistung miteinander verträglich sind. Andernfalls besteht die Gefahr, dass die Temperatur im Bereich der Brandquelle deutlich von der typischen Flammentemperatur (ca. 800-1300 °C) abweicht. Weil die Ausdehnung der Flammenzone vorgegeben werden muss, eignen sich die Wärmequellenmodelle für Anwendungen, bei denen die Form und das Volumen der Flamme bekannt sind. Dies ist dann der Fall, wenn die Flammenzone nicht durch lokale Strömungen beeinflusst wird. [64], S. 38-39; [125], S. 27-28, S. 32
Die Berechnung der Wärmeverteilung in der Flammenregion und der Beeinflussung derselben durch lokale Strömungsfelder kann zu ungenauen, nicht verwertbaren Ergebnissen führen, weil die stoffliche Zusammensetzung des Brandgutes und die Reaktionskinetik nicht (hinreichend) bekannt sind.	Verbrennungsmodelle eignen sich für Anwendungen, bei denen die Form und das Volumen der Flamme durch lokale Strömungsphänomene beeinflusst werden. Dies ist z.B. bei in der Nähe von Öffnungen oder Wänden liegenden Flammen und bei Flammen, die von starken Raumströmungen oder von einem Mangel an Verbrennungsluft beeinflusst werden, der Fall. [125], S. 27-28, S. 32

Anwendung der Feldmodelle

Thematik		Modellierungsansatz, Modellierungsproblem	Effekte,
Strahlungsmodelle [1]	**Modell des fraktionellen Wärmeverlustes**	Vereinfachte Modellierung, indem der von der Flamme ausgehende Strahlungsanteil ignoriert und für die freigesetzte Wärmeleistung des Brandes nur der konvektive Anteil genommen wird.	
	Modell der Wärmeübertragung durch Strahlung zwischen Rauchgasen und Wänden	Die Übertragung der Wärmestrahlung findet zwischen dem Brandrauch und den Raumwänden statt. Sie wird als Funktion der Wand- und Rauchgastemperaturen und dem Emissionsvermögen des Rauchs ausgedrückt.	
	Sechser-Fluss-Modell	Es wird angenommen, dass die Wärmestrahlung nur entlang der lokalen Koordinatenachsen des Elementes übertragen wird und dass der Strahlungsfluss durch jede der sechs Flächen eines Netzelementes gleichförmig ist.	Es ist die Berechnung des lokalen Emissions- und Absorptionsvermögens erforderlich. [2]
	Modell der diskreten Wärmeübertragung	Die Übertragung von Wärme durch Strahlung findet in mutmasslich festgelegten Richtungen zwischen zwei Wänden statt. Reflexionen werden vernachlässigt.	
	Monte-Carlo-Simulation	Eine Anzahl Strahlen wird in zufälliger Richtung emittiert und verfolgt, bis diese Strahlen auf eine Wand oder ein anderes Hindernis treffen oder aus dem Rechenraum verschwinden.	
Auftriebsmodell		Die Boussinesq-Approximation nimmt für die meisten Terme der Impulsgleichungen eine von der Temperatur unabhängige, konstante Dichte an (der thermische Auftrieb wird in der Impulsgleichung über einen Quellterm berücksichtigt).	
Sprinklermodelle		Die empirischen Gleichungen betreffend Tropfenbildung und Verdampfung gelten für spezifische, nicht zu verallgemeinernde Bedingungen. Die Ausbreitung des Wasserdampf-Rauchgas-Gemisches ist sehr komplex und ungewiss. Diesbezüglich sei auf den erläuternden Teil von Tabelle 10 verwiesen.	

Tab. 24: Anwendung der Feldmodelle

Erläuterungen zu Tabelle 24

[1] Zwischen den Verbrennungsmodellen und den Strahlungsmodellen sind beliebige Kombinationen denkbar. [125], S. 30

[2] In wärmestrahlungstechnischer Hinsicht sind CO, CO_2, H_2O, CH_4 und Russ die wichtigsten Rauchgaskomponenten. Diese und die beteiligten Oberflächen besitzen unterschiedliche (lokale) Emissions- und Absorptionskoeffizienten. Während CO, CO_2, H_2O und CH_4 in diskreten Frequenzbereichen strahlen, emittiert Russ über alle Wellenlängen Strahlungsenergie. [125], S. 10

[3] Im Gegensatz zur Annahme einer konstanten Wandtemperatur, bewirkt die Annahme adiabater Wände eine schnellere Rauchausbreitung mit einer höheren Aufkonzentrierung der Rauchgase in der Heissgasschicht und entsprechend weniger Rauchgase in der raucharmen Schicht. [125], S. 35

Konsequenzen	Massnahmen
Der von der Flamme ausgehende Strahlungsanteil wird vernachlässigt, wie auch alle anderen durch Strahlung verursachten Wärmetransporte (z.B. Wärmestrahlung von Rauchgasen an die umgebenden Wände, Wärmestrahlung innerhalb der Rauchgasschicht).	Alternative zur Vernachlässigung des Strahlungsanteils: Definition einer A-priori-Wärmeverteilung für die von der Wärmestrahlung beeinflussten Modellbereiche. Richtwerte für die Energieanteile: 20-30 % Strahlungsanteil, 70-80 % Konvektionsanteil (vgl. Kapitel 4.6).
Wärmestrahlung wird nur zwischen der Wand und den an dieselbe angrenzenden Netzelementen (Zellen) transportiert.	Die Modelle „fraktioneller Wärmeverlust“ und „Wärmeübertragung durch Strahlung zwischen Rauchgasen und Wänden“ lassen sich kombinieren.
Das Gleichungssystem zur Berechnung des Quellterms der Wärmestrahlung wird stark vereinfacht, die Genauigkeit ist jedoch stark richtungsabhängig.	Die Strahlungsmodelle „diskrete Wärmeübertragung“ und „Monte-Carlo-Simulation“ sind des hohen Modellierungs- und Rechenaufwandes wegen für grosse, komplexe Räume kommerziell kaum anwendbar.
Es werden nur die massgeblichen Strahlungsrichtungen und auch nur eine begrenzte Zahl an diskreten Strahlen berücksichtigt. Die Genauigkeit der Ergebnisse und der Rechenaufwand hängen von dieser Wahl ab.	Aufgrund der T^4-Abhängigkeit im Stefan-Boltzmann-Gesetz ist die Nichtlinearität hoch, sodass an den Gleichungslöser des verwendeten CFD-Codes hohe Anforderungen bestehen. Deshalb sollte die Einhaltung der Konvergenzkriterien genau überprüft werden. Für die Flamme als Strahlungskörper ist ein geeignetes, nachvollziehbares Flammenmodell zu finden.
Die Qualität der Ergebnisse hängt von der Anzahl Strahlen ab. Dieser Modellansatz erfordert für eine grosse Anzahl von Strahlen – typischerweise Tausende – einen hohen Rechenaufwand, bietet jedoch für komplexe Anordnungen Flexibilität und die präzisesten Lösungen.	Abhilfe: Zur einfachen Berechnung der lokalen Emissions-/Absorptionskoeffizienten kann die Rauchgasschicht als homogen, grau und isotherm angenommen werden. Somit gibt es lediglich eine Strahlungstemperatur und nur einen Emissions-/Absorptionskoeffizienten. Als Emissions-/Absorptionskoeffizient für Rauchgase kann der (mittlere) Wert $\varepsilon_{Rauch} \approx 0.6$ verwendet werden. [64], S. 40
An den Gleichungslöser des verwendeten CFD-Codes bestehen geringere Anforderungen. Die Boussinesq-Approximation darf nur dann angewendet werden, wenn im ganzen Strömungsgebiet die Temperaturdifferenzen gering sind ($\Delta\vartheta \leq$ 30-50 K). Zumindest für die Brandherdnähe trifft dies nicht zu, sodass bei der Simulation der Brand- und Rauchausbreitung signifikante Fehler auftreten können. [64], S. 38; [125], S. 28-29	Wenn für den konkreten Fall nicht nachgewiesen werden kann, dass der Einfluss der Boussinesq-Approximation auf die Ergebnisse vernachlässigbar ist, sollten in Brand- und Rauchausbreitungssimulationen die Auftriebseffekte mithilfe des idealen Gasgesetzes modelliert werden. [125], S. 29
Sprinklermodelle können nicht verwertbare Simulationsergebnisse liefern.	Im Rahmen ingenieurmässiger Berechnungen wird bei Berücksichtigung der Sprinklerwirkung im Allgemeinen • entweder die Kurve für die „Brandbeherrschung“ bzw. eine konstant bleibende Brandleistung ab Auslösezeit des Sprinklers empfohlen oder • aber eine Brandleistung mit einem zeitlichen Verlauf, der den in Tabelle 10 beschriebenen Algorithmen folgt.

Anwendung der Feldmodelle		
Thematik	**Modellierungsansatz, Modellierungsproblem**	**Effekte, K**
Wandmodelle	Um Rechenzeit zu sparen, existieren zur Erfassung der aero- und thermodynamischen Zustände im Bereich von Wänden universelle Wandgesetze.	Die in den univers detaillierte Auflös und Temperatur Situationen gülti und Knoten in W Zur Modellierung gesetzen grunds • Annahme von findet; [3)] • Annahme eine gung bewirkt.
Rand- und Anfangsbedingungen	Nicht oder ungenau definierte Rand- und/oder Anfangsbedingungen. Beispiele: • Zustand des Strömungsfeldes an gegen die Umgebung bzw. den freien Raum grenzenden Öffnungen (Turbulenzparameter, Strömungsgeschwindigkeit, Strömungsrichtung), • Wärmeübergangskoeffizienten von Wänden, • Druckverteilungen im Raum, die durch natürliche oder mechanische Ventilationen erzeugt werden.	Werden Rand- u so besteht keine

Tab. 24: Anwendung der Feldmodelle

6 Personensicherheitsberechnungen

6.1 Wirkung des Brandrauches auf Personen

Bei einem Brandereignis werden die Orientierungs- und Handlungsfähigkeit sowie die Gesundheit von Personen folgendermassen beeinflusst:

- Einschränkung der Erkennungsweite in der rauchbelasteten Zone in Abhängigkeit von:
  - den optischen Eigenschaften des Brandrauches (Trübung, Streuung, Partikeldichte, Partikelgrösse, Partikelfarbe),
  - der Konzentration der die Sinnesorgane, insbesondere die Augen reizenden Rauchgasanteile (Verringerung der Sehschärfe),
  - den optischen Eigenschaften der Rettungszeichen und
  - der Beleuchtungssituation im Umfeld der Personen;
- Inhalation toxischer, d.h. narkotisierend und erstickend wirkender Rauchgase;
- Einwirkung der Wärme durch Strahlung und Konvektion, welche die Haut und den Atmungsapparat schädigt. *[126]*

Expositionsdauer bis zum Eintreten von Handlungsunfähigkeit

Zur Bestimmung der Expositionsdauer bis zum Eintreten einer Handlungsunfähigkeit existieren die folgenden Rechenmodelle:

- Modell der fraktionellen effektiven Expositions-Konzentration (irritant-gas model) bzw. FEC-Modell zur Bewertung der reizenden Rauchgaskomponenten,
- Modell der fraktionellen effektiven Expositions-Dosis (asphyxiant-gas model) bzw. FED-Modell zur Bewertung der erstickenden (toxischen) Rauchgaskomponenten und der Belastung durch Wärmestrahlung und -konvektion,
- das Massenverlust-Modell (mass-loss model) zur Quantifizierung der toxischen Rauchgaskomponenten,
- das Rauchverdunkelungs-Modell (smoke-obscuration model) zur Bewertung des Helligkeitsunterschiedes zwischen einem Objekt und dem Hintergrund. *[127]*

Sowohl das FEC- als auch FED-Modell eignet sich für Forschungsvorhaben oder forensische Untersuchungen. Diese Modelle besitzen derzeit jedoch aus den folgenden Gründen keine allgemeinpraktische Bedeutung:

- Die von den Brandlasten und Verbrennungsbedingungen abhängenden Quellterme für die reizenden und erstickenden (toxischen) Rauchgaskomponenten sind in wesentlichen Teilen nicht verfügbar, womit die Schadstoffpartikel-Entstehungsanteile nicht zuverlässig genug bestimmbar sind.

Konsequenzen	Massnahmen
niversellen Wandgesetzen enthaltenen Funktionen erlauben keine uflösung der in Wandnähe auftretenden grossen Geschwindigkeits- aturgradienten. Ausserdem sind solche Gesetze nur für idealisierte gültig. Dafür lässt sich mit Wandgesetzen die Anzahl Netzelemente in Wandnähe klein halten. erung der Wärmeübertragung gibt es bei der Anwendung von Wand- undsätzlich die folgenden Möglichkeiten: von adiabaten Wänden, bei denen keine Wärmeübertragung statt- einer konstanten Wandtemperatur, die eine maximale Wärmeübertra- wirkt. [125], S. 34	Es wird eine adäquate Modellierung der Wärmeübertragung zwischen dem Fluid und der Wand angestrebt. Dabei setzt sich die Wärmeübertragung aus dem konvektiven Wärmeübergang vom Fluid auf die Wand und aus der Wärmeleitung in der Wand zusammen. Hierzu müssen in Wandnähe ein feines Netz erzeugt und die physikalischen Eigenschaften – wie z.B die Oberflächen-rauhigkeit und die thermischen Kenngrössen der Baustoffe – der Wand erfasst werden. [64], S. 37-38 Betreffend Wärmeübertragung durch Strahlung sei auf die Strahlungsmodelle verwiesen.
d- und/oder Anfangsbedingungen nicht oder nur ungenau definiert, eine Gewährleistung für physikalisch sinnvolle Ergebnisse.	Bei freien Öffnungen lassen sich Randbedingungen dadurch festlegen, indem ein Umgebungsraum definiert wird, mit dem die Innenräume über alle Öffnungen verbunden sind. Die Wärmeübertragung an die Wände sollte modelliert werden, was jedoch eine grosse Zahl an Netzelementen und Knoten erfordert (s.o.). In zweifelhaften Fällen sollten unbekannten oder nicht exakt definierten Rand- und/oder Anfangsbedingungen plausible Wertebereiche zugeordnet und mit diesen Sensitivitätsanalysen durchgeführt werden, um den Einfluss auf die Simulationsergebnisse zu ermitteln.

- Der Verbrennungsprozess ist in seiner Vollständigkeit numerisch nicht erfassbar.
- Weder die genaue stoffliche Zusammensetzung der Brandlast noch die zutreffenden Verbrennungsbedingungen sind bekannt.
- Die meisten Brandsimulationsmodelle können die Konzentrationsausbreitung von reizenden und erstickenden (toxischen) Gasen nicht berechnen.
- Die Dosis- und Konzentrationsmodelle wurden nicht an menschlichen Körpern entwickelt, sodass diese mit entsprechenden Unsicherheiten behaftet sind. Zudem ist die Sensitivität der Individuen statistisch verteilt.

Deshalb werden im Rahmen der leistungsorientierten Brandschutzplanung die eine sichere Selbstrettung gewährleistenden atmosphärischen und thermischen Bedingungen in der Atemzone der Gebäudenutzer bzw. in der raucharmen Schicht in der Regel nicht anhand der vorgenannten Rechenmodelle festgelegt, sondern mithilfe der in Kapitel 6.2, Tabelle 26 aufgeführten empirisch begründbaren Leistungskriterien.

Modelle zur Quantifizierung der Wirkung des Brandrauches auf Personen

Die Modelle nach Tabelle 25 ermöglichen – nebst den Leistungskriterien von Kapitel 6.2, Tabelle 26 – die Bewertung der Folgen eines Brandereignisses hinsichtlich des Schutzzieles betreffend Personensicherheit. Zusammen mit geeigneten Brand- und Evakuierungsmodellen angewendet, erlauben sie es, das für die Bewertung eines Brandschutzkonzeptes wichtige Verhältnis aus erforderlicher und verfügbarer Evakuierungsdauer zu bestimmen.

Die in Tabelle 25 aufgeführten, die Sicherheit und Gesundheit von Menschen beeinflussenden Grössen, nämlich

- die Erkennungsweite im Brandrauch,
- die Reizwirkung und Toxizität des Brandrauches sowie
- die thermische Wirkung der Rauchgase

entwickeln sich im Verlaufe eines Brandgeschehens synchron. Bei deren Bewertung müssen diese daher stets im Zusammenhang betrachtet werden. [128], S. 168

Bei einem Brandereignis in nicht industriellen Gebäuden verlieren Personen ihre Handlungsfähigkeit in der Selbstrettungsphase nicht aufgrund der Toxizität der Rauchgase, sondern wegen der verminderten Erkennungsweite infolge des Einwirkens reizender Stoffe. Die Toxizität von Rauchgasen sollte erst bei der Existenz besonders giftiger Brandlasten untersucht werden. [82], S. 16

Eine ausreichende Erkennungsweite in rauchbelasteten Aufenthaltsbereichen bedingen adäquate Beleuchtungsbedingungen. Deshalb sollten bei der Ergebnisdarstellung von Personensicherheitsberechnungen diejenigen Bedingungen festgehalten werden, unter denen sich die errechnete Erkennungsweite einstellt.

Die diese Effekte beschreibenden qualitativen und empirischen Einflussfaktoren mit ihren Symbolen, Masseinheiten, Modellen und Gleichungen werden in Tabelle 25 dargestellt und erläutert.

Modelle zur Quantifizierung der Wirkung des Brandrauches auf Personen

Einfluss-grösse	Einflussfaktoren			
	Qualitativ	**Empirisch**	**Zeichen**	**Einheit**
Erkennungs-weite (S)	Optische Eigenschaften des Brandrauches • Absorptionseigenschaften • Streueigenschaften [1)]	Optische Rauchdichte pro Weglängeneinheit	D_L	m^{-1}
		Massenspezifische Schadstoffausbeute	Y_i	g/g
		Schadstoffmassenkonzentration	c_i	g/m^3
		Massenspezifischer Extinktionskoeffizient	K_m	m^2/g
		Massenspezifische optische Rauchdichte	D_m	m^2/g
		Extinktionskoeffizient	K	m^{-1}
	Optische Eigenschaften der Rettungszeichen und des Umfeldes • Leuchtdichte hinterleuchteter Rettungszeichen [2)] • Emissionsvermögen reflektierender Rettungszeichen [3)] • Umgebungshelligkeit [4)] • Kontrastverhältnis Rettungszeichen/Umfeld [5)] • Reflexionseigenschaften der Sicherheits- und Kontrastfarbe • Grösse der Rettungszeichen • Lage der Rettungszeichen	Parameter für Erkennungsweite	C	
		Leuchtdichtekontrast	c_v	
		Leuchtdichteverhältnis	L_o/L_S	
	Blickwinkel	Blickwinkel zwischen Beobachter und Rettungszeichen Φ ist der horizontale Beobachtungswinkel (= Winkel zwischen der Linie Beobachter/Rettungszeichen und der Senkrechten auf die Oberfläche des Rettungszeichens). Für den vertikalen Beobachtungswinkel α wird angenommen, dass sich der Beobachter in der Annäherung an das Rettungszeichen befindet, womit $\cos(\alpha) \approx 1$ wird. Nähert man sich dem Rettungszeichen seitlich mit einem Winkel von mehr als etwa 80°, so ist dieses nicht mehr erkennbar ($S(\Phi) = 0$). [133], S. 196-197; *[134]*	Φ	Grad [°]

Tab. 25: Modelle zur Quantifizierung der Wirkung des Brandrauches auf Personen

t	**Modelle** (Autoren), **Gleichungen**	**Erläuterungen**
	Diverse Modelle (vgl. Tabelle 36)	
	$D_L = K / \ln(10) = (D_m / Y_i) \cdot c_i$ $D_m = (D_L \cdot Y_i) / c_i = (K_m \cdot Y_i) / \ln(10)$ $K_m = K / c_i$	
	Rasbash [6]	
	$S = 1.5 \cdot D_L^{-0.8} = 1.5 \cdot [K / \ln(10)]^{-0.8} \approx 2.923 \cdot K^{-0.8}$	
	Jin [6] (Nicht reizender Rauch und reizender Rauch mit $K < 0.25$ m^{-1})	
	$S = C / K = C / [\ln(10) \cdot D_L]$	
	Jin [6] (Reizender Rauch mit $K \geq 0.25$ m^{-1})	
	$S = C / K \cdot [0.133 - 1.47 \cdot \log(K)]$	
	ISO 13571 [6]	
	$S = -\ln(c_v) / K = -\ln(c_v) / [\ln(10) \cdot D_L]$	
	Wilk [6] [7]	
	$S = \ln(L_o/L_S) / K = \ln(L_o/L_S) / [\ln(10) \cdot D_L]$	
	$\mathbf{0° \leq \lvert\Phi\rvert \leq 65.7°}$	
	$S(\Phi) = S \cdot [\cos(\Phi)]^{1/2}$	
	$\mathbf{65.7° < \lvert\Phi\rvert \leq 82.8°}$	
	$S(\Phi) = S \cdot \{[\cos(\Phi)]^{1/2} / [0.024 \cdot \Phi - 0.577]\}$	
	$\mathbf{82.8° < \lvert\Phi\rvert \leq 90°}$	
	$S(\Phi) = 0$	

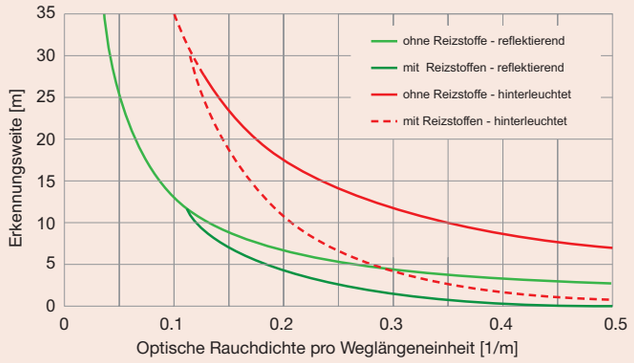


Abb. 107: Erkennungsweite S als Funktion von D_L nach Jin

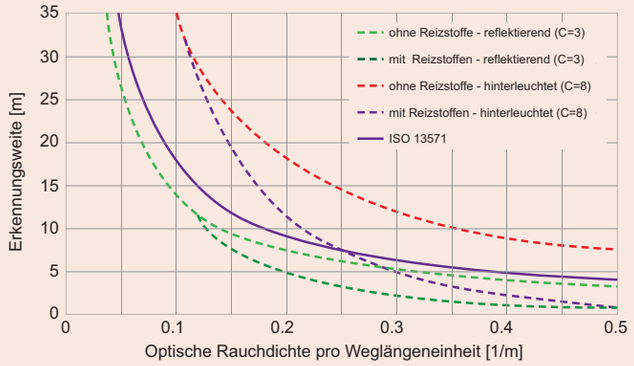


Abb. 108: Erkennungsweite S als Funktion von D_L nach ISO 13571

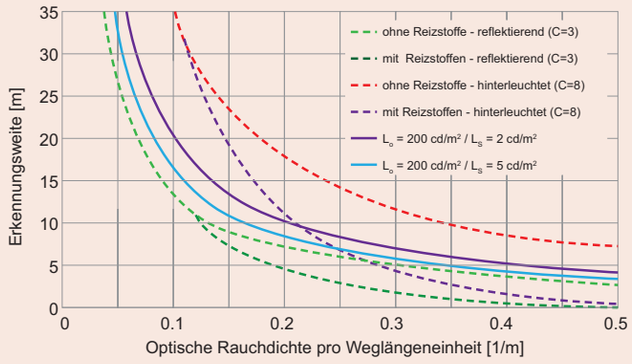


Abb. 109: Erkennungsweite S als Funktion von D_L nach Wilk

Die Abbildungen 107-109 verdeutlichen, dass bei einer optischen Rauchdichte $D_L > 0.1$ m^{-1} die die Augen reizenden Rauchgasbestandteile eine – gegenüber nicht reizendem Rauch – verstärkte Reduktion der Erkennungsweite bewirken.

Modelle zur Quantifizierung der Wirkung des Brandrauches auf Personen

Einfluss-grösse	Einflussfaktoren			
	Qualitativ	**Empirisch**	**Zeichen**	**Einheit**
Reizung	Als Leitsubstanzen für die Reizwirkung von Brandrauch, die das individuelle Seh- und Orientierungsvermögen beeinträchtigt, kommen infrage: • Stickstoffdioxid (NO_2), • Schwefeldioxid (SO_2), • Halogenwasserstoffe (HCl, HBr, HF), • Formaldehyd (HCHO), • Acrolein (CH_2CHO). Die reizenden Rauchgasanteile verstärken den Tränenfluss, was die Sehschärfe deutlich verringert. Besonders stark wirkt sich dieser Umstand bei geringen Kontrasten aus (vgl. Abbildung 110). [131], S. 37, S. 39; zitiert nach [132] [8)]	Optische Rauchdichte pro Weglängeneinheit	D_L	m^{-1}
		Modell der fraktionellen effektiven Expositions-Konzentration (FEC-Modell) Modell zur Abschätzung der Expositionsdauer bis zum Eintreten von Orientierungslosigkeit [9)]	FEC	
Toxizität	Die häufigsten bei Brandopfern festgestellten narkotisierenden und erstickenden (toxischen) Rauchgasanteile, welche die individuelle Handlungsfähigkeit beeinträchtigen und massgeblich die akute Gesamttoxizität bestimmen, sind: • Kohlenmonoxid (CO), • Kohlendioxid (CO_2), • Zyanwasserstoff (HCN).	Optische Rauchdichte pro Weglängeneinheit	D_L	m^{-1}
		Modell der fraktionellen effektiven Expositions-Dosis (FED-Modell) Modell zur Abschätzung der Expositionsdauer bis zum Eintreten von Handlungsunfähigkeit [10)]	FED	

Tab. 25: Modelle zur Quantifizierung der Wirkung des Brandrauches auf Personen

Modelle (Autoren), **Gleichungen**	**Erläuterungen**
$D_L \leq 0.1\ m^{-1}$ für die erfolgreiche Selbstrettung unbedenklich $0.1\ m^{-1} < D_L \leq 0.2\ m^{-1}$ für kurze Wegstrecken zumutbar	Bei Mischbrandlasten kann davon ausgegangen werden, dass die reizenden Rauchgasanteile für eine erfolgreiche Selbstrettung unbedenklich sind, falls $D_L \leq 0.1\ m^{-1}$ wird. Damit wird D_L zum Leitwert für die reizenden Rauchgasanteile (vgl. Tabelle 26).
$FEC = c_{HCL}/F_{HCL} + c_{HBr}/F_{HBr} + c_{HF}/F_{HF} + c_{SO2}/F_{SO2} + c_{NO2}/F_{NO2} + c_{CH2CHO}/F_{CH2CHO} + c_{HCHO}/F_{HCHO} + \Sigma\ c_i/F_i$ FEC = 1.0 Fluchtunfähigkeit durch Reizgaseinfluss	F_i kritischer Referenzwert (Beurteilungskonzentration) für das Reizgas i (i = HCL, HBr, HF, SO_2, NO_2, CH_2CHO, HCHO) nach Tabelle 25.1 c_i effektiver Konzentrationswert des Reizgases i (i = HCL, HBr, HF, SO_2, NO_2, CH_2CHO, HCHO) zu einer bestimmten Zeit in µl/l oder ppm

Bezeichnung	Chem. Formel	F_i [µl/l], [ppm]
Chlorwasserstoff	HCl	1000
Bromwasserstoff	HBr	1000
Fluorwasserstoff	HF	500
Schwefeldioxid	SO_2	150
Stickstoffdioxid	NO_2	250
Acrolein	CH_2CHO	30
Formaldehyd	HCHO	250

Tab. 25.1: Beurteilungskonzentrationen F_i zur Auslösung von Fluchtunfähigkeit verursachenden Reizungen nach ISO 13571

Sehschärfe in Abhängigkeit von Kontrast und Reizzustand der Augen, L_{Umfeld} = 0.85 cd/m²

Untersuchung FH Jena, Polatest E, Sehzeichen: Pfeil

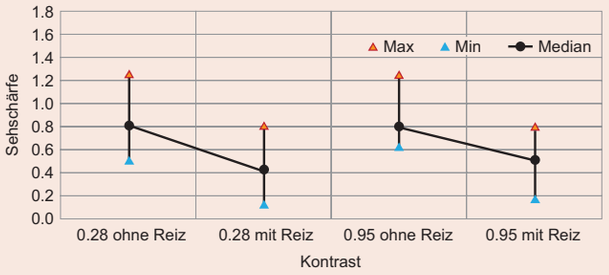


Abb. 110: Einfluss der Reizung des Auges auf die Sehschärfe

$D_L \leq 0.1\ m^{-1}$ für die erfolgreiche Selbstrettung unbedenklich $0.1\ m^{-1} < D_L \leq 0.2\ m^{-1}$ für kurze Wegstrecken zumutbar	Bei Mischbrandlasten kann davon ausgegangen werden, dass die toxischen Rauchgasanteile für eine erfolgreiche Selbstrettung unbedenklich sind, falls $D_L \leq 0.1\ m^{-1}$ wird. Damit wird D_L zum Leitwert für die toxischen Rauchgasanteile (vgl. Tabelle 26).
$FED = MAX\ [(F_{CO} + F_{HCN} + F_{irr}^{LD}) \cdot V_{Hyp} + F_{O2}, F_{CO2}]$, wobei $F_{irr}^{LD} = \Sigma\ F_i^{LD}$ $V_{Hyp} = \exp(0.2 \cdot c_{CO2})$ $F_{CO} = (3.317 \cdot 10^{-5} \cdot RMV \cdot c_{CO}^{1.036} \cdot \Delta t) / D$ $F_{HCN} = \Delta t / \exp(5.3960 - 0.0230 \cdot c_{HCN})$ $F_{CO2} = \Delta t / \exp(6.1623 - 0.5189 \cdot c_{CO2})$ $F_{O2} = \Delta t / \exp[8.13 - 0.54 \cdot (20.9 - c_{O2})]$ FED = 1.0 Handlungsunfähigkeit für 50 % der Population FED = 0.3 Handlungsfähigkeit für ca. 90 % der Population FED = 0.1 Handlungsfähigkeit für ca. 100 % der Population	F_{irr}^{LD} Term zur Berücksichtigung der Schadwirkung aller Reizgase auf die Lungenfunktion F_i^{LD} auf die letale Dosis (LD_{50}-Wert) bezogene Teildosis des Reizgases i (i = HCL, HBr, HF, SO_2, NO_2, HCHO, CH_2CHO) F_j Schadwirkung des toxischen Gases j (j = CO, HCN, CO_2) F_{O2} Sauerstoffmangel (Erhöhung des Stickeffekts) Δt Zeitintervall zur Aufnahme einer Teildosis [min] c_j Konzentration des Gases j (j = CO, HCN, CO_2, O_2), wobei c_{O2}, c_{HCN} in ppm und c_{CO2}, c_{O2} in Vol.-% RMV Atemrate in l/min, wobei RMV = 25-50 l/min für leichte bis schwere Aktivitäten [129], S. 2/116 D kritische Menge Carboxyhämoglobin (COHb) im Blut, wobei D = 20-30 % für schwere bis leichte Aktivitäten [129], S. 2/117 V_{Hyp} Verstärkungsfaktor zur Berücksichtigung des Effektes der Hyperventilation

Modelle zur Quantifizierung der Wirkung des Brandrauches auf Personen

Einfluss-grösse	Einflussfaktoren			
	Qualitativ	**Empirisch**	**Zeichen**	**Einheit**
Wärme	Die folgenden Mechanismen der thermischen Einwirkung führen zur Handlungsunfähigkeit: • Hitzeschock, [11)] • Hautverbrennungen, [12)] • Verbrennungen des Atmungsapparates. [13)]	Zeit τ für das Erreichen von Handlungsunfähigkeit durch konvektiven Wärmeübertrag *[127] [129]*	τ_{conv}	min
		Kritische Bestrahlungsstärke • in Nähe grosser Flammen • unterhalb Heissgasschichten	q	kW/m^2
		Modell der fraktionellen effektiven Expositions-Dosis (FED-Modell) Modell zur Abschätzung der Expositionsdauer bis zum Eintreten von Handlungsunfähigkeit bei kombinierter Wirkung von Wärmestrahlung und Konvektion [14)]	FED_{therm}	

Tab. 25: Modelle zur Quantifizierung der Wirkung des Brandrauches auf Personen

Erläuterungen zu Tabelle 25

[1)] Die absorbierenden und streuenden Eigenschaften der Rauchpartikel – abhängig von der Partikelgrösse, -dichte und -farbe – beeinflussen die Lichtausbreitung im Brandrauch mit den folgenden Effekten:

- Die Lichtabsorption (Transmissionsverluste) verursacht eine Verringerung der Leuchtdichte des Umfeldes bzw. Sehobjektes und wirkt somit massgeblich auf den Adaptionszustand des Auges ein.
- Mit der Lichtstreuung geht eine Kontrastverflachung zwischen Sehobjekt und Umfeld einher, welche die Erkennbarkeit von Objekten reduziert.
- Nicht weisser Brandrauch besitzt eine wellenlängenabhängige Transmission, was zu Farbverschiebungen und somit einer Verminderung der Erkennbarkeit von Objekten führen kann. [131], S. 30, S. 32, S. 36

Heller Brandrauch, vorwiegend bei Schwelbränden feststellbar, beeinflusst das Sehen aufgrund der starken Lichtstreuung stärker als dunkler Rauch, der bei Verbrennungen mit offener Flammenbildung auftritt. [131], S. 28

Ein Mass für die Sichttrübung bzw. Sehverluste ist der Extinktionskoeffizient (Schwächungskoeffizient).

[2)] Hohe Leuchtdichten von hinterleuchteten Rettungszeichen vermindern bei Sichttrübung aufgrund des hohen Streulichteintrages die Erkennungsweite derselben. Für brandgefährdete Bereiche wird eine mittlere Leuchtdichte des Rettungszeichens (ohne Rauch) von 200 cd/m^2 empfohlen. [131], S. 69

[3)] Das Emissionsvermögen reflektierender Rettungszeichen hängt ab von:

- dem Absorptionsvermögen des reflektierenden Materials,
- den spektralen Eigenschaften der anregenden Lichtquelle,
- der Bestrahlungsstärke auf der Materialoberfläche,
- der Anregungsdauer,
- der Umgebungstemperatur (höhere Temperaturen beschleunigen das Abklingen). [131], S. 43, S. 45

[4)] Bei Sichttrübung führt in Flucht- und Rettungswegen eine zunehmende Umgebungshelligkeit zu abnehmenden Erkennungsweiten. [131], S. 65

[5)] Ein zu gleichmässiges Beleuchtungsniveau (Leuchtdichte) von Umfeld und Rettungszeichen sollte vermieden werden. [131], S. 69

[6)] Werden die Werte für die optische Rauchdichte D_L bzw. den Extinktionskoeffizienten K sehr klein ($D_L << 0.1\ m^{-1}$ bzw. $E << 0.2\ m^{-1}$) und somit die Erkennungsweite gross ($S > 35$ m), so werden die Ansätze nach Jin, Rasbash, ISO 13571 und Wilk ungenau. Für den Übergang zum rauchfreien Fall – d.h. D_L und K streben gegen Null – divergieren die genannten Relationen.

t	**Modelle** (Autoren), **Gleichungen**	**Erläuterungen**
	$\tau_{conv} = 5.0 \cdot 10^7 / T^{3.4}$ leicht bekleidete/unbekleidete Personen $\tau_{conv} = 4.1 \cdot 10^8 / T^{3.61}$ vollständig bekleidete Personen T lokale Temperatur [°C]	Mithilfe von Brandopferdaten gefundene empirische Gleichungen, die für eine Luftfeuchtigkeit von weniger als 10 % gelten. Die Ergebnisse sind mit einer Unsicherheit von ± 25 % behaftet. [127], S. 9-10 Bei Anwendung der Gleichungen ist zu prüfen, ob – abhängig von der Expositionsdauer – nicht bereits bei niedrigeren Temperaturen Bedingungen für das Eintreten eines thermischen Schocks vorliegen.
	2.5 kW/m² Kurzzeitwirkung *[129]* 1.7 kW/m² Langzeitwirkung *[130]*	Bei einer spezifischen Wärmestrahlung von 2.5 kW/m² entsteht nach einer Einwirkzeit von 30 s Schmerz. [129], S. 2/142, S. 2/144
	$FED_{therm} = \Sigma (\Delta t/\tau_{conv} + \Delta t/\tau_{rad}) \leq 1$, wobei $\tau_{conv} = 5.0 \cdot 10^7 / T^{3.4}$ $\tau_{rad} = 6.9 / q^{1.56}$ für $q > 2.5$ kW/m² $1/\tau_{rad} = 0$ für $q \leq 2.5$ kW/m² $FED_{therm} = 1$ Grenze der Handlungsfähigkeit	Die Ergebnisse sind mit einer Unsicherheit von mindestens ± 25 % behaftet. [127], S. 9-10 τ_{conv} Zeit für das Erreichen von Handlungsunfähigkeit durch konvektiven Wärmeübertrag für leicht bekleidete Personen [min] τ_{rad} Zeit für das Erreichen von Verbrennungen 2. Grades durch Strahlungswärme [min] T lokale Temperatur [°C] q spezifische Strahlungsleistung [kW/m²]

Vielseitiger einsetzbar ist das im Forschungsbericht [131] beschriebene Schwellenkontrast-Modell von Kokoschka. Bei diesem Modell werden Methoden zur Erkennungsweiten-Berechnung aus der Lichttechnik auf den Fall einer durch Rauch belasteten Umgebung übertragen und erweitert. Während die einfacher zu handhabenden Ansätze nach Jin, Rasbash, ISO 13571 und Wilk für vergleichende Betrachtungen gut geeignet sind, kommt für die Beurteilung der Wirkungsweise von Rettungszeichen, hinsichtlich ihrer relevanten Designparameter und die Berücksichtigung derselben in Evakuierungsmodellen, das Schwellenkontrast-Modell von Kokoschka infrage. [131], S. 13-17; [133]

[7] Werden Streueffekte vernachlässigt, so lässt sich die abgeschwächte Leuchtdichte in Rauch aus der folgenden empirischen Relation ermitteln: $L_S = L_O \cdot e^{-K \cdot S}$, wobei L_S die im Brandrauch „gesehene" Leuchtdichte, bezogen auf den Abstand S zwischen Rettungszeichen und Beobachter (Erkennungsweite), L_O die (mittlere) Leuchtdichte des Rettungszeichens ohne Rauch in Candela/m² bedeuten. Der empirisch gewonnene Parameter für Erkennungsweite C wird demnach durch das variable Leuchtdichteverhältnis $\ln(L_o/L_S)$ ersetzt, sodass – im Gegensatz zu den Formeln von Jin – die Leuchtdichte der objektspezifischen Sicherheitsbeleuchtung berücksichtigt werden kann. [12], S. 78; *[131]*

[8] Ergänzende Bemerkungen zu den Leitsubstanzen für reizende Rauchgasanteile:

- Stickstoffmonoxid NO ist deutlich weniger gefährlich als NO_2 und tritt hauptsächlich in direkter Flammennähe auf. Mit grösser werdender Entfernung vom Brandherd oxidiert NO innert Minuten zu NO_2. Deshalb ist der Einfluss von NO vernachlässigbar. [43], S. 322
- Der Schwefelgehalt von typischen Brandlasten ist in der Regel sehr gering, sodass die Wirkung von SO_2 üblicherweise vernachlässigt werden kann. Ebenso muss die Entstehung von Stickstofftrioxid SO_3 im Allgemeinen nicht berücksichtigt werden. [43], S. 322-324
- Von den drei Halogenen Chlor, Brom und Fluor besitzt Chlor durch die Verwendung von PVC die weitaus grösste Bedeutung. Bei PVC findet die Abspaltung von HCL im Temperaturbereich von 200-300 °C statt. [43], S. 324
- Die organischen Reizgase Formaldehyd und Acrolein entstehen vermehrt in der Schwelbrandphase. [43], S. 325

Reizgase wirken erst bei sehr hohen Konzentrationen toxisch, die bei Einhaltung der Leistungskriterien für die optische Rauchdichte und den Extinktionskoeffizienten in keinem Fall erreicht werden (vgl. Tabelle 26).

[9] Das „Fractional Effective Concentration" (FEC)-Modell geht davon aus, dass sich die Kombinationswirkung aus der Summe der Reizwirkungen der einzelnen Reizgase ergibt. Die Summanden bestehen aus Quotienten, die für jede Reizgaskomponente aus der vorhandenen Gaskonzentration und der die Fluchtunfähigkeit erzeugenden Gaskonzentration gebildet werden. Der FEC-Wert ist eine Grösse, mit der die Reizgaswirkung, bezogen auf einen festzulegenden Grenzwert – ähnlich des FED-Wertes (siehe unten) –, berechnet werden kann.

Dabei ist das Folgende zu beachten:

- Das FEC-Modell basiert auf einem konzentrationsabhängigen Ansatz, weil die Wirkung eines Reizgases auf die Sinnesorgane (Augen) weniger von der Dosis als vielmehr von der Konzentration abhängt. Deshalb spielt beim FEC-Konzept, im Unterschied zum FED-Modell, die Expositionsdauer keine Rolle (Dosis = Expositionsdauer × Konzentration).
- Das Schädigungspotenzial für die Lungen, das zeitverzögert z.B. zu Lungenödem führen kann, wird nicht berücksichtigt, weil sich hierfür ein dosisabhängiger Zusammenhang verantwortlich zeigt.
- Für die Bestimmung der FEC wird eine Unsicherheit von ± 50 % angenommen, weil in Bezug auf die Auswirkungen von Reizgasen auf den menschlichen Körper sehr wenige Daten existieren. [127], S. 7
- Die Quotienten aus den aktuellen Konzentrationen und den kritischen Referenzwerten für die betreffenden Reizgase werden in der Weise normiert, dass der Gesamtwert FEC = 1 einer Rauchumgebung entspricht, die eine Fluchtunfähigkeit durch Reizgaseinfluss bewirkt. *[127] [129]*

[10] Das „Fractional Effective Doses“ (FED)-Modell geht davon aus, dass sich die narkotisierenden bzw. erstickenden Wirkungen aus der Inhalation von CO, CO_2 und HCN (F_{CO}, F_{CO2}, F_{HCN}) additiv ergänzen und durch Hyperventilation (V_{Hyp}) verstärkt werden. Im Einzelnen hängt die „Fractional Effective Dose“ ab von:

- den Quotienten F_i der toxischen Reizgaskomponenten CO, CO_2 und HCN (F_{CO}, F_{CO2}, F_{HCN});
- dem Sauerstoffmangel (F_{O2});
- der Behinderung der Sauerstoffaufnahme durch die schädigende Wirkung der relevanten Reizgas-Leitkomponenten, wie
  - Halogenwasserstoffe HCL, HBr und HF,
  - anorganische Dioxide SO_2 und NO_2,
  - organische Gase HCHO und CH_2CHO,

  auf die Lungenfunktion (F_{irr}^{LD});
- dem Effekt der Hyperventilation, wodurch die Aufnahme der toxisch wirksamen Gase gesteigert wird (V_{Hyp});
- dem Umstand, dass bei relativ hohen CO_2-Konzentrationen die gesamte Schadwirkung aus der CO_2-Inhalation resultiert (F_{CO2}).

Es ist das Folgende zu beachten:

- Das FED-Modell basiert auf einem dosisabhängigen Ansatz.
- Eine erhöhte Atmungsrate (Hyperventilation) ist ab einer CO_2-Konzentration (c_{CO2}) von 2 Vol.-% in die Berechnung mit einzubeziehen. [127], S. 6
- Sauerstoffmangel ist ab einer O_2-Konzentration unterhalb 13 % zu berücksichtigen. [127], S. 6
- Toxische Auswirkungen, insbesondere die des O_2-Mangels und des CO_2, sind oft nicht nur dosis-, sondern auch konzentrationsabhängig.
- Die Schadwirkung durch Reizgase bleibt häufig unberücksichtigt, weil die Abschätzung mit hohen Unsicherheiten verbunden ist und der Beitrag von F_{irr}^{LD} oft vernachlässigt werden kann. [43], S. 327
- Aufgrund der statistisch verteilten Sensitivität der Menschen und der im FED-Modell nicht berücksichtigten möglichen Langzeitwirkungen der toxischen Rauchgaskomponenten kann keine Rauchgasexposition definiert werden, für die jeglicher Personenschaden auszuschliessen wäre.
- Für die Bestimmung der FED wird eine Unsicherheit von ± 35 % angenommen. [127], S. 6
- Für die Bestimmung der verfügbaren Räumungszeit sollte ein maximaler FED-Wert von 0.1-0.3 zugrunde gelegt werden, wobei der untere Wert für besonders sensible Personengruppen gilt. *[127] [129]*

[11] Ursache für den Hitzeschock ist ein Anstieg der Körpertemperatur, wobei Temperaturwerte über 40 °C zu Bewusstseinsbeeinträchtigung und körperlichen Schäden, Werte über 42.5 °C, unbehandelt, bereits innerhalb weniger Minuten zum Tode führen können. Hitzeschock kann entstehen, wenn Personen längere Zeit einer erhöhten Umgebungstemperatur ausgesetzt sind. [135], S. 98

[12] Hautverbrennungen hängen ab von

- dem die Hautoberfläche erreichenden Wärmestrom,
- der Art der Bekleidung,
- der Lufttemperatur,
- der Luftfeuchtigkeit,
- der Expositionsdauer,
- der Luftströmung,

werden aber kaum beeinflusst vom Mechanismus der Wärmeübertragung. [135], S. 98

[13] Bei den Verbrennungen des Atemtraktes spielt die Luftfeuchtigkeit eine noch grössere Rolle als bei den anderen Einwirkungsarten. Werden die Erträglichkeitsgrenzen für Hautverbrennungen – ausgedrückt in einer kritischen Lufttemperatur bzw. einem kritischen Wärmestrom – eingehalten, so bleibt grundsätzlich auch der Atemtrakt vor Verbrennungen geschützt. [135], S. 98-99

[14] Das FED-Modell geht davon aus, dass sich die schädigenden Wirkungen aus der konvektiven Wärmeübertragung und der Wärmestrahlung additiv ergänzen, da Konvektion und Strahlung die für den Fall der Selbstrettung besonders wichtigen Wärmeübertragungsformen sind.

Zur Feststellung der Handlungsunfähigkeit wird die folgende Definition benutzt:

- Zeitpunkt, in dem schmerzhafte Hautreizungen eintreten, unmittelbar vor der Schwelle zur Verbrennung oder
- Zeitpunkt, in dem ein Hitzeschock zur Bewusstseinstrübung führt. *[127] [129]*

6.2 Planungsziele und Leistungskriterien zur Beurteilung der Personensicherheit

Vorbehalte

Die in Tabelle 26 aufgeführten Leistungskriterien zur Beurteilung der Personensicherheit können in den folgenden Fällen andere Werte annehmen:

- Die Brandrauchzusammensetzung weicht deutlich von derjenigen einer typischen Mischbrandlast, wie sie bei Wohn- und Bürobauten oder bei Verkaufsgeschäften anzutreffen ist, ab;
- es werden andere toxische Verbrennungsprodukte als CO, CO_2 und HCN in einer für die Personensicherheit relevanten Menge freigesetzt;
- die Konzentrationsverläufe der toxischen Verbrennungsprodukte unterliegen starken zeitlichen Schwankungen;
- die Expositionszeit ist deutlich länger als eine halbe Stunde, wie z.B. bei auf Fremdrettung angewiesenen Personengruppen;
- es sind besonders sensible Personengruppen betroffen, wie z.B. sehr junge, hoch betagte oder kranke Menschen.

In solchen, auf der unsicheren Seite liegenden Fällen sind detaillierte Analysen erforderlich. [20], S. 252-253

Berechnung der raucharmen Schicht

Die optische Rauchdichte, der Extinktionskoeffizient und die CO_2-Konzentration dienen als Leitgrössen für die Berechnung der raucharmen Schicht.

Bei einer optischen Rauchdichte pro Weglänge $D_L \leq 0.09\ m^{-1}$, einem Extinktionskoeffizienten $K \leq 0.2\ m^{-1}$ und einer CO_2-Konzentration $c_{CO2} \leq 0.3$ Vol.-% kann im Rahmen einer ingenieurmässigen Betrachtung in der Regel davon ausgegangen werden, dass gleichzeitig die in den Rauchgasen enthaltenen Mengen an reizenden und toxischen Verbrennungsprodukten sowie die Rauchgastemperatur unbedenklich sind.

Numerische Bewertung der Rauchgase

Im Allgemeinen entzieht sich die numerische Bewertung der reizenden und toxischen Rauchgase (z.B. HCN) einer gewissenhaften ingenieurtechnischen Betrachtung, weil

- präzise Eingabedaten hinsichtlich der Vollständigkeit des Verbrennungsprozesses und der stofflichen Zusammensetzung der Brandlast in den allermeisten Fällen fehlen,
- von solchen Rauchgasanteilen noch keine zum Allgemeingut gehörenden Quellterme zur Verfügung stehen (z.B. Y_{HCN}) und
- die meisten Brandsimulationsmodelle sowohl die Entstehung als auch die Ausbreitung von reizenden und toxischen Gaskonzentrationen nicht berechnen können.

Folglich besitzen das FEC- und das FED-Modell nach ISO 13571 keine allgemeinpraktische Bedeutung. Vorderhand bleiben solche Verfahren Forschungsvorhaben oder der forensischen Praxis vorbehalten, wo genaue Kenntnisse über die Brandstoffzusammensetzung im konkret zu untersuchenden Brandfall vorliegen und somit die Schadstoffpartikel-Entstehungsanteile bestimmbar sind. *[12] [20] [128]*

Sauerstoffkonzentration

Die Sauerstoffkonzentration wird aus dem folgenden Grund nicht explizit als Beurteilungsgrösse eingeführt: Sind die Leistungskriterien für die reizenden und toxischen Begleitgase in der raucharmen Schicht eingehalten, so liegt die Sauerstoffkonzentration deutlich über 15 Vol.-%. Mit dieser Konzentration sind bei den angegebenen Expositionszeiten keine Personenschäden zu erwarten.

Hingegen lässt sich mit der Auswertung der Sauerstoffkonzentration in der Kalt- und Heissgasschicht der Übergang vom brandlast- zum ventilationsgesteuerten Brand feststellen: Sinkt der Sauerstoffgehalt der Rauchgase gegen 0 Vol.-% ab, so liegt ein ventilationsgesteuerter Brand vor.

Ausserdem lässt sich das Potenzial für einen brandlast- oder ventilationsgesteuerten Brand wie folgt ermitteln: Da bei brennbaren Stoffen das Verhältnis von Heizwert bzw. Energiefreisetzung und theoretisch benötigter Luft- bzw. Sauerstoffmenge ungefähr konstant ist, lässt sich bei bekannten Strömungsverhältnissen abschätzen, ob eine stöchiometrische Verbrennung möglich ist. Im Rahmen rechnerischer Untersuchungen ist hierzu die zugeführte Frischluftmenge mit der abgeführten Rauchgasmenge zu vergleichen.

Tabelle 27 stellt für verschiedene Stoffarten die Heizwert-Luft- bzw. Heizwert-Sauerstoff-Quotienten zusammen.

Beziehung zwischen den Planungszielen

Die brandtechnologische Grössen darstellenden Planungsziele von Tabelle 26 sind durch empirische oder algebraische Korrelationen miteinander verknüpft (vgl. Tabelle 36). Damit lassen sich Rechenergebnisse auf ihre Plausibilität überprüfen.

Planungsziele und Leistungskriterien zur Beurteilung der Personensicherheit

Planungsziel		Symbol	Typische Einheit	Leistungskriterien (Akzeptanzkriterien)		Quellen, Korrelationen
				Mittlere bis längere Aufenthaltsdauer > 5-30 Minuten	**Kurze Aufenthaltsdauer** ≤ 5 Minuten	
Raucharme Schicht	**Höhe der raucharmen Schicht** [1]	d	m	≥ 2.5	≥ 2.5	[24], S. 4-5; [26], S. 7; [27], S. 7; [126], S. 15; [129], S. 2/180; [136], S. 13
	Gastemperatur [2]	T_g	°C	≤ 50	≤ 60	[20], S. 253 (45/50 °C) [128], S. 171 (55-60 °C)
	Optische Rauchdichte [3]	D_L	m^{-1}	≤ 0.09	≤ 0.20	[12], S. 76-77 (0.10/0.17 m^{-1}) [128], S. 174 (0.11/0.21 m^{-1}) [129], S. 2/133 [126], S. 16 [136], S. 55 (0.08/0.20 m^{-1})
	Extinktionskoeffizient [4]	K	m^{-1}	≤ 0.20	≤ 0.45	$K \approx 2.3 \cdot D_L$ (vgl. Tabelle 36)
	Erkennungsweite [5]	S	m	≥ 25	≥ 10	$S = C / K$ mit $C = 5$ (vgl. Tabelle 36)
	Russkonzentration [6]	c_{Russ}	g/m^3	≤ 0.025	≤ 0.05	$c_{Russ} = K / K_m$ (vgl. Tabelle 36)
	CO_2-Konzentration [7]	c_{CO2}	Vol.-%	≤ 0.3	≤ 1.0	[128], S. 173 (Tabelle 1)
	CO-Konzentration [8]	c_{CO}	ppm	150	420	AEGL-2-Wert für die Expositionsdauer 30 bzw. 10 Minuten nach [137]
	HCN-Konzentration [9]	c_{HCN}	ppm	10	17	AEGL-2-Wert für die Expositionsdauer 30 bzw. 10 Minuten nach [137]
	Temperaturgradienten-Verlauf [10]	$d\vartheta/dz$		$d\vartheta/dz\|_{z=2.5} = max.$		[64], S. 44
	Spezifische Leistung der Wärmestrahlung [11]	$\dot{q}_{rad}$	kW/m^2	< 2.0	< 2.5	[20], S. 253 (1.7/2.5 kW/m^2) [127], S. 9 [129], S. 2/144 [126], S. 16 (-- /2.5 kW/m^2) [136], S. 13 (2.5/2.5 kW/m^2)
Gastemperatur in der Rauchschicht [11]		T_s	°C	≤ 180	≤ 200	$T_s = [\dot{q}_{rad} / (\varepsilon \cdot \sigma)]^{1/4}$

Tab. 26: Planungsziele und Leistungskriterien zur Beurteilung der Personensicherheit

Luft-/Sauerstoffbedarf in Abhängigkeit des Heizwertes H_u					
Brennbarer Stoff	**H_u/Luft** [kWh/kg]	[MJ/kg]	**H_u/O_2** [kWh/kg]	[MJ/kg]	**Quelle**
Feststoffe	0.90	3.24	3.89	14.00	*[55]*
Kunststoffe [12)]	0.82-0.95	2.95-3.42	3.54-4.11	12.75-14.78	*[55] [141]*
	0.84 ± 5 %	3.03 ± 5 %	3.64 ± 5 %	13.10 ± 5 %	*[142]*
Flüssigkeiten	0.80-0.90	2.88-3.24	3.46-3.89	12.45-14.00	*[55] [141]*
Gase	0.80-1.00	2.88-3.60	3.46-4.32	12.45-15.56	*[55]*

Tab. 27: Luft-/Sauerstoffbedarf in Abhängigkeit des Heizwertes H_u

Erläuterungen zu Tabellen 26 und 27

[1)] Die minimale Höhe der raucharmen Schicht ist ab oberster für den Personenaufenthalt zugänglicher Ebene zu messen.

Bei einem gleichmässig verteilten Durchlässigkeitsgrad von mehr als 50 % ist die Raumbezugshöhe von Räumen mit abgehängten Decken diejenige der darüber liegenden Decke (Rohdecke). Bei kleineren Durchlässigkeitsgraden ist eine objektbezogene Beurteilung – gegebenenfalls mit einer Strömungsberechnung – durchzuführen. Ansonsten ist als Raumbezugshöhe die abgehängte Decke massgebend. [26], S. 6; [27], S. 5; [105], S. 20-21

Weil sich Brandrauch von der Rauchgasschicht in die raucharme Schicht einmischen kann, ist die alleinige Berechnung der Rauchgasschichtuntergrenze in der Regel nicht ausreichend, und es ist zusätzlich die Zulässigkeit der sicherheitsrelevanten Kenngrössen für die raucharme Schicht zu beurteilen. [12], S. 76

[2)] Die erträgliche Gastemperatur hängt von der Luftfeuchtigkeit ab. In Luft mit einem Wasserdampfgehalt von weniger als 10 Vol.-% und steigenden Temperaturen treten zuerst Schmerzen und Verbrennungen an der Aussenhaut und erst danach solche in den Atemwegen auf. Deshalb sollten die Leistungskriterien anhand des Eintretens von Hautschmerzen und -verbrennungen festgelegt werden. [129], S. 2/144

Ist im Fall von gesprinklerten Bränden die Atemluft mit Wasserdampf gesättigt, so können bei Temperaturwerten von mehr als 60 °C und einer Expositionsdauer bis 30 Minuten Verbrennungen der Atemwege auftreten. Für Luft mit einem Wasserdampfgehalt von weniger als 10 Vol.-% und gleicher Expositionsdauer liegt die Grenztemperatur bei 68 °C. [126], S. 17, S. 36; [127], S. 9; [129], S. 2/144

Es wurde beobachtet, dass die Laufbewegung von Personen, selbst in relativ gut transparentem Rauch, bei Temperaturen von mehr als 70 °C erheblich beeinträchtigt wird. Deshalb sollte für kurze Expositionszeiten der Grenzwert 60 °C betragen. [128], S. 171

Die Temperatur in der raucharmen Schicht wird vor allem durch den Eintrag von heissen Rauchgasen erhöht, sodass ein Zusammenhang zur Rauchtrübung bzw. zur optischen Rauchdichte oder zum Extinktionskoeffizienten besteht. Lassen sich demnach akzeptable optische Rauchdichten bzw. hinreichend kleine Extinktionskoeffizienten nachweisen, so sind in der Regel auch die Gastemperaturen in der raucharmen Schicht unbedenklich.

[3)] Zwischen der Rauchtrübung und den toxisch und reizend wirkenden Rauchgasanteilen besteht eine Abhängigkeit.

Bei Mischbrandlasten kann davon ausgegangen werden, dass sowohl die Erkennungsweite als auch die reizend und toxisch wirkenden Rauchgasanteile für eine erfolgreiche Selbstrettung aus grossen Räumen mit längeren Fluchtwegdistanzen unbedenklich sind, falls für die optische Rauchdichte der aus der zitierten Literatur gemittelte Grenzwert von $D_L = 0.09\ m^{-1}$ nicht überschritten wird.

Damit in reizendem Brandrauch für Personen die Flucht aus kleinen Räumen mit kurzen Fluchtwegdistanzen gewährleistet ist, wird für die optische Rauchdichte ein Grenzwert von $D_L = 0.2\ m^{-1}$ empfohlen. Hingegen stellt im Selbstrettungsfall eine mit $D_L = 0.2\ m^{-1}$ verbundene Rauchqualität bereits die obere Grenze für Rauchtrübung und Reizgasanteile dar, einhergehend mit einer starken Reduktion der Gehgeschwindigkeit (25 % des maximalen Wertes bzw. 0.3 m/s statt 1.2 m/s, vgl. Abbildung 113).

Die Bereitschaft fliehender Personen, den Fluchtweg zu betreten oder auf ihm umzukehren, hängt folgendermassen von der optischen Rauchdichte ab:

- $D_L = 0.10\ m^{-1}$: weniger als 10 % der fliehenden Personen wollen umkehren,
- $D_L = 0.25\ m^{-1}$: 10-25 % der fliehenden Personen wollen umkehren,
- $D_L = 0.30\ m^{-1}$: Mittelwert der optischen Rauchdichte, bei der fliehende Personen umkehren wollen. [126], S. 15; [129], S. 2/132; [138]

Reflektierende Rettungszeichen eignen sich nur für „fast rauchfreie“ Situationen, bei denen die optische Rauchdichte $D_L \leq 0.1\ m^{-1}$ beträgt. Ebenso sind die Anforderungen von SN EN 1838 „Angewandte Lichttechnik – Notbeleuchtung“, Ausgabe 1999, zur Kennzeichnung von Flucht- und Rettungswegen, nur für optische Rauchdichten $D_L \leq 0.1\ m^{-1}$ ausgelegt. Zur Sicherung der Orientierung in Flucht- und Rettungswegen bedingen optische Rauchdichten $D_L > 0.1\ m^{-1}$ Leuchten, die in ihrer Grösse und Leuchtdichte über den Vorgaben der SN EN 1838 liegen. Als Kompensationsmassnahmen kommen infrage:

- Erhöhung der Leuchtdichte der Rettungszeichen und der Sicherheitsbeleuchtung,
- Reduzierung der Beobachtungsentfernung,
- Wahl grösserer Leuchtenabmessungen,
- Installation bodennaher Leitmarkierungen,

- Realisierung akustischer Massnahmen.

Es ist zu beachten, dass deckennahe, in der Rauchgasschicht angeordnete Sicherheitsleuchten und Rettungszeichen in ihrer Wirkung stark beeinträchtigt oder gar nutzlos sind. [12], S. 77

[4)] Mit einem Extinktionskoeffizienten $K \leq 0.20\ m^{-1}$ kann im Rahmen von ingenieurmässigen Berechnungen davon ausgegangen werden, dass reizende Rauchgaskomponenten die Erkennungsweite und die Gehgeschwindigkeit nicht beeinflussen und in der raucharmen Schicht keine toxischen Gase in für Menschen gefährlichen Konzentrationen auftreten. Bei Extinktionskoeffizient $K > 0.20\ m^{-1}$ machen sich in der raucharmen Schicht reizende Rauchgaskomponenten bemerkbar. [139], S. 2/56

Es wird davon ausgegangen, dass mit einem Extinktionskoeffizienten $K \leq 0.45\ m^{-1}$ reizende Rauchgaskomponenten vorhanden sind, für Personen die Flucht aus kleinen Räumen mit kurzen Fluchtwegdistanzen jedoch gewährleistet ist. [139], S. 2/59

[5)] Die Korrelation $S = C / K$ gilt für typische Brände und $K < 0.25\ m^{-1}$, wobei zur Ermittlung der Mindesterkennungsweite für den Parameter C der Wert 5 angesetzt werden muss (Mindestwert für hinterleuchtete Rettungszeichen). Höhere Werte für den Parameter C müssen beispielsweise anhand des Forschungsberichtes von Bieske, Gall und Kokoschka [131] nachgewiesen werden. [64], S. 11

Beträgt die Erkennungsweite weniger als 10 m, erhöht sich bei flüchtenden Personen die Umkehrwahrscheinlichkeit, und es besteht die Gefahr, dass Personen die Flucht- und Rettungswege nicht benutzen wollen, wenn die Distanz zum Ausgang mehr als 10 m beträgt. [126], S. 15

[6)] Bei der flammenden Verbrennung von vielen typischen Brandlasten sollte für den massenspezifischen Extinktionskoeffizienten K_m der folgende Mindestwert verwendet werden: $K_{m,min} = 8.7 - 1.1\ m^2/g = 7.6\ m^2/g$. [140], S. 2/297

Beträgt bei einer flammenden Verbrennung von typischen Brandlasten ($K_m = 8.7\ m^2/g$) die Russkonzentration c_{Russ}

- $\leq 0.025\ g/m^3$, so können die reizenden und toxischen (erstickenden) Gasanteile als unkritisch erachtet werden ($K \leq 0.2$);
- $> 0.025\ g/m^3$, so ist in der raucharmen Schicht mit Reizgasanteilen zu rechnen ($K > 0.2$);
- $\leq 0.05\ g/m^3$, so treten toxische (erstickende) Rauchgasanteile lediglich in ungefährlichen Konzentrationen auf ($K \leq 0.45$).

[7)] Kohlendioxid CO_2 ist nicht unter dem Aspekt der Toxizität, sondern als Marker (Indikatorgas) für die reizenden Rauchgasanteile zu verstehen. In der Phase des Entstehungs- und des entwickelten Brandes liegen die Konzentrationen der übrigen (reizenden und toxischen) Rauchgasanteile in den meisten Fällen unter den entsprechenden AEGL-2-Werten, sofern die CO_2-Konzentration kleiner als 0.5 bis maximal 1.0 Vol.-% ausfällt. [12], S. 75; [128], S. 172; *[129]*

[8)] Kohlenmonoxid CO dient als Indikatorgas (Leitwert) für die toxische (erstickende) Wirkung der Rauchgase. [12], S. 75; [127], S. 5-6; *[129]*

[9)] Cyanwasserstoff HCN (Blausäure) dient als Indikatorgas (Leitwert) für die toxische (erstickende) Wirkung der Rauchgase. [12], S. 75; [127], S. 5-6; *[129]*

Cyanwasserstoff HCN (Blausäure) ist etwa 20-mal toxischer als CO. Hingegen wird bei Raumbränden, infolge des relativ niedrigen Temperaturniveaus, die Bildung von HCN-Spuren aus der thermischen NO_x-Entstehung als unbedeutend eingestuft. [43], S. 321; *[143]*

Für Brandlasten mit weniger als 2 % Stickstoffmassenanteil (z.B. Bürobrände mit hohem zellulosischem Brandlastanteil) beträgt das Verhältnis der CO-/HCN-Schadstoffausbeuten $Y_{CO} / Y_{HCN} \geq 52{:}1$. Übersteigt bei Brandlasten der Stickstoffmassenanteil 2 % (z.B. Wohnungsbrände mit hohem textilem Brandlastanteil), so wird $Y_{CO} / Y_{HCN} \approx 13{:}1$. Im letzteren Fall liefert HCN den Hauptbeitrag zur Toxizität. [43], S. 321; [126], S. 36

[10)] Bei CFD-Simulationen lässt sich die Rauchgasschichtgrenze in der Höhe identifizieren, in der die Temperatur die grösste Änderung erfährt, d.h. an dieser Stelle nimmt der Temperaturgradient $d\vartheta/dz$ das absolute Maximum an ($d\vartheta/dz = MAX$). Im Weiteren liesse sich die Lage der Rauchgasschichtgrenze auch mithilfe der Bestimmung eines Höhenprofils der Rauchgaskonzentrationen abschätzen.

[11)] Eine Wärmestrahlung von weniger als $2.5\ kW/m^2$ auf die nackte Haut ist, zumindest für eine Expositionsdauer von einigen Minuten, tolerierbar (kurze Aufenthaltsdauer). Andererseits können sich Menschen mit geeigneter Kleidung nach DIN EN ISO 23251, in Bereichen mit einer spezifischen Wärmestrahlungsleistung von $1.58\ kW/m^2$, beliebig lange aufhalten. (Vergleich: Eine Wärmestrahlung mit der spezifischen Leistung von $1\ kW/m^2$ entspricht der Sonneneinstrahlung an einem Sommertag). [129], S. 2/144; [144]

Die von der raucharmen Schicht emittierte Wärmestrahlung korreliert mit der Temperatur in der Rauchgasschicht gemäss dem Stefan-Boltzmann-Gesetz: $\dot{q}_{rad} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T_s^4$. Dabei bedeuten:

- Emissionskoeffizient ε: $\varepsilon \approx 0.8$ für die strahlende Rauchgasschicht (Russ), [5], S. 150
- Stefan-Boltzmann-Konstante σ: $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8}\ W/(K^4 \cdot m^2)$,
- absolute Temperatur in der Rauchgasschicht T_s: $T_s = 273\ K + t\ (°C)$.

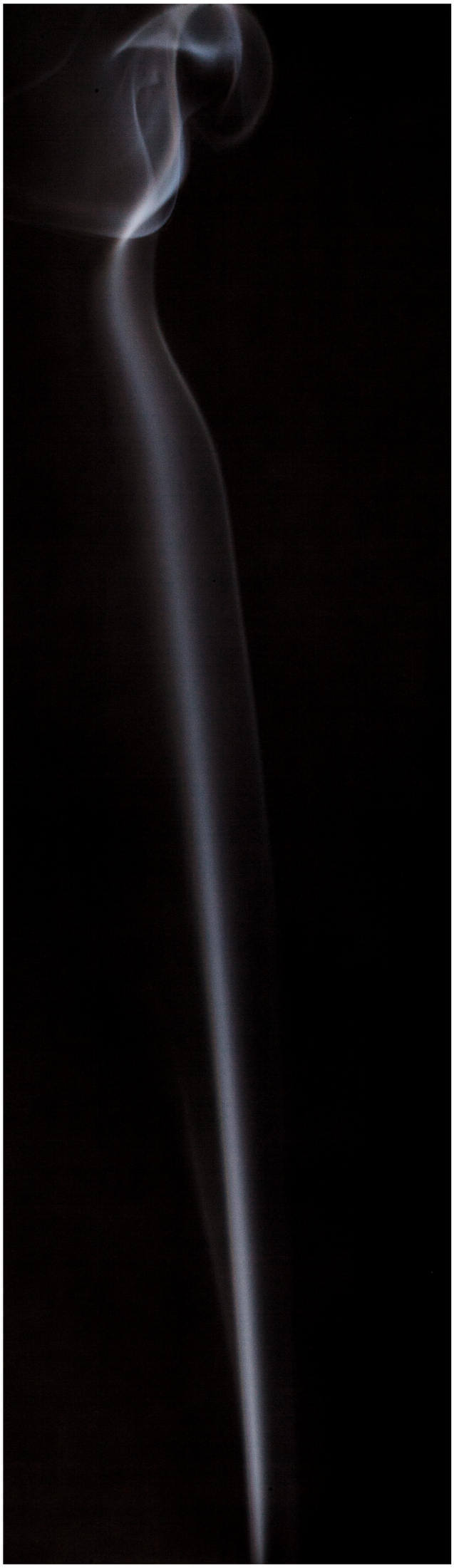
Die entsprechende Grenztemperatur für eine kurze Aufenthaltsdauer (200 °C) ist in der Literatur zu finden. [127], S. 10; [129], S. 2/180; [136], S. 13

Ausgehend von der zuträglichen Wärmestrahlung in der raucharmen Schicht, können für weit über Kopfhöhe liegende Rauchgasschichten unter Umständen höhere Heissgastemperaturen akzeptiert werden.

[12)] In der Kalorimetrie ist für Brände mit organischen Feststoffen (Kunststoffen) der von C. Huggett publizierte H_u/O_2-Mittelwert von 13.10 ± 5 % MJ/kg allgemein akzeptiert. [99], S. 158; [141], S. 3/65; [142]

Hinweis: Die Sauerstoffanteile von trockener Luft unter Normbedingungen (Luftdruck = $101.325\ N/m^2$, Temperatur = 20 °C) betragen:

- Volumenanteil: 20.942 %
- Massenanteil: 23.135 %.



6.3 Extinktionskoeffizient

Die Rauchgasbelastungen auf Personen lassen sich auf die drei folgenden Einflussgrössen reduzieren:

- Reizgase,
- toxische (narkotisierende, erstickende) Rauchgase und
- die Sicht trübende Rauchgasanteile.

Die Belastung durch reizend und toxisch wirkende Rauchgasanteile ist in jedem Fall von der Expositionszeit abhängig.

Tabelle 28 enthält die von verschiedenen Autoren publizierten Ergebnisse aus experimentellen und rechnerischen Untersuchungen, die unter anderem hinsichtlich der Eruierung von die Selbstrettung ermöglichenden Extinktionskoeffizienten durchgeführt wurden. Dabei zeigt sich, dass die Bedingungen für eine sichere Selbstrettung nur im Zusammenwirken

- vom Abstand zwischen Beobachter und Rettungszeichen, bei dem Letzteres gerade noch erkannt werden kann (Erkennungsweite),
- von der Beschaffenheit der Fluchtwegkennzeichnung (reflektierend/hinterleuchtet),
- von der Reizwirkung und Toxizität der Rauchgase

darstellbar sind. [128]

Die Ergebnisse lassen den folgenden Schluss zu: Mit Extinktionskoeffizienten $K \leq 0.20\ m^{-1}$ werden die Erkennungsweite und die Gehgeschwindigkeit durch reizende Rauchgaskomponenten nicht beeinflusst, und in der raucharmen Schicht treten keine toxischen Gase in für Menschen gefährlichen Konzentrationen auf.

Bestimmung des Extinktionskoeffizienten zur Beurteilung der Personensicherheit					
Autoren	**Beurteilungs-kriterium**	**Parameter**			**Extinktionsko-effizient** (K) [m^{-1}]
		Rettungs-zeichen	**Reizwirkung Toxizität**	**Erkennungs-weite** (S) [m]	
G.W. Mulholland (T. Jin) *[140]*	Erkennungsweite	reflektierend		10	0.20
				20	0.15
		hinterleuchtet		10	0.65
				20	0.35
T. Jin *[139]*	Konzentrations-vermögen			13	0.15
				4	0.50
	Erkennungsweite	hinterleuchtet	reizend	10	0.45
				20	0.30
				30	0.20
			nicht reizend	10	0.65
				20	0.30
				30	0.20
	Gehgeschwindigkeit		reizend		0.20
			nicht reizend		0.20
W. Wilk R. Lessig *[128]*	Erkennungsweite	hinterleuchtet	c_{CO2} = 0.6 Vol.-%	15	0.39
			c_{CO2} = 0.3 Vol.-%	> 25	0.25

Tab. 28: Bestimmung des Extinktionskoeffizienten zur Beurteilung der Personensicherheit

Abbildungen, Bemerkungen

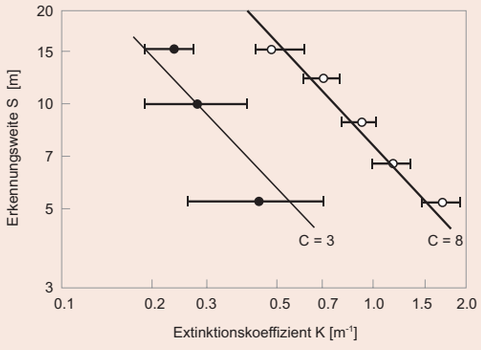


Abbildung 111 zeigt, dass Licht reflektierende Rettungszeichen unter Rauchbelastung als Orientierung in Flucht- und Rettungswegen nicht geeignet sind.

Die Toleranzbalken enthalten unter anderem Werte für die Rauchproduktion von schwelenden und flammenden Bränden. [140], S. 2/297-2/299

Abb. 111: Erkennungsweite als Funktion des Extinktionskoeffizienten für reflektierende (●) und hinterleuchtete (○) Rettungszeichen

Die Experimente zur Überprüfung des Konzentrationsvermögens unter zunehmender Rauchbelastung fanden in einem 20 m^2 grossen, fensterlosen, schwach beleuchteten Raum statt. Es zeigte sich, dass bei den meisten ortsunkundigen Personen eine relevante Konzentrationsabnahme bei einem Extinktionskoeffizienten K = 0.15 m^{-1} einsetzt, währenddessen bei den ortskundigen Personen eine solche erst bei einem Extinktionskoeffizienten K = 0.5 m^{-1} feststellbar ist. [139], S. 2/58-2/61

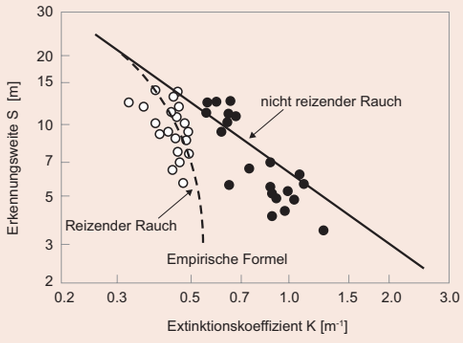


Abb. 112: Erkennungsweite als Funktion des Extinktionskoeffizienten für reizenden und nicht reizenden Rauch

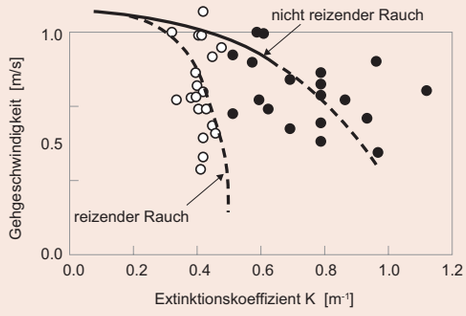


Abb. 113: Gehgeschwindigkeit als Funktion des Extinktionskoeffizienten für reizenden und nicht reizenden Rauch

Mit Extinktionskoeffizienten K > 0.3 m^{-1} nimmt die Erkennungsweite in reizendem Rauch rapide ab.

Mit Extinktionskoeffizienten K > 0.2 m^{-1} nimmt die Gehgeschwindigkeit in reizendem Rauch rapide ab.

Die reizenden Rauchgasanteile (z.B. NO_x, SO_x), organische Säuren und Halogenwasserstoffe (z.B. HCl, HBr, HF) belasten die Augen (Sehvermögen), die oberen Atemwege (Behinderung der Atmung), die inneren Atmungstrakte (mit Spätfolgen, wie Lungenödemen, Bronchitis, Pneumonie) und die Haut. Die toxischen (narkotisierenden, erstickenden) Rauchgasanteile (z.B. CO, CO_2, HCN) stören das Sauerstofftransportpotenzial des Hämoglobins (CO), vermindern den reflektorischen Atemanreiz (CO_2) oder blockieren die Zellatmung (HCN). Die reizenden Rauchgasanteile beeinträchtigen bei Menschen den sensorischen Bereich und erschweren somit die Orientierung, beeinflussen die Handlungsfähigkeit im Allgemeinen, jedoch nicht in direkter Weise, so wie dies die toxischen Rauchgasanteile tun. *[129]*

Die Versuche wurden für Mischbrandlasten im Flammenbrand bei hinreichender Ventilation durchgeführt und zeigen das Folgende:

- Die CO_2-Konzentration c_{CO2} dient als Leitwert für die Reizgasanteile (Indikatorgas).
- Bei Extinktionskoeffizienten K ≥ 0.39 m^{-1} sammeln sich in der raucharmen Schicht reizende Rauchgasanteile an.
- Beträgt die Erkennungsweite mehr als 25 m, so ist in Fluchtwegen von einer ungehinderten Bewegung auszugehen.

In den Versuchen waren die toxischen bzw. erstickenden Belastungen nur so gross, dass sich Personen noch über mehr als 15 Minuten bewegen konnten. [128]

6.4 Verfügbare Evakuierungsdauer (ASET)

Die verfügbare Evakuierungsdauer $t_{verf.\ Evak}$ ist die Zeitdauer zwischen der Entzündung und dem Zeitpunkt, in dem sich die Bedingungen im Gebäude oder in Teilen davon derart verschlechtert haben, dass ein Gebäudenutzer daran gehindert wird, die Flucht anzutreten und somit die Fähigkeit verliert, von selbst an einen sicheren Ort zu gelangen (ASET = **A**vailable **S**afe **E**gress **T**ime). Somit wird die verfügbare Evakuierungsdauer durch die Rauchausbreitung bzw. durch die Kontrolle oder Eindämmung derselben vorgegeben.

Bei mehrstufigen Flucht- und Rettungswegen ist darauf zu achten, dass der lokalen verfügbaren Evakuierungsdauer auch die lokale Rauchbelastung zugrunde gelegt wird.

6.5 Erforderliche Evakuierungsdauer (RSET)

Die für die Evakuierung eines Gebäudes benötigte Zeitdauer $t_{erf.\ Evak}$ – also der Zeitraum, in dem sich die letzte der im Gebäude anwesenden Personen durch Selbstrettung in einen gesicherten Bereich begeben kann – setzt sich aus den folgenden Zeitdauern zusammen (RSET = **R**equired **S**afe **E**gress **T**ime):

- der **Detektionsdauer** t_{Detekt} (= Zeitdauer von der Brandentstehung bis zur Branderkennung),
- der **Alarmierungsdauer** t_{Alarm} (= Zeitdauer von der Branderkennung bis zur Alarmauslösung),
- der **Reaktionsdauer** t_{Reakt}, $t_{Reakt(l)}$ (= Zeitdauer von der Alarmauslösung bis zum Beginn der Fluchtbewegung einer homogenen Personengruppe bzw. einer Einzelperson),
- der **Fluchtdauer** t_{Flucht}, $t_{Flucht(l)}$ (= Zeitdauer vom Beginn der Fluchtbewegung bis zum Erreichen eines sicheren Bereiches, die eine homogene Personengruppe bzw. eine Einzelperson benötigt).

Demnach beträgt bei

- makroskopischen Modellen die erforderliche Evakuierungsdauer für eine homogene Personengruppe:

$$t_{erf.\ Evak} = t_{Detekt} + t_{Alarm} + t_{Reakt} + t_{Flucht}$$

- mikroskopischen Modellen die erforderliche individuelle Evakuierungsdauer einer Einzelperson:

$$t_{erf.\ Evak(l)} = t_{Detekt} + t_{Alarm} + t_{Reakt(l)} + t_{Flucht(l)}$$

- mikroskopischen Modellen die erforderliche Evakuierungsdauer (als Maximum aus den erforderlichen individuellen Evakuierungsdauern):

$$t_{erf.\ Evak} = MAX\ (t_{erf.\ Evak(l)})$$

Die für die Evakuierung benötigte Zeitdauer $t_{erf.\ Evak}$ wird mithilfe von algebraischen oder numerischen Evakuierungsberechnungen ermittelt.

Hinweise zur Festlegung der erforderlichen Evakuierungsdauer

- Die Zeit für Löschversuche wird ausser Acht gelassen, weil davon ausgegangen wird, dass Einzelpersonen in Gebäuden mit grossen Menschenansammlungen sich nicht aktiv an der Brandbekämpfung beteiligen. Selbstverständlich trifft dies nicht für das Sicherheitspersonal zu.
- Die Fluchtdauer setzt sich aus den folgenden drei Hauptkomponenten zusammen:
  - eigentliche Laufzeit,
  - Stauzeiten vor Verengungen,
  - Durchflusszeiten durch Verengungen.
- Die Zeitsumme $t_{Detekt} + t_{Alarm} + t_{Reakt}$ wird als Vorlaufzeit $t_{Vorlauf}$ bezeichnet.
- Verschiedene Untersuchungen zeigen, dass die Reaktionsdauer t_{Reakt} oft den längsten Zeitanteil einnimmt und daher die erforderliche Evakuierungsdauer massgeblich beeinflusst. [126], S. 6; [136], S. 5
- Fehler, die sich aus den Ansätzen zur Festlegung der Vorlaufzeit $t_{Vorlauf}$ ergeben, können weitaus grösser sein als diejenigen der Fluchtdauerberechnung t_{Flucht}. Daraus folgt, dass die Ergebnisse von Evakuierungsmodellen massgeblich an Aussagekraft gewinnen, wenn
  - eine Brandmeldeanlage installiert sowie
  - eine effiziente Alarmorganisation erstellt und praktiziert

  werden.

6.6 Detektionsdauer

Die Detektionsdauer wird beeinflusst durch

- die Lage des Brandherdes im Raum bzw. Gebäude (offen/verdeckt),
- die Intensität und Art des Brandherdes (Glut/Flamme),
- die Anwesenheit von Personen,
- die Existenz und Detektionsart automatischer Meldesysteme (BMA/SPA).

Typische Werte für die Detektionsdauer liegen zwischen 1 und 2 Minuten bei Vorhandensein einer Brandmeldeanlage und zwischen 3 und 10 Minuten bei Existenz einer Sprinkleranlage (vgl. Tabelle 10).

6.7 Alarmierungsdauer

Die Alarmierungsdauer hängt ab von

- der Alarmierungsart
  - automatisch/manuell,
  - intern/extern,
  - still/laut;
- der Anwesenheit von Personen (Anwesenheitsverzögerung);
- der Vornahme von Erkundungen (Erkundungsverzögerung);
- der Alarmorganisation.

Typische Werte für die Alarmierungsdauer liegen zwischen 0 und 8 Minuten. [145], Ziffer 2.4.2

6.8 Reaktionsdauer

Während sich die Detektions- und Alarmierungsdauer relativ einfach durch einen Zeitwert quantifizieren lassen, hängt die Reaktionsdauer von zahlreichen personen- und gebäudespezifischen Einflussgrössen ab. Deshalb

- beansprucht jede Person ihre individuelle Reaktionsdauer;
- müssen für die Berechnung von Evakuierungsdauern in vielen Fällen die Verteilungskurven der Reaktionsdauern von Personengruppen herangezogen werden.

Gebäude- und personenspezifische Einflussfaktoren

Die Reaktionsdauer hängt von den folgenden **gebäudespezifischen Faktoren** ab:

- Wahrnehmbarkeit von Brandprodukten
  - Rauchgase (Geruch),
  - Rauch (Sicht),
  - Strahlung (Wärme);
- Gebäudenutzung
  - Personenzahl,
  - Personenverteilung im Gebäude,
  - Beschäftigungsart der Personen;
- Geometrie der Geschossgrundrisse
  - räumliche Ausdehnung,
  - Komplexität des Layouts (Raumkonfiguration);
- Komplexität der Fluchtwegführung (Evaluierung eines geeigneten Flucht- und Rettungsweges);
- Visualisierung der Flucht- und Rettungswege
  - Fluchtwegpläne,
  - Fluchtwegkennzeichnung;
- Alarmierungssystem (Methode, Qualität);
- Alarmorganisation
  - Sicherheitspersonal,
  - Schulung der Gebäudenutzer.

Zu den **personenspezifischen Faktoren**, welche die Reaktionsdauer beeinflussen, zählen:

- Aufmerksamkeit, Ansprechempfindlichkeit
  - wach/schlafend,
  - sehr jung/erwachsen/betagt,
  - nüchtern/alkoholisiert,
  - gesund/handicapiert;
- Initiative;
- Reaktionsfreudigkeit;
- Gebäudekenntnisse;
- Vertrautheit mit der Alarmorganisation;
- Bewusstseinsbildung
  - Gefahrenbewusstsein,
  - Pflichtbewusstsein (auf Alarmsignale zu reagieren);
- Wahrnehmungs- und Interpretationseffekte (Versuche zeigen, dass lediglich ca. 30-40 % der Personen, die sich innerhalb der Erkennungsfläche eines Rettungszeichens befinden, dieses auch wirklich wahrnehmen. [146]);
- Intuition;
- physische Fähigkeiten (gesundheitliche Verfassung);
- Selbsteinschätzung (Erkennen der eigenen Leistungsfähigkeitsgrenzen);
- Kultur- und Sprachzugehörigkeit;
- konkurrierende Aktivitäten und Interessen
  - laufende Beschäftigung zu Ende führen,
  - Ablenkung durch Blickpunkte (Vorführungen),
  - Anlagen, Maschinen, Prozesse stoppen,
  - Alarmursache und Echtheit erforschen,
  - Wertsachen sichern,
  - Alarmweiterleitung (andere Personen warnen),
  - Angehörige/Bekannte aufsuchen,
  - Feuerbekämpfung.

Mit den genannten Einflussfaktoren lassen sich objektbezogene Verhaltensszenarien bilden.

Verhaltensszenarien nach PD 7974-6 und ISO/TR 16738

In den meisten Fällen lässt sich die Reaktionsdauer hinreichend genau abschätzen, indem mithilfe von Daten- und Videoaufzeichnungen von realen Evakuierungsereignissen und überwachten Evakuationsversuchen

- die Zeitdauer zwischen dem von allen Personen registrierbaren Alarm und dem Fluchtbeginn der ersten paar Gebäudenutzer (= Reaktionsdauer der ersten paar Gebäudenutzer bzw. 1. Perzentilwert P_1)

  und

- die Verteilung/Streuung der Reaktionsdauern der übrigen Gebäudenutzer (= Reaktionsdauer der letzten paar Gebäudenutzer bzw. 99. Perzentilwert P_{99}), repräsentiert durch
  - die Verteilungskurve der individuellen Reaktionsdauern

    oder
  - einen Zeitwert (wie z.B. der Modalwert der Häufigkeitsverteilung der Reaktionsdauern oder die Reaktionsdauer der als letzte zur Flucht ansetzenden Person),

ermittelt werden.

Sobald die ersten paar Gebäudenutzer (P_1) zu fliehen beginnen, steigt die Anzahl der Personen, die sich ebenfalls auf die Flucht begeben, schnell an. Hingegen dauert es länger, bis sich die letzten paar Gebäudenutzer (P_{99}) in Bewegung setzen (vgl. Abbildung 114).

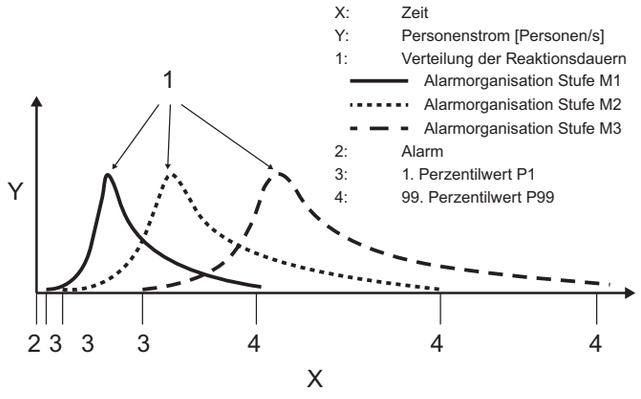


Abb. 114: Verteilung der Reaktionsdauern mit den P_1- und P_{99}-Werten

Sowohl die Qualität der Alarmorganisation (Stufen M1 bis M3) als auch die Art des Alarmsystems und die personenspezifischen Eigenschaften beeinflussen sowohl die Zeit, nach der sich die ersten paar Gebäudenutzer zu bewegen beginnen (P_1), als auch die Streuung der Reaktionsdauern (ausgedrückt in der Bandbreite der Verteilungskurven).

Die Daten aus der Fachliteratur zeigen, dass mit einem guten Alarmierungssystem und einer effizienten Alarmorganisation für die Reaktionsdauer geringe, prognostizierbare Werte resultieren. Umgekehrt sind mit einem schwachen Alarmierungssystem und einer schlechten oder gar fehlenden Alarmorganisation die Reaktionsdauern um ein Vielfaches länger und kaum zuverlässig vorhersagbar. *[126] [136]*

British Standards Institution (BSI) und International Organization for Standardization (ISO) publizierten im Rahmen des Dokumentes PD 7974-6 [126] bzw. des technischen Berichtes ISO/TR 16738 [136] für verschiedene Kategorien von Verhaltensszenarien, die gebildet werden aus

- der Aufmerksamkeit der Gebäudenutzer,
- den Gebäudekenntnissen der Personen,
- der Personendichte,
- der Möglichkeit von konkurrierenden Aktivitäten,
- der Beschaffenheit des Geschossgrundrisses und
- der Gebäudenutzung,
- der Komplexität des Gebäudes,
- der Art des Alarmierungssystems und
- der Güte der Alarmorganisation,

entsprechende Reaktionsdauern. Die Reaktionsdauern lassen sich mithilfe der Tabellen 29-31 aus dem 1. und 99. Perzentilwert ableiten.

Dabei ist zu beachten, dass bei mit verschiedenen Nutzungstypen belegten Gebäuden, wie z.B. bei Bahnhöfen mit integrierten Läden, mehrere Kategorien von Verhaltensszenarien analysiert werden müssen. *[126] [136]*

Erläuterungen zu Tabelle 29

[1)] Zeitdauer zwischen dem von allen Personen registrierbaren Alarm und dem Fluchtbeginn der ersten paar Gebäudenutzer.

[2)] Modalwert der Häufigkeitsverteilung der Reaktionsdauern oder Reaktionsdauer der als letzte zur Flucht ansetzenden Person.

[3)] Die Alarmorganisation der Stufe M1 erfordert in der Regel eine Sprachalarmanlage, wenn die Personen über keine Gebäudekenntnisse verfügen.

[4)] Für die Gebäudekomplexität der Stufe B3 müssen, wegen der aufwendigeren Wegfindung, zu den tabellierten Werten 0.5 Minuten addiert werden.

[5)] Die Alarmorganisation der Stufe M1 erfordert in der Regel eine Sprachalarmanlage.

[6)] Wegen der aufwendigeren Wegfindung müssen zu den tabellierten Werten für die Gebäudekomplexität

- der Stufe B2 0.5 Minuten,
- der Stufe B3 1.0 Minuten

addiert werden.

[7)] Die Alarmorganisationen der Stufen M1 und M2 erfordern in der Regel eine Sprachalarmanlage.

[8)] Bei einer Alarmorganisation der Stufe M3 sind die Reaktionsdauern mit grösseren Unsicherheiten behaftet.

Bemerkung

Die heute zur Verfügung stehenden Daten über das Fluchtverhalten von Personen und über die relevanten Zeitdauern einer Evakuierung sind mangelhaft. Diese Einschränkung ist zu beachten, wenn im Rahmen der Brandschutzplanung in ingenieurmässigen Lösungskonzepten menschliche Verhaltensweisen berücksichtigt werden.

Erläuterungen zu Tabelle 30

[1)] Im Rahmen der VKF-Brandschutzvorschriften drängen sich bei den Verhaltensszenarien-Kategorien C (Wohnhäuser und Beherbergungsbetriebe Typ b, wie z.B. Hotels) und D (Beherbergungsbetriebe Typ a, wie z.B. Krankenhäuser), aufgrund der kleinräumigen Brandabschnittsbildung, im Allgemeinen keine Evakuierungsberechnungen auf.

[2)] Bei Nutzungen mit kleinen Personendichten hängt die Fluchtdauer hauptsächlich von den Fluchtwegdistanzen ab. Bei grösseren Personendichten können sich bei Engpässen Staus bilden, sodass die Fluchtdauer durch die Durchflusskapazitäten bzw. Durchflusszeiten bestimmt wird.

[3)] Innerhalb einer Kategorie von Verhaltensszenarien hängt das Verhalten der Gebäudenutzer von weiteren Einflussgrössen ab, wovon die Gebäudekomplexität, das Alarmierungssystem und die Alarmorganisation die wichtigsten sind (vgl. Tabelle 31).

Reaktionsdauern nach PD 7974-6 (Auszug)					
Verhaltensszenarium				**Reaktionsdauer $t_{Reakt} = t_{Reakt\ P1} + t_{Reakt\ P99}$** [min]	
Kategorie (nach Tabelle 30)	**Alarm-organisation**	**Alarmierungs-system**	**Gebäude-komplexität**	**1. Perzentil** (P_1) $t_{Reakt\ P1}$ [1]	**99. Perzentil** (P_{99}) $t_{Reakt\ P99}$ [2]
A	M1 [3]	A1-A2	B1-B2 [4]	0.5	1.5
	M2	A1-A2	B1-B2 [4]	1.0	3.0
	M3	A1-A3	B1-B2 [4]	> 15 [8]	> 30 [8]
B	M1 [5]	A1-A2	B1 [6]	0.5	2.5
	M2	A1-A2	B1 [6]	1.0	4.0
	M3	A1-A3	B1 [6]	> 15 [8]	> 30 [8]
E	M1 [7]	A1-A2	B3	1.5	4.0
	M2 [7]	A1-A2	B3	2.0	5.0
	M3	A1-A3	B3	> 15 [8]	> 15 [8]

Tab. 29: Reaktionsdauern nach PD 7974-6 (Auszug)

Verhaltensszenarien nach PD 7974-6 zur Festlegung der Reaktionsdauer (Auszug)									
Kategorie [1]	**Aufmerksamkeit**	**Gebäudekenntnisse**	**Personendichte** [2]	**Konkurrierende Aktivitäten**	**Geschossgrundriss**	**Gebäudenutzung**	**Variablen** [3]		
							Gebäudekom-plexität	**Alarmierungs-system**	**Alarmorganisa-tion**
A	wach	ja	niedrig	selten	einfach/komplex	Büro/Gewerbe	B1-B3	A1-A3	M1-M3
B	wach	nein	hoch	möglich	komplex	Shoppingcenter			
	wach	nein	hoch	ja	einfach	Kino/Theater/Stadion			
E	wach	nein	hoch	möglich	komplex	Bahnhof/Flughafen			

Tab. 30: Verhaltensszenarien nach PD 7974-6 zur Festlegung der Reaktionsdauer (Auszug)

Qualifizierung der Gebäudekomplexität, des Alarmierungssystems und der Alarmorganisation nach PD 7974-6

	Stufe			Charakterisierung der Qualitätsstufen
	1	2	3	
Gebäudekomplexität	B1			Eingeschossiges Gebäude mit einfachem, rechteckigem Grundriss mit wenigen Räumen, übersichtlicher Raumaufteilung, kurzen Flucht- und Rettungswegen und direkt ins Freie führenden Ausgängen.
		B2		Mehrgeschossiges Gebäude mit mehreren Räumen pro Geschoss und einfacher Raumaufteilung.
			B3	Komplexes Gebäude mit grossvolumigen, kompliziert angeordneten Räumen und langen, unübersichtlichen Flucht- und Rettungswegen.
Alarmierungssystem	A1			Automatische Branderkennung im ganzen Gebäude (Vollüberwachung) mit einer allgemeinen, nicht verzögerten Alarmierung aller Personen in den beeinträchtigten Gebäudeteilen.
		A2		Automatische Branderkennung im ganzen Gebäude (Vollüberwachung) mit einer (stillen) Vor-Alarmierung ausgewählter Personen und einer manuell ausgelösten Alarmierung aller Personen in den beeinträchtigten Gebäudeteilen. Nach unbeantwortetem Ablauf der Anwesenheits- und Erkundungsverzögerung erfolgt eine automatische Alarmierung.
			A3	Lokale automatische Branderkennung mit örtlicher Alarmierung oder keine automatische Branderkennung. Der allgemeine Alarm für alle Personen in den beeinträchtigten Gebäudeteilen wird manuell aktiviert.
Alarmorganisation	M1			In der Brandverhütung und im Umgang mit Gefahrensituationen steht in genügender Anzahl gut organisiertes und ausgebildetes sowie regelmässig trainiertes Personal zur Verfügung (mindestens 1 Person pro Geschoss und ein zahlenmässig günstiges Verhältnis von Sicherheitspersonal zu maximaler Personenbelegung). Die Alarmorganisation wird von unabhängiger Stelle zertifiziert und regelmässig auditiert. Es werden überwachte Evakuierungsübungen durchgeführt, deren Ergebnisse den Planungsvorgaben zu genügen haben. Zudem werden im Allgemeinen übersichtliche, einfach zu benutzende Flucht- und Rettungswege (Stufe B1 oder B2) und ein automatisches Branderkennungs- und Alarmierungssystem (Stufe A1 oder A2) vorausgesetzt.
		M2		Es bestehen die Anforderungen der Stufe M1 mit den Ausnahmen, dass • Geschossverantwortliche nicht immer präsent sein müssen, • das zahlenmässige Verhältnis von Sicherheitspersonal zu maximaler Personenbelegung ungünstiger sein kann, • keine Audits von unabhängiger Stelle durchgeführt werden müssen, • die Gebäudemerkmale die Stufen B2 und B3 aufweisen dürfen, • Alarmierungssysteme der Stufe A2 genügen.
			M3	Die organisatorischen und personellen Massnahmen zur Gewährleistung der Brandsicherheit sind minimal. Es gibt keine unabhängigen Audits. Die Gebäude dürfen Merkmale der Stufe B3 aufweisen, und die Qualität der Alarmierungssysteme darf der Stufe A3 entsprechen. Hinweis: Alarmorganisationen der Stufe M3 eigenen sich nicht für die ingenieurmässige Brandschutzplanung, es sei denn, andere Massnahmen gewährleisten die Brandsicherheit, wie z.B. umfangreiche passive und/oder aktive Brandschutzsysteme.

Tab. 31: Qualifizierung der Gebäudekomplexität, des Alarmierungssystems und der Alarmorganisation nach PD 7974-6

6.9 Fluchtdauer

Wie die Reaktionsdauer, hängt die Fluchtdauer ebenfalls von zahlreichen personen- und gebäudespezifischen Einflussgrössen ab. Deshalb

- beansprucht jede Person ihre individuelle Fluchtdauer;
- müssen für die Berechnung von Evakuierungsdauern in vielen Fällen die Verteilungskurven der Fluchtdauern von Personengruppen herangezogen werden.

Zwischen den Reaktionsdauer- und Fluchtdauer-Verteilungskurven für Personengruppen existieren wechselseitige Beziehungen, sodass sich diese nicht unmittelbar addieren lassen.

Gebäude- und personenspezifische Einflussfaktoren

Die Fluchtdauer hängt von den folgenden **gebäudespezifischen Faktoren** ab:

- Gebäudegeometrie und -abmessungen
  - Anzahl Geschosse,
  - räumliche Ausdehnung der Geschosse,
  - Komplexität des Layouts (Raumkonfiguration);
- Abflussvermögen ausserhalb des Gebäudes;
- Gebäudenutzung
  - Personenzahl,
  - Personenverteilung im Gebäude,
  - Personenströme;
- Kennzeichnung der Flucht- und Rettungswege;
- Beleuchtung der Flucht- und Rettungswege;
- Führung der Flucht- und Rettungswege
  - horizontal (Raum, Gang),
  - vertikal (Treppe, Rampe),
  - Wegverengungen;
- Bemessung der Flucht- und Rettungswege (Anzahl, Länge, Breite);
- Gestaltung der Flucht- und Rettungswege
  - Wegverengungen,
  - Farbgebung;
- Zustand der Flucht- und Rettungswege
  - Verstellungen,
  - Versperrungen.

Zu den **personenspezifischen Faktoren**, welche die Fluchtdauer beeinflussen, zählen:

- Gebäudekenntnisse;
- Intuition;
- psychischer Zustand der Personen
  - Nervosität,
  - Geduld,
  - Durchsetzungsvermögen;
- soziale Zugehörigkeit/Angliederung (Gruppenbildung);
- Verhaltensänderungen infolge
  - Angehörigensuche,
  - Neugierde,
  - Staubildungen,
  - erforderlicher Passagen durch verrauchte Bereiche;
- individuelle Laufgeschwindigkeit, abhängig von physischen Daten, wie
  - Alter,
  - Geschlecht,
  - Körpergewicht,
  - Körpergrösse,
  - Beweglichkeit,
  - Bekleidung,
  - Gesundheitszustand.

Die die Fluchtdauer und die Reaktionsdauer beeinflussenden Faktoren entsprechen sich teilweise. Mit ihnen lassen sich objektspezifische Evakuierungsszenarien erzeugen (vgl. Kapitel 6.11).

Bewegungsparameter

Die Bewegung einer Menschenmenge lässt sich mit den folgenden Kenngrössen charakterisieren:

- Gehgeschwindigkeit [m/s],
- Personendichte [Personen/m^2],
- Personenstrom (= spezifischer Personenstrom x effektive Wegelementbreite) [Personen/s],
- Spezifischer Personenstrom (= Personendichte x Gehgeschwindigkeit) [Personen/(m·s)].

Die effektive (benutzbare) Wegelementbreite wird in [136], S. 40-41 und [147], S. 3/368-3/369 definiert.

Gehgeschwindigkeit, spezifischer Personenstrom

Die Personenbewegung in Gebäuden wird vorwiegend mithilfe der folgenden Grössen zu quantifizieren versucht (vgl. Tabelle 32):

- Gehgeschwindigkeit auf horizontalen Wegelementen (Räume, Korridore, Rampen),
- Gehgeschwindigkeit auf vertikalen Wegelementen (Treppen),
- Gehgeschwindigkeit bei Engstellen, Durchgängen und Türen,
- spezifischer Personenstrom.

Diesbezügliche Werte sind in der Fachliteratur zu finden, insbesondere in Abhängigkeit von:

- Personendichte,
- Personenströme,
- Gehwegneigung,
- Mobilität,
- Alter,
- Rauchbelastung,
- Bewegungsrichtung,
- Steigungsverhältnis der Treppe,
- Stufenzahl der Treppe,
- Türöffnungskraft.

Gehgeschwindigkeit, spezifischer Personenstrom und deren Einflussfaktoren

Bewegungsgrössen				Einflussfaktoren										Literatur
Gehgeschwindigkeit auf horizontalen Wegelementen	**Gehgeschwindigkeit auf vertikalen Wegelementen** (Treppen)	**Gehgeschwindigkeit bei Engstellen, Durchgängen, Türen**	**Spezifischer Personenstrom**	**Personendichte**	**Personenstromdichte** [1]	**Gehwegneigung**	**Mobilität**	**Alter**	**Rauchbelastung** (K, D_L)	**Bewegungsrichtung auf Treppen**	**Steigungsverhältnis von Treppen**	**Stufenzahl von Treppen**	**Türöffnungskraft**	
X				X										*[147] [148]*
X					X									*[149]*
X						X								*[148]*
X							X							*[136] [150] [151] [152]*
X								X						*[148] [152] [153]*
X									X					*[126] [128] [136] [139]*
	X			X						X				*[147] [148]*
	X				X									*[149] [150]*
	X						X							*[150]*
	X						X			X				*[151] [152] [153]*
	X							X		X				*[153] [154]*
	X			X							X			*[147]*
	X											X		*[148]*
		X			X									*[149]*
		X					X						X	*[151]*
			X											*[126] [136]*
			X	X										*[150] [153]*
			X	X						X	X			*[147]*

Tab. 32: Gehgeschwindigkeit, spezifischer Personenstrom und deren Einflussfaktoren

Legende zu Tabelle 32

X trifft zu

☐ trifft nicht zu (leere Felder)

Erläuterung zu Tabelle 32

[1] Die Personenstromdichte ist das Verhältnis der Summe der senkrechten Projektionen der Menschen zur Grundfläche, die vom Personenstrom eingenommen wird. [149], S. 47

Nelson und Mowrer, zitiert in PD 7974-6 und ISO/TR 16738, entwickelten aufgrund von Beobachtungen und Experimenten für horizontale und vertikale Wegelemente eine empirische Beziehung zwischen der Gehgeschwindigkeit einer Personengruppe bzw. dem spezifischen Personenstrom einerseits und der flächenbezogenen Personendichte andererseits (vgl. Tabelle 33). Bei ihren Untersuchungen unterschieden Nelson und Mowrer nicht zwischen Geschlecht, Alter, Treppenauf- und Treppenabstieg. *[126] [136] [147]*

Tabelle 34 zeigt alle bisher genannten Faktoren, welche die erforderliche Evakuierungsdauer $t_{erf.\ Evak} = t_{Detekt} + t_{Alarm} + t_{Reakt} + t_{Flucht}$ beeinflussen und mit deren Hilfe objektbezogene Evakuierungsszenarien festgelegt werden können.

Weil die Alarmierungs- und Reaktionsdauern sehr grossen Streuungen unterliegen, üben das Alarmierungssystem und die Alarmorganisation auf die erforderliche Evakuierungsdauer den wohl bedeutsamsten Einfluss aus.

Gehgeschwindigkeit und spezifischer Personenstrom auf horizontalen und vertikalen Wegelementen nach Nelson und Mowrer

Mathematische und grafische Darstellungen

Personendichte D < 0.54 Personen/m²

Die Personen bewegen sich mit ihrer individuellen Gehgeschwindigkeit

Personendichte D > 3.8 Personen/m²

Die Bewegung der Personen bzw. des Personenstroms kommt zum Erliegen (S = 0)

0.54 Personen/m² ≤ D ≤ 3.8 Personen/m²

$S = k - a \cdot k \cdot D$

$F_S = S \cdot D = (1 - a \cdot D) \cdot k \cdot D$

S	Gehgeschwindigkeit [m/s]
F_S	spezifischer Personenstrom [Personen/(m·s)]
D	Personendichte [Personen/m²]
k	Konstante (s.u.)
a	Konstante, wobei a = 0.266

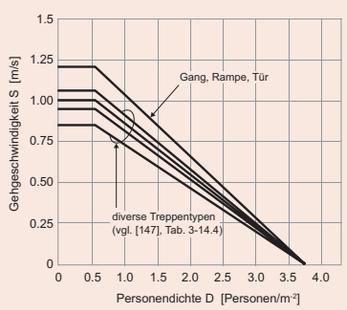


Abb. 115: Gehgeschwindigkeit als Funktion der Personendichte

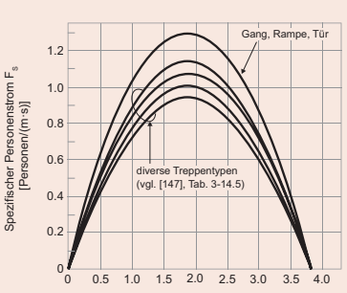


Abb. 116: Spezifischer Personenstrom als Funktion der Personendichte

Maximale unbehinderte Gehgeschwindigkeit und maximaler spezifischer Personenstrom

Wegelemente			k [-]	S_{max} [m/s]	F_{Smax} [Personen/(m·s)]
Horizontale Wegelemente (Korridore, Mittel-/Seitengänge, Rampen, Türdurchgänge etc.)			1.40	1.19	1.30
Vertikale Wegelemente (Treppen)	Stufenhöhe [mm]	Auftrittstiefe [mm]			
	191	254	1.00	0.85	0.94
	178	279	1.08	0.95	1.01
	165	305	1.16	1.00	1.09
	165	330	1.23	1.05	1.16

Tab. 33: Gehgeschwindigkeit und spezifischer Personenstrom auf horizontalen und vertikalen Wegelementen nach Nelson und Mowrer

Faktoren zur Bildung von Evakuierungsszenarien und zur Ermittlung der erforderlichen Evakuierungsdauer

Zeiträume				Einflussfaktoren
$t_{erf.\ Evak} = t_{Detekt} + t_{Alarm} + t_{Reakt} + t_{Flucht}$	t_{Detekt}	**Detektion**		Lage des Brandherdes (offen/verdeckt) Intensität des Brandherdes (Glut/Flamme) Anwesenheit von Personen Automatische Meldesysteme (BMA/SPA)
	t_{Alarm}	**Alarmierung**		Alarmierungsart Anwesenheit von Personen (Anwesenheitsverzögerung) Erkundung (Erkundungsverzögerung) Alarmorganisation
	t_{Reakt}	**Reaktion**	**Gebäudespezifische Faktoren**	Wahrnehmbarkeit von Brandprodukten (Gase, Rauch, Hitze) Gebäudenutzung (Personenzahl und -verteilung) Geometrie der Geschossgrundrisse (Ausdehnung, Layout) Komplexität der Fluchtwegführung Visualisierung der Fluchtwege (Pläne, Kennzeichnung) Alarmierungssystem (Methode, Qualität) Alarmorganisation (Sicherheitspersonal, Schulung)
			Personenspezifische Faktoren	Aufmerksamkeit, Initiative, Reaktionsfreudigkeit Gebäudekenntnisse, Vertrautheit mit der Alarmorganisation Bewusstseinsbildung (Gefahren-, Pflichtbewusstsein) Wahrnehmungs- und Interpretationseffekte, Intuition Physische Fähigkeiten (gesundheitliche Verfassung) Selbsteinschätzung Kultur- und Sprachzugehörigkeit Konkurrierende Aktivitäten
	t_{Flucht}	**Flucht**	**Gebäudespezifische Faktoren**	Gebäudegeometrie und -abmessungen Abflussvermögen ausserhalb des Gebäudes Gebäudenutzung (Personenzahl, -verteilung, -strom) Fluchtwegkennzeichnung, Fluchtwegbeleuchtung Fluchtwegführung (horizontal, vertikal) Fluchtwegbemessung (Anzahl, Länge, Breite) Fluchtweggestaltung (Wegverengungen, Farbgebung) Zustand der Fluchtwege (Verstellungen, Versperrungen)
			Personenspezifische Faktoren	Gebäudekenntnisse Intuition Psychischer Zustand der Personen (Nervosität, Geduld, Durchsetzungsvermögen) Soziale Zugehörigkeit (Gruppenbildung) Verhaltensänderungen (Angehörigensuche, Neugierde) Individuelle Bewegungsgeschwindigkeit (Mobilität)

Tab. 34: Faktoren zur Bildung von Evakuierungsszenarien und zur Ermittlung der erforderlichen Evakuierungsdauer

6.10 Strategie zum Nachweis der Personensicherheit

Nachweisstrategie

Rechnerische Nachweise zur Personensicherheit basieren auf den folgenden beiden wesentlichen Forderungen einer gefahrlosen Evakuierung:

1. Die Zeitspanne, die von den sich im Gebäude befindenden Personen benötigt wird, bis diese sich im Freien oder an einem anderen, relativ sicheren Ort befinden (erforderliche Evakuierungsdauer), muss kleiner sein als die Zeitspanne, in der die Bedingungen für eine sichere Selbstrettung eingehalten werden (verfügbare Evakuierungsdauer). Die entsprechende Bemessungsungleichung lautet:

$$t_{erf.\ Evak} < t_{verf.\ Evak}$$
$$RSET < ASET$$

2. Der Evakuierungsablauf darf nicht zu Personen gefährdenden Situationen – wie z.B. zu hohe Personendichten – führen.

Sicherheitszuschlag, Sicherheitsfaktor

Zwischen der erforderlichen Evakuierungsdauer (als Ergebnis von Evakuierungssimulationen) und der verfügbaren Evakuierungsdauer (als Ergebnis von Brand- und Rauchsimulationen) muss eine Zeitreserve bestehen. Dies macht die Einführung eines zeitlichen Sicherheitszuschlages t_{SZ} oder eines dimensionslosen Sicherheitsfaktors SF erforderlich, und zwar aus den folgenden Gründen:

- Die Berechnung der erforderlichen Evakuierungsdauer variiert aufgrund der vielen, mehrheitlich nicht quantifizierbaren gebäude- und personenspezifischen Einflussgrössen erheblich und kann deshalb nur einen approximativen Wert darstellen.
- Die Berechnung der verfügbaren Evakuierungsdauer setzt die Wahl eines Bemessungsbrandszenariums voraus, das aufgrund von diversen unsicheren Annahmen entwickelt werden muss.
- Für Evakuierungsrechnungen sind keine statistisch hinterlegten Fehlergrenzen verfügbar.

Für den Sicherheitszuschlag t_{SZ} und den Sicherheitsfaktor SF gelten die folgenden Beziehungen (vgl. Kapitel 8.4):

$$t_{SZ} = t_{verf.\ Evak} - t_{erf.\ Evak} \quad [min]$$
$$SF = t_{verf.\ Evak} / t_{erf.\ Evak} \quad [-]$$

Für Populationen mit ausschliesslich erwachsenen Personen durchschnittlichen Alters variieren die in der Literatur vorgeschlagenen Sicherheitsfaktoren zwischen 1.3 und 2.0. Für Populationen mit Kindern, älteren oder behinderten Menschen sind entsprechend höhere Werte anzusetzen.

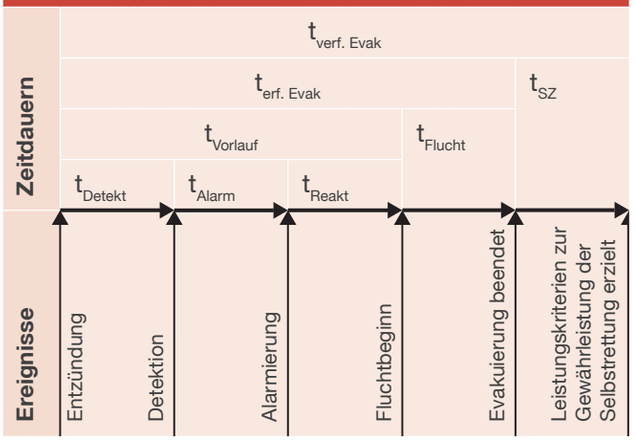
Die Evakuierungsdauer lässt sich umso präziser ermitteln, je besser das Aufnahmevermögen, die Erfahrenheit sowie der physische Zustand der Personen und je höher die Qualität des Alarmierungssystems und der Alarmorganisation sind. Werden die genannten Eigenschaften und Qualitäten schlechter, so wird eine Berechnung der Evakuierungsdauer schwierig, und es sind entsprechend hohe Sicherheitszuschläge zu berücksichtigen. Beispielsweise lässt sich für ein von Studenten besetztes Auditorium die erforderliche Evakuierungsdauer leichter quantifizieren als für ein weitverzweigtes Shoppingcenter mit vielen Einzelläden.

Das individuelle Verhalten von sich in Notsituationen befindenden Einzelpersonen ist komplex und deshalb sehr schwierig zu erfassen. Bei Personengruppen hingegen sind allgemeine Verhaltensweisen feststellbar, die sich mithilfe von Szenarien genauer beschreiben lassen, weshalb in solchen Fällen kleinere Sicherheitszuschläge gewählt werden können.

Zusammenstellung der Zeitdauern einer Evakuierung

Die in den Kapiteln 6.4 bis 6.9 beschriebenen Zeitdauern und die damit einhergehenden Ereignisse stehen in folgendem Zusammenhang:

Zeitdauern einer Evakuierung



Tab. 35: Zeitdauern einer Evakuierung

6.11 Evakuierungsstrategien, Evakuierungsszenarien

Evakuierungsstrategien

Evakuierungen können auch gestaffelt durchgeführt werden. Eine gleichzeitige Evakuierung aller Personen aufgrund eines Alarmsignals ist

a) in grossflächigen Gebäuden oft nicht sinnvoll, weil die Kapazität der Flucht- und Rettungswege nicht genügt,

b) in manchen Gebäuden wegen der damit verbundenen Betriebsstörung nicht praktikabel und

c) in Beherbergungsbetrieben mit auf fremde Hilfe angewiesenen Personen nicht möglich.

In den Fällen a) und b) kann die Evakuierung in Phasen durchgeführt werden, wonach zuerst die Personen aus dem Brandgeschoss, danach diejenigen aus dem darüber liegenden Geschoss und dann sukzessive alle anderen Personen das Gebäude auf den vorgesehenen Flucht- und Rettungswegen verlassen (vertikale Evakuierung).

Im Fall c) werden zuerst der Brandraum und die benachbarten Bereiche in eine sichere Zone desselben Geschosses evakuiert (horizontale Evakuierung). Situationsbezogen werden in der Folge weitere Gebäudeteile geräumt.

Je nach Nutzung können gestaffelte Räumungen von ganzen

Gebäuden sehr lange, bis zu einer Stunde dauernde Evakuierungszeiten erfordern.

Evakuierungsszenarien

Wie bei Brandsicherheitsberechnungen werden im Rahmen von Evakuierungssimulationen Szenarien analysiert. Dabei muss zwischen den beiden folgenden grundlegenden Evakuierungsszenarien unterschieden werden:

1. Basis-Szenarium: Grosse Personenzahlen und -dichten

Bei grossen Personenzahlen und hohen Personendichten wird die Evakuierungsdauer von der Durchflusszeit durch Verengungen dominiert.

2. Basis-Szenarium: Kleine Personenzahlen und -dichten

Bei kleineren Personenzahlen und niedrigen Personendichten wird die Evakuierungsdauer von der Reaktionsdauer und der eigentlichen Laufzeit dominiert.

Die erforderliche Evakuierungsdauer wird durch die längere der für diese beiden Szenarien ermittelten Evakuierungsdauer festgelegt.

Weitere Szenarien lassen sich definieren, indem beispielsweise

- die Geometrie für die Flucht- und Rettungswege,
- die anfängliche Personenverteilung,
- die Routenverteilung,
- die statistische Zusammensetzung der Population mit den entsprechenden demografischen Parametern

variiert werden.

6.12 Kenngrössen und Bestimmungsgleichungen zur Quantifizierung von Brandrauch und Erkennungsweite

Zur Quantifizierung des Brandrauches und der Erkennungsweite werden die in Tabelle 36 dargestellten Kenngrössen und Bestimmungsgleichungen benötigt.

Neben

- den Symbolen,
- den Masseinheiten und
- den Beziehungen zu anderen Kenngrössen

enthält die Tabelle, falls existent, den Kenngrössen zugeordnete

- typische Werte oder Wertebereiche sowie
- Angaben zur Literatur, die auf die Nutzung, Waren, Stoffe oder die Lagerung bezogene Tabellenwerke enthält.

Vorangehend wird die Bedeutung der Kenngrössen erläutert.

Bedeutung der Kenngrössen

Massenspezifische Schadstoffausbeute, massenspezifischer Schadstoffpartikel-Entstehungsanteil

Die massenspezifische Schadstoffausbeute ist als Verhältnis der produzierten Masse des Schadstoffes i zur verbrannten Brandgutmasse definiert und gibt somit die Fraktion des Brennstoffs an, die in Schadstoff-Partikelmasse umgewandelt wird. Sie hängt einerseits von der chemischen Zusammensetzung der Brandlast und andererseits von den Ventilationsbedingungen ab.

Da in Brandsimulationsmodellen im Regelfall keine Verbrennung gerechnet wird, sondern die Brandwirkungen einer Brandverlaufskurve folgen, müssen die Schadstoffausbeuten vorgegeben werden.

Heizwertspezifische Schadstoffausbeute, heizwertspezifischer Schadstoffpartikel-Entstehungsanteil

Die heizwertspezifische Schadstoffausbeute ist als Verhältnis der massenspezifischen Schadstoffausbeute zum effektiven Heizwert der Brandlast definiert und gibt somit die produzierte Schadstoff-Partikelmasse pro Einheit umgesetzter Brandlastenergie an.

Die Werte für die heizwertspezifischen Schadstoffausbeuten schwanken in der Regel deutlich weniger als diejenigen für die massenspezifischen Schadstoffausbeuten.

Schadstoffmassenstrom, Schadstoffproduktionsrate

Der Schadstoffmassenstrom $\dot{m}_i$ ist das Produkt der Abbrandrate $\dot{m}$ mit der jeweiligen Schadstoffausbeute Y_i und stellt den Quellterm für den Schadstoff i dar. Er hängt von der chemischen Zusammensetzung der Brandlast, von der Geometrie (Ausdehnung) derselben, von der Strahlungseinwirkung auf die Brandlastoberfläche und in hohem Masse auch von den Ventilationsbedingungen ab. Deshalb sind der den Stoffdaten zugrunde liegenden Testmethode und den damit verbundenen experimentellen Randbedingungen grosse Beachtung zu schenken.

Extinktionskoeffizient, optische Rauchdichte pro Weglängeneinheit

Beide Grössen beschreiben die Licht bzw. die Sicht trübende Wirkung des Brandrauches, unterscheiden sich jedoch entsprechend ihrer formalen Definition (Messvorschrift) durch den Umrechnungsfaktor ln(10).

Die gemessene optische Dichte hängt stark von der Wellenlänge der verwendeten Lichtquelle ab, was beim Vergleich von Daten berücksichtigt werden muss. Steng genommen gelten die angegebenen Formeln nur für monochromatisches Licht, werden aber im Allgemeinen auch für polychromatisches (weisses) Licht verwendet. [94], S. 33

Massenspezifische optische Rauchdichte, massenspezifischer Extinktionskoeffizient

Die massenspezifische optische Rauchdichte D_m und der massenspezifische Extinktionskoeffizient K_m berücksichtigen – durch Einbezug der Schadstoffausbeute Y_i – die Materialabhängigkeit der Rauchproduktion und hängen ausserdem vom Verbrennungsablauf (Luftzufuhr, Flammenbildung) ab.

Schadstoffmassenkonzentration, Schadstoffbeladung

Die Massenkonzentration des Schadstoffes i ist die auf das Raum- oder Rauchvolumen V_R bezogene Schadstoffmassenproduktion m_i ($= m_{Brandlast} \cdot Y_i$). [94], S. 36; [140],

S. 2/299-2/300

Im Allgemeinen ist nur der Anteil an verbrannter Brandgutmasse relevant, der in im sichtbaren Spektralbereich aktive Rauchpartikelmasse umgewandelt wird. Für schlechte Sichtverhältnisse sind die festen und flüssigen Rauchbestandteile verantwortlich. [82], S. 10

Erkennungsweite (Sichtweite)

Die Erkennungsweite ist der maximale Abstand zwischen Beobachter und Rettungszeichen, bei dem dieses gerade noch gesehen und erkannt werden kann. Sie wird vereinfacht auch als Sichtweite bezeichnet und hängt von vielen Einflussfaktoren ab, wie

- Eigenschaften des Brandrauches (optische Rauchdichte, Rauchpartikelgrösse, spektrale Eigenschaften des Brandrauches, Reizgasanteile),
- Beleuchtungssituation im Raum (Beleuchtungsstärke, Lichtstrom, Leuchtdichte des Umfeldes, Reflexionseigenschaften der Wände, Position der Leuchten),
- Eigenschaften des Rettungszeichens (Leuchtdichte, Hintergrundleuchtdichte, Kontrastverhältnis, Grösse, Position, Leuchtmittel),
- individuelle Faktoren (Sehschärfe, Alter, Adaptionszustand, Müdigkeit, Abstand, Blickwinkel),
- etc. [133], S. 189

Die Ansätze (Gleichungen) zur Bestimmung der Erkennungsweite

- basieren auf empirischen Daten, die mithilfe von Studien zur Auswirkung des Rauches auf Testpersonen ermittelt wurden;
- verdeutlichen, dass im Wesentlichen ein reziproker Zusammenhang zwischen optischer Rauchdichte und Erkennungsweite besteht;
- gelten für eine homogene Rauchverteilung zwischen Beobachter und Rettungszeichen (gibt es in den Rauchdichten relevante orts- und zeitabhängige Schwankungen, so muss rechnerisch eine angemessene lokale Behandlung der Lichtabschwächung, d.h. eine integrale Zerlegung, durchgeführt werden);
- divergieren, wenn K bzw. D_L gegen Null streben; demnach gelten die Relationen nicht für den Übergang zum rauchfreien Zustand;
- beziehen sich auf eine frontale Blickrichtung;
- besitzen Gültigkeitsbereiche, die von den zugrunde liegenden Experimenten vorgegeben werden.

Parameter für Erkennungsweite

Empirisch bestimmter Parameter (Proportionalitätsfaktor), der

- vom Kontrast des Rettungszeichens, also dem Unterschied zwischen der Leuchtdichte des Zeichens und der Leuchtdichte des Hintergrundes,
- von der Beleuchtungsstärke,
- von der Leuchtdichte an der Oberfläche des Rettungszeichens und
- von den Streueigenschaften der Rauchpartikel bzw. dem Streuanteil des Extinktionskoeffizienten

abhängt (nach Jin). *[139]*

Kenngrössen und Bestimmungsgleichungen zur Quantifizierung des Brandrauches und der E

Kenngrösse			Symbol	Werte [1]	Einheit	Beziehungen
Massenspezifische Schadstoffausbeute **Massenspezifischer Schadstoffpartikel-Entstehungsanteil**			Y_i	$Y_{Russ} \leq 0.20$ [2] $Y_{Russ} \leq 0.05$ [3] $Y_{CO} \approx 0.02$ [4] $Y_{CO} \approx 0.20$ [5]	$g_{Schadstoff\,i}/g_{Brandlast}$	$Y_i = m_i / m_{Brandlast} = \dot{m}_i / \dot{m}$ $Y_i = \dot{m}_i \cdot (H_{eff} / \dot{Q})$
Heizwertspezifische Schadstoffausbeute **Heizwertspezifischer Schadstoffpartikel-Entstehungsanteil**			Y_i/H_{eff}		kg/MJ g/kJ kg/kWh	$Y_i/H_{eff} = \dot{m}_i / \dot{Q} = m_i / Q$
Schadstoffmassenstrom **Schadstoffproduktionsrate**			$\dot{m}_i$		g/s kg/min kg/h	$\dot{m}_i = \dot{m} \cdot Y_i = (\dot{Q} / H_{eff}) \cdot Y_i$
Optische Rauchdichte pro Weglängeneinheit			D_L	≤ 0.10	m^{-1}	$D_L = K / \ln(10) \approx 0.434 \cdot K$ $D_L = (D_m / Y_i) \cdot c_i$
Extinktionskoeffizient **Schwächungskoeffizient** **Optischer Extinktionskoeffizient**			K	≤ 0.20	m^{-1}	$K = D_L \cdot \ln(10) \approx 2.303 \cdot D_L$ $K = K_m \cdot c_i$
Massenspezifische optische Rauchdichte **Rauchpotenzial** (bezogen auf die optische Dichte pro Weglängeneinheit)			D_m	0.3 [6]	m^2/g	$D_m = (D_L \cdot Y_i) / c_i$ $D_m = (K_m \cdot Y_i) / \ln(10)$
Massenspezifischer Extinktionskoeffizient **Rauchpotenzial** (bezogen auf den Extinktionskoeffizienten)			K_m	8.7 ± 1.1 [7] 10 [8]	m^2/g	$K_m = (D_m / Y_i) \cdot \ln(10)$ $K_m = K / c_i$
Schadstoffmassenkonzentration **Schadstoffbeladung**			c_i	≤ 0.023 [9]	g/m^3	$c_i = K / K_m$ $c_i = m_i / V_R$ $c_i = (m_{Brandlast} \cdot Y_i) / V_R$
Erkennungsweite (Sichtweite)	**Modell**	**Jin**	S	15 [10]	m	$S = C / K = C / (K_m \cdot c_i)$
				40 [11]		$S = C / K = C / (K_m \cdot c_i)$
						$S = (C / K) \cdot [0.133 - 1.47 \cdot lo$
		ISO 13571		20		$S = -\ln(c_v) / K$ $S = -\ln(c_v) / (K_m \cdot c_i)$
		Rasbash		10		$S = 1.5 \cdot D_L^{-0.8} \approx 2.923 \cdot K^{-0.8}$ $S \approx 2.923 \cdot (K_m \cdot c_i)^{-0.8}$
		Wilk				$S = \ln(L_0/L_S) / K$ $S = \ln(L_0/L_S) / (K_m \cdot c_i)$
Parameter für Erkennungsweite (nach Jin)			C	3 [10] 8 [11]		
Leuchtdichte			L		cd/m^2	
Leuchtdichtekontrast (nach Jin)			c_v	0.02 [12]		$c_v = \lvert (L_Z - L_H) / L_H \rvert$
Leuchtdichteverhältnis (nach Wilk)			L_0/L_S			

Tab. 36: Kenngrössen und Bestimmungsgleichungen zur Quantifizierung des Brandrauches und der Erkennungsweite

r Erkennungsweite		
		Literatur
		[32] [56] [129] [43] [155] [156] [157]
		[12] [126] [128] [136]
		vgl. Tabelle 28
		[32] [127] [140] [135]
		[127] [140] [158] [32] [100] [135] [159]
		Rechenwert aus Simulation
	nicht reizender Rauch	*[139] [140] [160]*
	reizender Rauch mit $K < 0.25\ m^{-1}$	*[133]*
7 ·log(K)]	reizender Rauch mit $K \geq 0.25\ m^{-1}$	
		[127] [133]
		[126] [133] [161]
		[12] [133]
		[139] [140]
		[127]
		[12]

Leuchtdichte

Verhältnis der Lichtstärke (in Candela bzw. cd) zur leuchtenden Fläche (in m^2).

Leuchtdichtekontrast

Verhältnis des Betrages der Leuchtdichtedifferenz von Rettungszeichen (L_Z) und Hintergrund (L_H), bezogen auf die Leuchtdichte des Hintergrundes (L_H).

Leuchtdichteverhältnis

Verhältnis zwischen der mittleren Leuchtdichte des Rettungszeichens ohne Rauch L_0 (= Anfangsleuchtdichte) und der im Brandrauch „gesehenen“, auf den Abstand S zwischen Rettungszeichen und Beobachter bezogenen Leuchtdichte L_S (= erforderliche Leuchtdichte). Für L_S werden 2-5 cd/m^2, für L_0 200 cd/m^2 vorgeschlagen. [12], S. 77-78

Erläuterungen zu Tabelle 36

[1)] Fallspezifisch können andere oder differenzierte Werte massgebend sein!

[2)] Gilt für Schaumstoffe aus Polyurethan (PU) und Polystyrol (PS).

[3)] Gilt für eine Mischbrandlast, bestehend aus ca. 50 % Holz, ca. 30 % Polyethylen, ca. 10 % Nylon, ca. 10 % Polyurethan-Schaumstoff (Gewichtsprozente).

[4)] Wert für gut ventilierte Flammenbrände von Einrichtungsgegenständen in Räumen. [43], S. 320 (Y_{CO} = 0.02); [94], S. 35 (Y_{CO} = 0.013)

[5)] Wert für unterventilierte Raumbrände von verschiedenen, nicht flammhemmend ausgerüsteten Brandlasten. [43], S. 320

[6)] Experimentell bestimmter Wert für die flammende Verbrennung einer Mischbrandlast, wie sie in Wohn-, Büro- und Verkaufsgebäuden vorzufinden ist. Der genannte Wert ist hinreichend konservativ, sodass er bei entsprechenden Bemessungsbrandszenarien für unbekannte oder nicht eindeutig festlegbare Brandlasten verwendet werden kann. [135], S. 95

Brandphasen ohne Flammenbildung zeigen in der Regel ein deutlich höheres Rauchpotenzial. Hingegen sind in diesem Fall die Abbrandrate und damit auch die Raucherzeugung wesentlich niedriger als bei Bränden mit Flammen und entsprechend hohen Brandleistungen.

[7)] Guter Wert für die flammende Verbrennung von vielen typischen Brandlasten (wobei die Versuche mit rotem Licht der Wellenlänge 0.649 µm durchgeführt wurden). [140], S. 2/297

Im Rahmen von älteren (1976), mit einer polychromatischen Lichtquelle durchgeführten Versuchen ermittelten J.D. Seader und I.N. Einhorn für die flammende Verbrennung von Holz und Kunststoffen einen K_m-Wert von 7.6 m^2/g. [140], S. 2/297

[8)] Typischer Wert für gut ventilierte Brände (korrigiert für weisses Licht). [159], S. 1516

[9] Typischer Wert für die betreffend Personensicherheit gerade noch akzeptierbare Massenkonzentration an Schadstoffen (Rauch) in der raucharmen Schicht bei flammender Verbrennung von vielen typischen Brandlasten (mit $K \leq 0.20\ m^{-1}$ und $K_m = 8.7\ m^2/g$).

[10] Für reflektierende Rettungszeichen liegt die Konstante C zwischen 2 und 4 (Mittelwert C = 3). Dabei gilt der Wert 2 für schlecht reflektierende Rettungszeichen mit einem Reflexionsgrad von 0.13 und der Wert 4 für Rettungszeichen mit einem hohen Reflexionsgrad von 0.70, und zwar bei einer Raumbeleuchtungsstärke von 40 lx. [139], S. 2/55-2/56; [140], S. 2/297-2/298

[11] Für hinterleuchtete Rettungszeichen liegt die Konstante C zwischen 5 und 10 (Mittelwert C = 8). Dabei gilt der Wert 5 für eine Leuchtdichte der Rettungszeichen von 500 cd/m^2 und der Existenz von Rauchgasen einer schwelenden Verbrennung, der Wert 10 für Rettungszeichen mit einer Leuchtdichte von 2000 cd/m^2 und bei Vorhandensein von Brandrauch einer offenen Verbrennung. Bei diesen Versuchen betrug die Raumbeleuchtungsstärke stets 80 lx. [139], S. 2/55-2/56; [140], S. 2/297-2/298

[12] Wert für den minimalen, gerade noch feststellbaren Kontrast. [127], S. 11

6.13 Kenngrössen zur Charakterisierung einer Population

Tabelle 37 zeigt eine Auswahl von Kenngrössen zur demografischen Charakterisierung einer Population mit den entsprechenden Literaturangaben.

Kenngrössen zur Charakterisierung einer Population

Kenngrösse	Literatur
Personendichte	[21] [152] [153] [162] [163]
Flächenbedarf von Personen	[148] [149]
Altersverteilung einer Standard-Personengruppe	[153]
Behindertenanteile in der Schweiz	[148] [164]
Mobilitätsbehinderungen bei verschiedenen Alterskategorien	[148]
Grössenverteilung erwachsener Menschen in Mitteleuropa	[148]

Tab. 37: Kenngrössen zur Charakterisierung einer Population

Eine Population sollte stets auf die Nutzung bezogen charakterisiert werden.

7 Evakuierungsmodelle

7.1 Typen von Evakuierungsmodellen

Personenströme können mithilfe von

- algebraischen und
- numerischen

Verfahren analysiert werden.

Die Wahl der angemessenen Berechnungsmethode hängt von den benötigten Aussagen ab.

Algebraische Evakuierungsmodelle (makroskopische Modelle)

Algebraische Evakuierungsmodelle, auch hydraulische Modelle oder Strömungsmodelle genannt, beschreiben die auftretenden Phänomene anhand eines kompakten Personenmassenstromes mithilfe von

- einfachen Gleichungen, welche die Kapazität eines Wegelementes in Abhängigkeit von seiner Breite oder anderen Parametern beschreiben (**algebraische Formeln**)

  oder

- empirisch abgeleiteten Zusammenhängen zwischen der Gehgeschwindigkeit und der Personendichte, um die Auswirkungen von örtlich und zeitlich veränderlichen Personendichten zu beschreiben (**dynamische Strömungsmodelle**).

Numerische Evakuierungsmodelle (mikroskopische Modelle)

Die numerischen Evakuierungsmodelle bzw. Individualmodelle können – in Abhängigkeit der Feinheit des die Gebäudestruktur abbildenden Netzwerkes – die individuellen Bewegungsabläufe einzelner Personen mithilfe von Rechenmodellen simulieren. Dabei werden die folgenden Modellierungstechniken angewandt (vgl. Abbildung 117):

- Die verfügbaren Laufflächen werden durch ein aus wenigen Zellen bestehendes grobes Netz überdeckt (**räumlich diskrete Modelle**). Dabei bildet jede Zelle eine geometrische Teilfläche (Raum, Korridor, Treppe etc.) ab.
- Der Grundriss wird mithilfe eines Netzwerkes aus Zellen abgebildet, wobei die Zellengrösse etwa dem Platzbedarf einer Person entspricht (**räumlich diskrete Modelle**). Dadurch lassen sich neben sämtlichen Wegelementen (wie Räume, Korridore, Treppen etc.) auch Hindernisse und Verengungen sowie die Personen als Individuen erfassen.
- Die Personenströme werden in einer dreidimensionalen, den realen räumlichen Verhältnissen möglichst gut nachempfundenen Geometrie beschrieben (**räumlich kontinuierliche Modelle**). Die dreidimensionale Abbildung verlangt ein extrem feines Netzwerk mit Zellenabmessungen im mm-Bereich. Damit können alle vorgängig erwähnten Elemente modelliert werden. Hindernisse wie Säulen, Schranken, Einrichtungsgegenstände etc. lassen sich jedoch exakter erfassen, und bei den Personen sind komplexere Verhaltensformen modellierbar.

Die Feinheit des Netzwerkes entscheidet also über die Leistungsfähigkeit des Evakuierungsmodells.

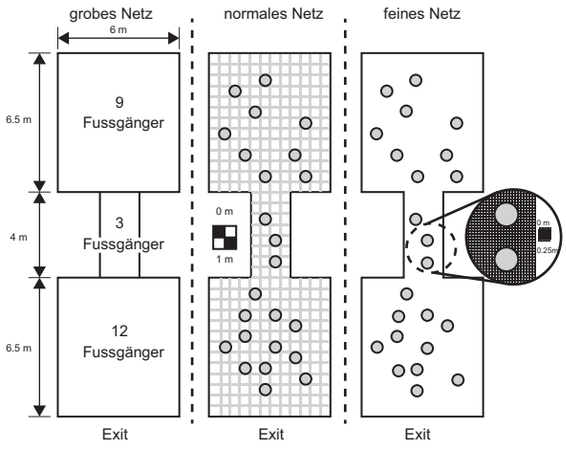


Abb. 117: Modellierungsarten bei Individualmodellen

7.2 Anwendungsgrundsätze

Das komplexe, psychologische Aspekte beinhaltende Verhalten der Menschen ist der am schwierigsten zu simulierende Teil der Evakuierung und lässt sich nur durch statistische Verhaltensweisen implementieren.

Daher müssen bei der Anwendung von Evakuierungsmodellen die folgenden Grundsätze beachtet werden:

- Kein Rechenmodell kann alle denkbaren Verhaltensaspekte einer Evakuierung erfassen. Vielmehr repräsentiert die Evakuierungssimulation einen idealisierten Fall, bei dem sich die Personen den vom Programmbenutzer vorgegebenen Eingabedaten entsprechend bewegen.
- Aufgrund der statistischen Natur des Evakuierungsprozesses lassen sämtliche Evakuierungsmodelle keine eindeutige Zeitbestimmung zu. Vielmehr werden die Evakuierungsdauern einer Wahrscheinlichkeitsverteilung folgen, die durch das System „Gebäude – Personen – Umwelt“ vorgegeben wird. Durch Parametervariationen und unter Verwendung verschiedener Rechenverfahren lassen sich mittels einer Grenzwertbetrachtung Zeitintervalle der Evakuierung festlegen (statt exakte Evakuierungsdauern).
- Die Überprüfung der Ergebnisse von mit Individualmodellen erstellten Evakuierungsanalysen ist sehr schwierig, weshalb dieselben Berechnungen im Rahmen einer Plausibilitätskontrolle stets auch mit einem hydraulischen Modell durchgeführt werden sollten.

7.3 Charakterisierung der Evakuierungsmodelle

Tabelle 38 beschreibt die Typen von Evakuierungsmodellen nach den folgenden Kriterien, die ihre charakteristischen Eigenschaften und Leistungsgrenzen aufzuzeigen und zu differenzieren vermögen:

- die den Modellansätzen zugrunde liegenden Annahmen,
- Modellansatz,
- Vor- und Nachteile,
- wichtige Eingabegrössen.

Evakuierungsmodelle		
Kriterium	**Hydraulische Modelle** (makroskopische Modelle bzw. Strömungsmodelle)	
	Algebraische Verfahren	**Dynamische Strömungsmodelle**
Grundannahmen	Alle Personen beginnen gleichzeitig mit der Evakuierung (d.h. die Reaktionsdauer ist für alle Individuen eines Personenstromes gleich). Es gibt keine Unterbrechungen im sich mit Beginn der Räumung bildenden Personenstrom (z.B. durch individuelle Handlungsentscheidungen). Alle Personen sind ausreichend mobil, sodass sie mit der Gruppenbewegung mithalten können. Es liegen „Normal-“ und keine Gefahrenbedingungen vor.	
Modellansatz	Gleichungen beschreiben die Kapazität eines Wegelementes (Ausgang, Treppe, Korridor) in Abhängigkeit von seiner Breite und gegebenenfalls anderen Parametern. Diese Kapazitätsanalyse von Wegelementen wird mit einem kompakten Personenstrom einheitlicher Dichte durchgeführt. Ein übliches Mass für die Kapazität ist die maximale Personenzahl, die pro Zeiteinheit einen Bereich definierter Breite passieren kann. Die Kapazität wird mit der effektiven Breite des betreffenden Wegelementes multipliziert, sodass man für dieses den zugehörigen maximalen Personenstrom erhält. Die effektive Breite berücksichtigt den Umstand, dass Personen in der Regel nicht die gesamte verfügbare geometrische Breite ausnutzen, sondern einen gewissen Mindestabstand zu den Begrenzungen einhalten. [147]	Die zu evakuierenden Personen werden in ihrer Gesamtheit als ein flüssiges Medium dargestellt, das in einem fiktiven, den verfügbaren Flucht- und Rettungswegen nachempfundenen Leitungssystem fliesst. Die entsprechenden Strömungsmodelle enthalten als Kern die empirischen Gleichungen der elementaren Kapazitätsanalyse. Die wesentlichen Parameter zur Charakterisierung des Personenstroms sind • die Fortbewegungsgeschwindigkeit und • die Personendichte. Die wesentlichen Parameter zur Charakterisierung des Leitungs- bzw. Fluchtwegsystems sind • die Länge der Wegstücke sowie • die Breite der Wegstücke und Ausgänge.
Vorteile	Einfach anwendbare Verfahren für nicht komplexe Fluchtweggeometrien mit übersichtlichen, leicht nachvollziehbaren Rechenschritten. Dadurch lassen sich die Ergebnisse gut beurteilen.	
	Auf die Anwendungsgrenzen bezogen, ist die Fehleranfälligkeit gering.	Zum Modellansatz existieren allgemein anerkannte Berechnungsmethoden (Predtetschenski und Milinski). Die Modelldaten basieren auf einer grossen Anzahl von Versuchen, die unter „Normalbedingungen“ durchgeführt wurden. Personenstaus und deren Zeiten sind identifizierbar. Von (homogenen) Personengruppen können spezifische Eigenschaften erfasst werden. Gefahrensituationen lassen sich pauschal berücksichtigen.

Tab. 38: Evakuierungsmodelle

Individualmodelle (mikroskopische Modelle)	
Räumlich diskrete Modelle	**Räumlich kontinuierliche Modelle**
Personen werden als eigenständige, mobile Individuen betrachtet, selbst bei einer Bewegung in der Gruppe oder im Personenstrom.	
Individuell vorgegebene oder statistisch angenommene körperliche Merkmale – z.B. Alter, Körpergrösse, Mobilität, Bekleidung – und den Evakuierungsablauf beeinflussende Verhaltensmuster ersetzen die empirischen Korrelationsfunktionen. Die Personenbewegungen sowie die Wechselwirkungen mit den baulichen Randbedingungen werden auf Basis von empirischen Untersuchungen, Beobachtungen und der Auswertung von Schadenfällen in Form von mathematischen Regeln nachgebildet.	
Die verfügbaren Laufflächen werden durch ein Gitter aus Zellen (Netzelementen) überdeckt. Die Individuen bewegen sich – in Abhängigkeit vom eigenen Ziel und von der angestrebten Bewegung der benachbarten Personen – von Zelle zu Zelle.	Die Bewegung der Personen wird in einer dreidimensionalen, den realen räumlichen Verhältnissen möglichst gut nachempfundenen Geometrie beschrieben. Es besteht ein hohes Mass an Flexibilität in Bezug auf Laufflächen, individuelle Mobilitätsparameter etc.
Neben der Anfangsverteilung der Personen können im Ablauf der Simulation gewisse individuelle Entscheidungen zufallsgesteuert bestimmt werden. Deshalb • erhält man bei mehrfacher Berechnung des gleichen Szenariums unterschiedliche Ergebnisse, deren Streuung Aufschluss über verborgenes Optimierungspotenzial geben kann; • lassen sich unmittelbar die ungünstigsten Resultate in die Sicherheitsanalyse einbeziehen und somit ansonsten notwendige, jedoch nur schwer quantifizierbare Sicherheitszuschläge auf Räumungszeiten vermeiden. Der Einfluss der Individuen auf die Effizienz der Evakuierung wird in einer möglichst realitätsnahen Umgebung erfasst. Die zeitliche Auflösung eines Räumungsvorgangs inkl. Stau- und Stauabbauzeiten – insbesondere bei komplexen Geometrien mit sich vereinigenden Personenströmen – lässt sich gut erfassen (dynamische Ausgabe der Ergebnisse). Zwecks Optimierungen besteht die Möglichkeit, Parameterstudien und statistische bzw. probabilistische Untersuchungen durchzuführen. Ergebnisse lassen sich auf vielfältige Art darstellen (Tabellen, Diagramme, Grafiken, Filme).	

Erläuterungen zu Tabelle 38

[1] Die Auflistung zeigt eine Auswahl von fortschrittlichen, gut dokumentierten und entgeltlich oder kostenlos verfügbaren Verfahren und Programmen. Eine ausführliche Liste von Evakuierungsmodellen ist unter http://www.ped-net.org zu finden.

Eine ausführliche Liste von Individualmodellen ist in NIST Technical Note 1471 zu finden. *[165]*

[2] Individualmodell mit grober Gitterstruktur, das den Grundriss in Räume, Korridore, Treppen usw. unterteilt und Personen lediglich von einem Raum zu einem anderen zu bewegen erlaubt (räumlich diskretes Modell).

[3] Individualmodell mit feiner Gitterstruktur, das den Grundriss in kleine Netzzellen unterteilt und neben den üblichen Wegelementen auch Hindernisse zu berücksichtigen erlaubt (Zwischenform von räumlich diskretem und räumlich kontinuierlichem Modell).

[4] Individualmodell mit „kontinuierlicher“ Gitterstruktur, das den Grundriss in sehr kleine Netzzellen unterteilt und neben den üblichen Wegelementen auch Hindernisse zu berücksichtigen erlaubt (räumlich kontinuierliches Modell).

Evakuierungsmodelle		
Kriterium	**Hydraulische Modelle** (makroskopische Modelle bzw. Strömungsmodelle)	
	Algebraische Verfahren	**Dynamische Strömungsmodelle**
Nachteile	Die empirischen Gleichungen der elementaren Kapazitätsanalyse, die den Zusammenhang zwischen der Geschwindigkeit des Personenstromes und der Personendichte herstellen (Korrelationsfunktionen), können im Rahmen des hydraulischen Ansatzes nicht konsistent berechnet werden. Um grobe Fehleinschätzungen zu vermeiden, müssen die verwendeten empirischen Relationen für den konkreten Anwendungsfall validiert sein. Das verfügbare empirische Datenmaterial ist mit starken Streuungen behaftet, sodass eindeutige Relationen nur bedingt festlegbar sind. Somit bleibt die Anwendung der Kapazitätsanalyse im Wesentlichen auf die Eruierung des Wegelementes mit der geringsten Kapazität begrenzt. Dieses wirkt als „Nadelöhr“ und legt somit die Evakuierungsdauer fest.	
	Die vom Wegelement abhängige Laufgeschwindigkeit und die Durchlasskapazität werden vom Verfahren vorgegeben. Es muss eine für das Szenarium typische mittlere Personendichte angenommen werden. Es sind keine Stauzeiten berechenbar. Individuelle Personeneigenschaften sind nicht erfassbar, wodurch inhomogene Personengruppen durch gemittelte Bewegungsparameter beschrieben werden müssen. Das Zusammenfliessen und Aufspalten von Personenströmen ist schwer erfassbar, wodurch das Verfahren auf einfache Fluchtweggeometrien beschränkt bleibt. Objektspezifische Gegebenheiten werden nicht berücksichtigt.	Bei komplexen Gebäudegeometrien wird das Verfahren aufwendig. Für Detailbewertungen werden die Berechnungen umfangreich. Inhomogene Personengruppen müssen durch gemittelte Bewegungsparameter beschrieben werden. Individuelles Personenverhalten ist nicht erfassbar. Der Einfluss der Anströmrichtung auf Türen und Treppen wirkt sich nicht aus. Gefahrenbedingungen müssen extrapoliert werden. Staubildungen machen eine genauere Überprüfung der Rechenergebnisse erforderlich.
Wichtige Eingabegrössen	Personenzahlen Fluchtweglängen und -breiten Wegelemente (horizontal/vertikal) Dichte des Personenstromes Gehgeschwindigkeit für alle Wegelemente Durchlasskapazität für alle Wegelemente	Personenzahlen Fluchtweglängen und -breiten Wegelemente (horizontal/vertikal)
Verfahren, Programme [1)] (Stand 29.11.2013)	Gleichungen nach NFPA 130, Kapitel 5.5 und Anhang C *[166]*	Predtetschenski und Milinski *[149]* Modell der effektiven Breite nach J.L. Pauls, zitiert in: • H.E. Nelson und F.M. Mowrer *[147]* • G. Proulx *[150]* • ISO/TR 16738 *[136]* Verfahren nach PD 7974-6, Kapitel 5.5 *[126]*

Tab. 38: Evakuierungsmodelle

Individualmodelle (mikroskopische Modelle)	
Räumlich diskrete Modelle	**Räumlich kontinuierliche Modelle**
Die Auswahl der vielfältigen Eingabeparameter erfordert eine grosse Sorgfalt. Eine unseriöse, fehlerhafte Dateneingabe produziert unrealistische, nicht brauchbare Ergebnisse. Die Rechenergebnisse sind schwer nachvollziehbar, sodass Validierungsrechnungen notwendig werden.	
Die Gitterstruktur führt zu Einschränkungen bei der Berücksichtigung der Variabilität individueller Mobilitätsparameter (Körpermasse, Gehgeschwindigkeit) und der Modellierung der individuellen Bewegung. Zur Bestimmung der Gehgeschwindigkeit und der Kapazität von Wegelementen werden empirische Korrelationsfunktionen eingesetzt, die eine Wahl geeigneter, vom Anwendungsfall abhängende Parameter verlangen.	Es sind höhere Rechenkapazitäten erforderlich.
Persönliche Mobilitätsparameter Parameter zur Charakterisierung bestimmter Verhaltensweisen (z.B. Fluchtwegwahl) Geometrische Strukturen des Objektes, die sich aus CAD-Zeichnungen übernehmen lassen	
EXODUS: http://www.fseg.gre.ac.uk/exodus [2)] PedGo: http://www.pedgo.com [3)] Pathfinder: http://www.thunderheadeng.com [3)] STEPS: http://www.steps.mottmac.com [3)] ASERI: http://www.ist-net.de [4)] Simulex: http://www.iesve.com [4)] SimWalk PRO: http://www.simwalk.ch [4)] FDS+Evac: http://www.vtt.fi/proj/fdsevac [4)]	

7.4 Charakterisierung der Individualmodelle

Anhand der in Tabelle 39 aufgelisteten modellspezifischen Aspekte, wie

- Modellierungsmethode,
- Netzfeinheit,
- Personen-Modell-Interaktion,
- Personen-Gebäude-Interaktion,
- Personenverhalten,
- Personenbewegung,
- Branddaten,
- geometrische Daten,
- Visualisierung des Evakuierungsprozesses und
- Validierung,

werden die Individualmodelle charakterisiert, indem die den Haupt- und Submerkmalen zugrunde liegenden Modellansätze und Modellfunktionen beschrieben und bewertet werden.

Tabelle 40 verdeutlicht die Leistungsfähigkeit der Individualmodelle in Abhängigkeit ihres Netztyps, also für Modelle mit

- groben Netzwerken,
- feinen Netzwerken und
- kontinuierlichen Räumen.

Individualmodelle		
Hauptmerkmale (Modellansatz/Funktion)	**Submerkmale**	**Beschreibung**
Modellierungs-methode	Bewegungsmodelle	Modelle, welche die Personenbewegung berechnen.
	Partielle Verhaltens-modelle	Modelle, die primär die Personenbewegung berechnen und in eingeschränkter Weise das Personenverhalten zu berücksichtigen versuchen (z.B. das Reaktionsverhalten).
	Verhaltensmodelle	Modelle, die Personen als Individuen erfassen, die sich bewegen, auf einen Katalog von Ereignissen reagieren und Handlungen ausführen.
	Sozialpsychologische Modelle	Modelle, welche die Eigenschaften der Verhaltensmodelle aufweisen und zusätzlich den Personen ihr Verhalten mitbestimmende sozialpsychologische Charaktereigenschaften zuweisen.
Netzfeinheit	Grobes Netzwerk	Der Grundriss wird in diskrete geometrische Teilflächen (Räume, Korridore, Treppen etc.) unterteilt, die zugleich die (groben) Zellen bilden, zwischen denen sich die Personen bewegen. Damit lassen sich ausschliesslich die Bewegungen von Personengruppen oder -massen berechnen.
	Feines Netzwerk	Der Grundriss wird mithilfe eines Netzwerkes aus Zellen abgebildet, das neben der Gebäudegeometrie und sämtlichen Wegelementen auch Hindernisse und Verengungen sowie die Personen als Individuen erfasst. Die Zellengrösse entspricht etwa dem Platzbedarf einer Person (0.4 m x 0.4 m bis 0.5 m x 0.5 m).
	Kontinuierlicher Raum	Die Gebäudegeometrie wird mithilfe eines Netzwerkes aus sehr kleinen Zellen dreidimensional abgebildet. Die Funktionalität entspricht derjenigen der Modelle mit feinen Netzwerken. Die Zellenabmessungen liegen im mm-Bereich, womit sich Hindernisse (wie Säulen, Schranken, Einrichtungsgegenstände etc.) jedoch exakter erfassen lassen und komplexere Verhaltensformen modellierbar sind.
Personen-Modell-Interaktion	Global	Sämtliche Personen werden als eine homogene Gruppe aufgefasst, der durchschnittliche Eigenschaften zugewiesen wird. Die Bewegung der Personen wird als diejenige einer homogenen Personengruppe aufgezeichnet.
	Individuell	Jeder Person (oder Personengruppe) lassen sich individuelle Eigenschaften zuweisen, welche die Basis für die Bewegung und den Entscheidungsfindungsprozess bilden.
Personen-Gebäude-Interaktion	Global	Jede Person wählt, aufgrund von allumfassenden Kenntnissen über das Gebäude und die Begehbarkeit der Flucht- und Rettungswege, zu jeder Zeit automatisch die für sie beste Fluchtmöglichkeit.
	Individuell	Die Personen besitzen begrenzte und individuell ausgeprägte Kenntnisse über das Gebäude und die Begehbarkeit der Flucht- und Rettungswege. Sie treffen die Flucht- und Rettungswegwahl aufgrund von Erfahrungen oder Informationsbeschaffungen.
Personenverhalten	Kein Verhalten	Es wird nur die Personenbewegung simuliert.
	Implizites Verhalten	Gewisses Personenverhalten ist in den Regeln und Gleichungen, welche die Personenbewegungen beschreiben, implizit enthalten.

Tab. 39: Individualmodelle

Individualmodelle		
Hauptmerkmale (Modellansatz/Funktion)	**Submerkmale**	**Beschreibung**
Personenverhalten	Konditionales/regelbasiertes Verhalten	Verhaltenseigenschaften von Individuen werden explizit berücksichtigt, indem für die Entscheidungsfindung Regeln aufgestellt werden. Individuell zugewiesene Handlungsweisen können durch die Bedingungen während der Evakuierung beeinflusst werden (sogenanntes „Wenn, dann“-Verhalten).
	Probabilistisches Verhalten	Konditionale bzw. regelbasierte Verhaltensweisen werden mit Modellen der Wahrscheinlichkeitstheorie kombiniert.
	Künstliche Intelligenz	Konditionale bzw. regelbasierte Verhaltensweisen werden mit Modellen der künstlichen Intelligenz kombiniert.
Personenbewegung	Dichtebezogen	Auf der Basis von Dichten erhalten Personen oder Personengruppen (Strömungs-)Geschwindigkeiten zugewiesen.
	Benutzerdefiniert	Der Programmbenutzer definiert die Werte für Geschwindigkeiten, Flüsse und Dichten.
	Personenabstand	Jede Person ist von einer „Blase“ umgeben, sodass zu anderen Individuen, zu Gebäudeteilen und Hindernissen eine minimale Distanz eingehalten wird.
	Potenzial	Jeder Zelle des Netzwerkes wird ein Potenzial zugeordnet, sodass die Personen – dem abnehmenden Potenzial entsprechend – in bestimmte Richtungen gelenkt werden. Damit kann der Benutzer die Attraktivität jedes einzelnen Flucht- und Rettungsweges verändern.
	Zellenbelegung	Personen bewegen sich nicht zu Zellen, die bereits von einem anderen Individuum belegt sind.
	Konditionale Bewegung	Die Personenbewegung steht in Abhängigkeit zu baulichen Randbedingungen, zur Evakuierungssituation, zur Bedrohungslage etc.
	Funktionelle Analogie	Die Personenbewegung folgt in Analogie zur Strömung von Flüssigkeiten (Gesetze der Strömungsmechanik) oder in Analogie zu magnetischen Partikeln in einem Magnetfeld (Coulombsches Gesetz). Solche Modelle eignen sich für Evakuierungssituationen mit einfachen geometrischen Randbedingungen, bei denen grosse, homogene Menschenansammlungen involviert sind.
	Submodell	Die Bewegung der Personen wird durch ein separates Modell berechnet, das mit dem Evakuierungsmodell verknüpft ist.
	Wissensaneignung	Die Steuerung der Bewegungen erfolgt ausschliesslich aufgrund von Wissen, das während der Evakuierung von den Personen erworben wird.
	Ungehinderter Fluss	Es wird nur die ungehinderte Bewegung der Personen berechnet. Zeitverzögerungen und -gewinne werden separat ermittelt und in der Evakuierungszeit berücksichtigt.
	Zelluläre Automaten	Die Personen bewegen sich innerhalb eines Netzes von Zelle zu Zelle. Die Personenbewegung folgt den Gesetzmässigkeiten eines gewichteten Würfels.

Tab. 39: Individualmodelle

Individualmodelle		
Hauptmerkmale (Modellansatz/Funktion)	**Submerkmale**	**Beschreibung**
Branddaten	Datenimport	Die Branddaten werden von einem externen Brandsimulationsmodell importiert.
	Benutzerdefiniert	Zu bestimmten Evakuierungszeiten werden vom Benutzer spezifische Branddaten eingegeben.
	Brandsimulationsmodell	Im Evakuierungsmodell ist ein eigenes, simultan rechnendes Brandsimulationsmodell implementiert.
	Evakuierungsübungs-Modus	Das Evakuierungsmodell lässt die Berücksichtigung von Branddaten nicht zu.
Geometrische Daten	Import von CAD-Daten möglich	
	Import von CAD-Daten unmöglich	
Visualisierung des Evakuierungsprozesses	Zweidimensional	
	Dreidimensional	
Validierung	Normen basiert	Die von einem Evakuierungsmodell produzierten Ergebnisse werden mit normativen Anforderungen verglichen.
	Evakuierungsübungen/-experimente	Die Simulationsergebnisse werden mit realen Evakuierungsübungen und Personenstrom-Experimenten verglichen.
	Literaturangaben	Für die Validierung werden Literaturdaten von bereits durchgeführten Evakuierungsübungen herangezogen.
	Vergleich mit anderen Modellen	Die Ergebnisse eines Evakuierungsmodells werden mit denjenigen eines anderen Modells verglichen.
	Drittpersonen-Validierung	Die Simulationsergebnisse werden von einer unabhängigen fachkundigen Drittperson beurteilt.

Tab. 39: Individualmodelle

Legende zu Tabelle 40

X: erfüllt

(X): teilweise erfüllt

O: nicht erfüllt

Erläuterungen zu Tabelle 40

[1] Persönlichkeitseigenschaften beeinflussen die individuelle Bewegung und Entscheidungsfindung.

[2] Als statische Hindernisse gelten: Möbel, Säulen, Verengungen, Vereinzelungsanlagen, Barrieren, (verletzte) Personen etc. Dynamische Hindernisse sind beispielsweise sich bewegende Personen.

[3] Die Berücksichtigung von Bewegungsrichtungen umfasst beispielsweise die Wahl von geeigneten Flucht- und Rettungswegen, die Umgehung von Hindernissen und die Verhinderung von Kollisionen mit Personen.

[4] Als Wegelemente sind zu verstehen: Räume, Korridore, Treppen etc.

[5] Modelle mit grobem Netzwerk fokussieren Personenmassen und beschreiben deren Bewegung als Strom. Bei Modellen mit feinem Netzwerk oder kontinuierlichem Raum wird der Personenstrom, bezogen auf einen Referenzquerschnitt, errechnet.

Leistungsfähigkeit von Individualmodellen																		
Funktion / **Netztyp**	Bewegung von Personenmassen	Bewegung von Einzelpersonen/Gruppen	Ermittlung der max./min. Evakuierungszeit	Ermittlung von individuellen Evakuierungszeiten	Eigenschaften von Personenmassen	Persönlichkeitseigenschaften [1]	Entscheidungsfindung	Personenverhalten	Gebäudekenntnisse/Lernfähigkeit	Berücksichtigung von statischen und dynamischen Hindernissen [2]	Berücksichtigung von Bewegungsrichtungen [3]	Identifizierung von Stausituationen	2D-Visualisierung der Simulation	3D-Visualisierung der Simulation	Durchschnittliche Gehgeschwindigkeit als Funktion des Wegelementes [4]	Beschreibung der mittleren Gehgeschwindigkeit und Dichte mithilfe einer funktionellen Analogie	Beschreibung der individuellen Gehgeschwindigkeit als Funktion der lokalen Personendichte	Darstellung von spezifischen Personenströmen [5]
Grobes Netzwerk	X	O	X	O	X	O	O	O	O	O	O	O	O	O	X	X	O	X
Feines Netzwerk	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	(X)	X	O	X	(X)
Kontinuierlicher Raum	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	O	X	(X)

Tab. 40: Leistungsfähigkeit von Individualmodellen

7.5 Eingabedaten für Individualmodelle

Individualmodelle erfordern, um nur einige zu nennen, die Eingabedaten nach Tabelle 41.

Es ist zu beachten, dass die aus der Literatur gewonnenen Eingabedaten auf empirischen Untersuchungen basieren, die in der Regel unter „normalen“ Bedingungen durchgeführt wurden, denn für Personenstrommessungen ist es unmöglich, tatsächliche Gefahrenbedingungen zu schaffen.

Grundsätzlich ist bei Evakuierungsmodellen, die Personenverhalten simulieren, das Verständnis

- um die Regeln, Gleichungen und Algorithmen für den Entscheidungsfindungsprozess und für die Beschreibung der Zusammenhänge zwischen den individuellen Verhaltenseigenschaften und der individuellen Entscheidungsfindung

  und

- um den Einfluss dieser Regeln, Gleichungen und Algorithmen auf die Geschwindigkeit und Richtung der individuellen Personenbewegung

wichtig, weil hierdurch die gesamte Evakuierungszeit entscheidend beeinflusst wird.

Eingabedaten für Individualmodelle	
Parameter	**Merkmale**
Physikalische Parameter	Alter Geschlecht Gewicht Agilität Bewegungsgeschwindigkeit
Beweglichkeit	Gelände (Treppen, freie Flächen etc.) Charakteristiken der Gebäudenutzer
Lokale Verhaltensweise	Reaktionsdauer Kreuzen Überholen Richtungsänderung Ausweichen Beeinflussung (durch Sicherheitspersonal, Hilfskräfte)
Globale Verhaltensweise	Bevorzugung von bekannten Ausgängen (Haupteingang) Bewegung zum nächsten Ausgang

Tab. 41: Eingabedaten für Individualmodelle

8 Qualitätssicherung

Zu den wichtigsten Qualitätssicherungsmassnahmen zählen die folgenden Tätigkeiten:

- die Überprüfung der Plausibilität und Schlüssigkeit von Ergebnissen,
- die Bewertung von Unsicherheiten und Fehlern,
- die Bewertung der verwendeten Simulationsmodelle,
- die Einführung von Sicherheitsfaktoren und Sicherheitszuschlägen.

8.1 Überprüfung der Plausibilität und Schlüssigkeit von Ergebnissen

Mit Plausibilitätschecks der wesentlichen Merkmale einer Berechnung können fehlerhafte Dateneingaben oder die Überschreitung der mit dem Rechenmodell einhergehenden Anwendungsgrenzen erkannt werden. Damit kann vom Anwender der Nachweis erbracht werden, dass die Simulationssoftware mit den gewählten Anfangs- und Randbedingungen für den zu analysierenden Problemfall geeignet ist und die Rechenergebnisse vertrauenswürdig und belastbar sind.

Ein Plausibilitäts- und Schlüssigkeitscheck kann beispielsweise die Überprüfung

- der Übereinstimmung der die Gebäudenutzung und den Brand betreffenden Einflussgrössen der Bemessungsbrandszenarien mit der Nutzungsbeschreibung;
- der Übereinstimmung der das Gebäude und die Gebäudenutzung betreffenden Einflussgrössen der Bemessungsbrandszenarien mit den Rand- und Anfangsbedingungen;
- der korrekten Beschreibung der festgestellten Brandlasten hinsichtlich ihrer Stoffdaten;
- der Bewertung von Unsicherheiten und Fehlern;
- der Temperaturverteilungen auf unrealistische Werte;
- der Übereinstimmung der zeitlichen Entwicklung der Temperaturwerte, Rauchgasschicht und Massenströme mit dem zeitlichen Verlauf des Brandes;
- der Schichtungsstabilität, d.h. der Temperaturdifferenz
  - zwischen der mittleren Rauchgastemperatur und der Umgebungstemperatur sowie
  - zwischen der unteren raucharmen Schicht und der oberen Rauchgasschicht

  bei mit Zonenmodellen generierten Ergebnissen;
- des Modells auf nachvollziehbares, glaubwürdiges Verhalten bei sich ändernden Eingangsdaten

beinhalten.

8.2 Bewertung von Unsicherheiten und Fehlern

8.2.1 Quellen von Unsicherheiten und Fehlern

Die hauptsächlichen Quellen von Unsicherheiten und Fehlern in der ingenieurmässigen Brandschutzplanung sind:

- die Modellansätze mit ihren vereinfachenden Annahmen und Anwendungsgrenzen,
- Modelle mit hohem Parameterbedarf (z.B. numerische Evakuierungsmodelle),
- die Ungenauigkeiten bei der Transformation des physikalischen Raumes in den Simulationsraum (Modellierung),
- die Streuung von brandphysikalischen Daten (z.B. Baustoffe, Brandlast, Brandleistung, Brandgrösse, Brandausbreitungsgeschwindigkeit, Schadstoffmassenstrom),
- unbekannte Versuchsbedingungen von empirisch gewonnenen Daten,
- unbekannte oder nicht erfassbare thermodynamische und strömungsmechanische Effekte (z.B. Wärmestrahlung, Turbulenz),
- die wirklichkeitsfremde Wahl des Bemessungsbrandszenariums,
- unrealistische Risikowahrnehmung,
- falsch begrenzte Wertebereiche (z.B. Kriterium für die Flashover-Temperatur),
- die Charakteristik der sich im Gebäude befindenden Population,
- das Verhalten der Personen im Brandfall,
- alle im Zuge der leistungsorientierten Brandschutzplanung getroffenen Annahmen.

8.2.2 Methoden zur Analyse von Unsicherheiten und Fehlern

Werden in numerischen Operationen und Modellen die Auswirkungen von Unsicherheiten und Fehlern untersucht, so interessieren primär die Fragen nach

- der Quantifizierung der Unsicherheiten, die den von numerischen Operationen und Modellen produzierten Output-Variablen anhaften, als Folge von Unsicherheiten in den Input-Variablen (was Verarbeitungsfehler als Wirkung der Quellenfehler ergibt);
- der Quantifizierung des Einflusses der einzelnen Input-Variablen auf die Output-Variablen (was die Beitragsstärke einer Input-Variablen an den Unsicherheiten der Output-Variablen ergibt).

Die erste Frage lässt sich mit einer Unsicherheitsanalyse – auch Fehlerfortpflanzung genannt – klären, die zweite mit einer Sensitivitätsanalyse.

Die durch Unsicherheiten und Fehler erzeugten Effekte sollten zumindest qualitativ, besser jedoch quantitativ verstanden werden. Für die quantitative Analyse eignen sich unter anderem die folgenden Methoden:

- Sensitivitätsanalyse,
- Parameteranalyse,

- Bewertung der proportionalen oder exponentiellen Abhängigkeit,
- Fehlerschätzung. [65], S. 27-31; *[167]*

Sensitivitätsanalyse

Im Rahmen von Sensitivitätsanalysen wird analysiert, wie sich bei einem Rechenmodell Änderungen im Eingabedatensatz auf die vom Modell produzierten Ergebnisse auswirken. Damit lassen sich diejenigen Parameter des Eingabedatensatzes identifizieren, welche die Ergebnisse am meisten beeinflussen und somit am meisten zur Modellunsicherheit beitragen können. Die Sensitivitätsanalyse zeigt also, welche Parameter sich für eine Optimierung eignen und bei denen Vorsicht bei der Schätzung ihrer Werte geboten ist.

Im Allgemeinen lässt sich mit der Durchführung einer Sensitivitätsanalyse das Verhalten eines Rechenmodells besser verstehen. [65], S. 27-28

Parameteranalyse

Bei Parameteranalysen wird untersucht, wie sich bei einem Rechenmodell die systematische Änderung der Werte einer bestimmten Eingabevariablen auf die vom Modell produzierten Ergebnisse auswirkt. Dabei werden alle anderen Eingabevariablen konstant gehalten. Die Parameteranalyse ist eine spezielle Form der Sensitivitätsanalyse. [65], S. 28

Bewertung der proportionalen oder exponentiellen Abhängigkeit

Bei der Bewertung der proportionalen oder exponentiellen Abhängigkeit wird die numerische Beziehung zwischen den vom Modell produzierten Ergebnissen und den Eingangsdaten überprüft. Damit lässt sich unter anderem die relative Wichtigkeit einer Eingabevariablen ermitteln. (Beispiel: Nach McCaffrey, Quintiere, Harkleroad steigt bei einem Raumbrand die Temperatur der Rauchgasschicht mit einer 2/3-Potenz der Brandleistung an. Eine Unsicherheit von 15 % bei der Brandleistung führt demnach zu einer Unsicherheit von 2/3 × 15 % = 10 % bei der Rauchgasschichttemperatur.) [65], S. 31

Fehlerschätzung für komplexe Modelle (stochastische Verfahren)

Auf komplexere Operationen und Modelle sind die analytischen Verfahren der einfachen Fehlertheorie nicht mehr anwendbar. Stattdessen müssen die möglichen Auswirkungen von Input-Fehlern simuliert werden, indem für die Fehler eine Wahrscheinlichkeitsverteilung modelliert wird. Mittels zahlreicher Rechenläufe entstehen für die Output-Variablen simulierte Verteilungen. Für solche Analysen wird die Monte-Carlo-Methode am häufigsten eingesetzt.

8.3 Bewertung von Simulationsmodellen

Methodik

Die Bewertung von Simulationsmodellen lässt sich in die folgenden drei Schritte unterteilen (vgl. Abbildung. 118):

- Modellqualifizierung,
- Modellverifizierung,
- Modellvalidierung. *[168] [169] [170]*

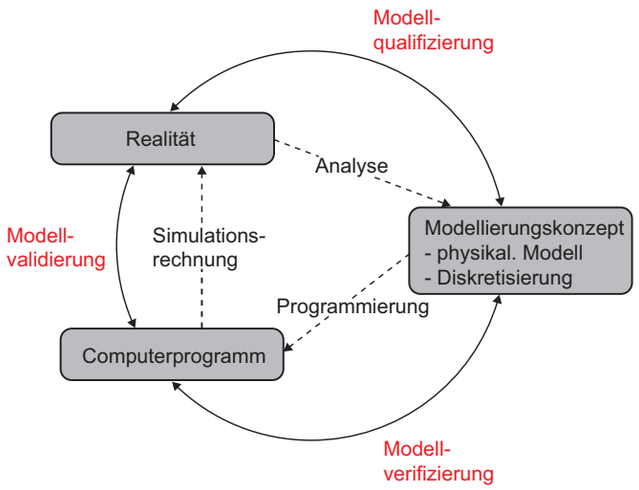


Abb. 118: Qualifizierungs-, Verifizierungs- und Validierungs-Prozess nach Schlesinger

Der Entstehungsprozess, der aus Modellen Computerprogramme generiert, wird im Anhang erläutert.

Modellqualifizierung

Ein Modell ist qualifiziert, wenn die für die Beschreibung der realen Fragestellung notwendigen Prozesse und Phänomene im Modell ausreichend berücksichtigt sind. Die Klärung der Qualifikation setzt somit voraus, dass

- die physikalischen und mathematischen Grundlagen des Modells hinreichend dokumentiert sind,
- der Anwender in der Lage ist zu entscheiden, ob die dargestellten Modelleigenschaften zur Beantwortung der jeweiligen Fragestellung ausreichen.

Die Qualifizierung überprüft also die Eignung des im Programm enthaltenen Modellierungskonzepts hinsichtlich des zu analysierenden Problems.

Modellverifizierung

Die Verifizierung untersucht, ob das Programm, das durch die Diskretisierung, Programmierung und Kompilierung aus dem Modell entstanden ist, dieses auch korrekt repräsentiert. Hierbei werden Vergleiche mit analytischen (exakten) und besonders qualifizierten numerischen Lösungen angestellt, womit sowohl die mathematisch-physikalischen als auch die verwendeten numerischen Verfahren auf dem Prüfstand stehen. Im Wesentlichen wird geklärt, ob das Modellierungskonzept technisch korrekt in das Rechenprogramm umgesetzt wurde und ob die Gleichungen richtig gelöst werden.

Modellvalidierung

Die Validierung umfasst den Vergleich der vom Rechenprogramm produzierten Ergebnisse mit Referenzdaten, die aus Experimenten oder anderen numerischen Rechnungen gewonnen werden. Hiermit wird überprüft, ob das Computerprogramm realistische Lösungen liefert und ein reales Brandereignis zu simulieren vermag. Die Validierung untersteht einem fortwährenden Prozess, bei dem man sich der Anwendbarkeit auf unterschiedliche Problemstellungen vergewissert oder Fehlerbandbreiten und Schwachstellen bei der Anwendung erfasst. Für eine erfolgreiche Validierung sind

- die Beschreibung der physikalischen und methodischen Grundlagen des Berechnungsverfahrens,
- eine genaue Dokumentation und Beschreibung der Brandversuche und
- vertiefte Kenntnisse über Modellierungsverfahren und Versuchsmesstechnik

grundlegende Voraussetzungen.

Verantwortlichkeit

Die Softwareentwickler und -lieferanten können hinsichtlich der Modellqualifizierung, -verifikation und -validierung nur für vom Anwender nicht veränderbare Programme eine Garantieerklärung abgeben.

Bei Open-Source-Programmen, wie z.B. dem Fire Dynamic Simulator (FDS), lehnt der Softwareentwickler jegliche Verantwortung ab. Entsprechende Haftungsausschlüsse sind in den Handbüchern zu finden. Folglich ist der Anwender in solchen Fällen verpflichtet, sich selbst der Modellqualifizierung, -verifikation und -validierung anzunehmen und den Nachweis über die Gebrauchstauglichkeit des Computerprogramms für das zu analysierende Problem zu erbringen. Diesbezüglich sei auf die Ausführungen des Anhangs verwiesen.

Grundsätzlich lässt sich nur mit Kenntnis des zu untersuchenden Problems und der Anwendungsbedingungen – wie Rechenleistung, Umfang und Genauigkeit der Eingabedaten – die Eignung der in einem Simulationsprogramm implementierten Funktionalitäten, Annahmen, Näherungen, Anfangs- und Randbedingungen bewerten. Folglich kann es nur in der Verantwortung des Anwenders liegen, das für seinen Problemfall geeignete Simulationsprogramm zu wählen bzw. innerhalb eines solchen Programms, eine geeignete Auswahl der verfügbaren Programmmodule festzulegen. [124], S. 260

8.4 Sicherheitsfaktoren, Sicherheitszuschläge

Bei ingenieurtechnischen Bewertungen bezweckt die Einführung von Sicherheitsfaktoren oder Sicherheitszuschlägen den Nachweis von auf der sicheren Seite liegenden Ergebnissen.

Der Sicherheitsfaktor gibt an, um welchen Faktor sich ein bestimmter Wert einer auf der sicheren Seite liegenden Brandschutzplanung von demjenigen einer sich gerade noch als zulässig errechneten Planung unterscheidet. Entsprechend bildet der Sicherheitszuschlag die Differenz zwischen einem gewissen Wert einer auf der sicheren Seite liegenden Brandschutzplanung und demjenigen einer als kritisch errechneten Planung. Einmal eingeführt, sollten beide dokumentiert und im Schlussbericht explizit erwähnt werden.

Im Rahmen des Simulationsprozesses lassen sich Sicherheitsfaktoren oder Sicherheitszuschläge bilden bei

- den Eingangsdaten, wie z.B. durch eine auf der sicheren Seite liegende Festlegung der bemessenden Szenarien und/oder Anfangs- und Randbedingungen;
- den Zwischenergebnissen;
- den Endergebnissen, wie z.B. durch eine konservative Festlegung der verfügbaren oder erforderlichen Evakuierungsdauer. [65], S. 27

Weil die Beziehung zwischen den Eingangsdaten oder Zwischenergebnissen und den Endergebnissen nicht linear ist, ist das erzielte Sicherheitsniveau bei mit Sicherheitsreserven versehenen Eingangsdaten und Zwischenergebnissen schwer abschätzbar. Hingegen ist bei mit Sicherheitsreserven belegten Endergebnissen der realisierte Sicherheitslevel offensichtlich, die damit einhergehende Beeinflussung der Brandschutzplanung, wegen der fehlenden Nichtlinearität zwischen den Eingangsdaten und den Endergebnissen, aber kaum nachprüfbar.

Sicherheitsfaktoren oder Sicherheitszuschläge sollen bewusst an signifikanten Stellen eingeführt werden, denn die unbesehene Kumulation von Sicherheiten kann zu unwirtschaftlichen Lösungen führen. Dies erfordert ein gewisses Mass an Expertenwissen. *[167]*

8.5 Kriterienkataloge zur Überprüfung der Qualität von Berechnungen

Die nachfolgenden Kriterienkataloge beinhalten – ohne den Anspruch auf Vollständigkeit zu erheben – eine Sammlung von Parametern mit den dazugehörenden Richtwerten, anhand deren sich die wesentlichen Schritte einer brandschutztechnischen Berechnung überprüfen lassen.

Tabelle 42 zeigt mögliche Kriterien zur Überprüfung der Qualität von Brandsicherheitsberechnungen, Tabelle 43 solche zur Überprüfung der Qualität von Personensicherheitsberechnungen.

Legende zu Tabelle 42

X: relevant

(X): bedingt relevant

O: nicht relevant

Erläuterungen zu Tabelle 42

[1)] Fallspezifisch können andere oder differenziertere Werte massgebend sein!

[2)] Weil auf dem diskreten Netz die physikalischen Grössen nur auf den Knoten definiert sind, kann der Kurvenverlauf (Funktion) der Grössen zwischen diesen Knoten nur approximiert werden. Je komplizierter der Kurvenverlauf ist, desto mehr Stützstellen sind für eine gute Repräsentation erforderlich. So sind für die approximierte Darstellung einer Sinusfunktion pro Periode mindestens 5 Punkte notwendig. Davon ausgenommen sind dynamisch adaptive Verfahren, die während der Rechnung, anhand geeignet gewählter Kriterien, lokale Netzverfeinerungen vornehmen. [124], S. 281-282

[3)] Falls an vertikalen und horizontalen Öffnungen das Gitter nicht angemessen klein gewählt wird, kann die Kontraktion alternativ durch einen Strömungsbeiwert berücksichtigt werden.

[4)] Die Struktur des Gleichungssystems gewisser CFD-Programme für Brand- und Rauchsimulationen (z.B. FDS) setzen kleine Mach-Zahlen bzw. kleine Strömungsgeschwindigkeiten voraus (Mach-Zahl = Strömungsgeschwindigkeit/ Schallgeschwindigkeit in Luft; Schallgeschwindigkeit der

Kriterienkatalog zur Überprüfung der Qualität von Brandsicherheitsberechnungen

Kriterium		Richtwert mit Einheit [1]	Zonenmodell	Feldmodell	i.O./n.i.O. Ja/Nein	Bericht Seite
Objektmodellierung	Maximales Längen-Breiten- bzw. Längen-Höhen-Verhältnis der virtuellen Räume	≤ 10	X	O		
	Sind die Stellen lokaler Netzverfeinerungen mit den Zonen hoher Strömungsfeld-Gradienten deckungsgleich?		O	X		
	Wird die Netzfeinheit den numerischen Anforderungen der gewählten Submodelle (z.B. Turbulenzmodell, Strahlungsmodell) gerecht?		O	X		
	Netzwinkel (= Winkel zwischen Gitterlinien)	20°-160°	O	X		
	Expansionsrate des Netzes (Grössenverhältnis benachbarter Netzelemente)	≤ 1.5	O	X		
	Längen-Breiten- bzw. Längen-Höhen-Verhältnis der Netzelemente (Aspect Ratio) in Zonen mit hohen Strömungsfeld-Gradienten		O	X		
	Längen-Breiten- bzw. Längen-Höhen-Verhältnis der Netzelemente (Aspect Ratio) in Zonen mit kleinen Strömungsfeld-Gradienten		O	X		
	Maximale Kantenlänge der Netzelemente in nicht strömungstechnisch relevanten Bereichen	≤ 0.50 m	O	X		
	Kantenlänge der Netzelemente im Bereich der Konvektionsströmung oberhalb der Brandquelle	≤ 0.15 m	O	X		
	Anzahl Knoten auf Kantenlängen von strömungsrelevanten Geometrien [2]	≥ 5	O	X		
	Anzahl Knoten auf den kurzen Achsen von vertikalen und horizontalen Öffnungen	≥ 8	O	X		
	Strömungsbeiwert zur Berücksichtigung der Kontraktion an vertikalen und horizontalen Öffnungen	0.7	X	(X) [3]		
	Anzahl Knoten zur Abbildung der Höhe von Galerien	≥ 10	O	X		
Modell	Temperaturdifferenz zwischen oberer Rauchgasschicht und unterer raucharmer Luftschicht	$\Delta\vartheta \geq 1$ K	X	O		
	Boussinesq-Approximation	$\Delta\vartheta \leq 30$ K	O	X		
	LES-Turbulenzmodell: Netzelement-Kantenlänge in strömungstechnisch relevanten Bereichen	≤ 0.10 m	O	X		
	Mach-Zahl [4]	< 0.1	O	X		
	Maximale Temperatur in Nähe der Flamme	≥ 800 °C	X	X		

Tab. 42: Kriterienkatalog zur Überprüfung der Qualität von Brandsicherheitsberechnungen

Kriterienkatalog zur Überprüfung der Qualität von Brandsicherheitsberechnungen

Kriterium		Richtwert mit Einheit [1]	Zonenmodell	Feldmodell	i.O./n.i.O. Ja/Nein	Bericht Seite
Modell	Ist die Massenbilanz ausgeglichen?		X	X		
	Ist die Energiebilanz ausgeglichen?		X	X		
	Liegen die errechneten Temperaturwerte im vorhergesagten Wertebereich?		X	X		
	Liegen die errechneten Druckwerte im vorhergesagten Wertebereich?		X	X		
	Liegen die errechneten Werte für die Strömungsgeschwindigkeit im vorhergesagten Wertebereich?		O	X		
Numerik	Zeitschrittweite zu Simulationsbeginn bei Verwendung von Zweigleichungs-Turbulenzmodellen [5]	≤ 0.1 s	O	X		
	Zeitschrittweite zu Simulationsbeginn bei Verwendung von Mehrgleichungs-Turbulenzmodellen [5]	<< 0.1 s	O	X		
	Ordnungsgrad der Zeitdiskretisierung [6]	≥ 2	X	X		
	Ordnungsgrad der Ortsdiskretisierung [6]	≥ 2	O	X		
	Konvergenzkriterium Massenerhaltung		X	X		
	Konvergenzkriterium Energie		X	X		
	Konvergenzkriterium Strahlung		O	X		
	Konvergenzkriterium Strömungsgeschwindigkeit		O	X		
	Konvergenzkriterium Turbulenz		O	X		
	Konvergenzkriterium Partikeltransport		O	X		
	Sind die physikalischen Grössen (z.B. Strömungsgeschwindigkeit) an den Stellen von Gitterkopplungen konsistent?		O	X		

Tab. 42: Kriterienkatalog zur Überprüfung der Qualität von Brandsicherheitsberechnungen

Luft ≈ 330 m/s). [124], S. 262-269

[5] Die Zeitschrittweite ist umso kleiner zu wählen, je höher der Feinheitsgrad des Netzes bzw. je kleiner die Netzelemente festgelegt werden. [64], S. 43

[6] Der Ordnungsgrad des Verfahrens steht für die Grössenordnung des Diskretisierungsfehlers bzw. Abbruchfehlers bei der Taylorreihenentwicklung und ist ein Qualitätsmerkmal. Werden Terme höherer Ordnung (Ableitung) nicht berücksichtigt, so hat dies unmittelbare Auswirkungen auf die Wiedergabe des modellierten physikalischen Prozesses, denn die erste Ableitung repräsentiert die Steigung, die zweite das Krümmungsverhalten der Funktion. Wird das Krümmungsverhalten (2. Ordnung) nicht berücksichtigt, sind unter Umständen wesentliche physikalische Eigenschaften nicht darstellbar. [124], S. 275-280

Kriterienkatalog zur Überprüfung der Qualität von Personensicherheitsberechnungen

Kriterium	Richtwert mit Einheit [1]	Hydraulische Modelle	Individual-modelle	i.O./n.i.O. Ja/Nein	Bericht Seite
Besteht der Personenstrom aus verschiedenartigen Personen?		O	X		
Seitenlänge der Netzelemente	≤ Personenabmessung	O	X		
Gehgeschwindigkeit unter Rauchbelastung	$v_{Lauf} = 0.67 \cdot \ln(S) - 1.17$ [2]	X	X		
Nachprüfung mit hydraulischen Modellen		O	X		
Sensitivitätsanalyse mit Reaktionsdauern • schnelle Evakuierung: t_{Reakt} = 0 min • zügige Evakuierung: t_{Reakt} = 0-30 min • langsame Evakuierung: t_{Reakt} > 30 min		O	X		
Anzahl Simulationsdurchläufe pro Szenarium	≥ 10		X		
Personenstau-Identifikation	$t_{4P/m2} > 0.1 \cdot t_{erf.\ Evak}$ [3]	(X)	X		
Zeitschrittweite der Simulation	≤ 0.1 s	O	X		

Tab. 43: Kriterienkatalog zur Überprüfung der Qualität von Personensicherheitsberechnungen

Legende zu Tabelle 43

X: relevant

(X): bedingt relevant

O: nicht relevant

Erläuterungen zu Tabelle 43

[1] Fallspezifisch können andere oder differenziertere Werte massgebend sein!

[2] Diese Gleichung gilt für die folgenden Erkennungsweiten: 8 m ≤ S ≤ 25 m. In rauchbelasteten Flucht- und Rettungswegen sollten die mit dem Evakuierungsmodell berechneten Gehgeschwindigkeiten nicht grösser sein als diejenigen, die mit vorstehender Gleichung ermittelt werden. [128], S. 174; zitiert nach [171]

[3] Ein signifikanter Personenstau liegt vor, wenn eine lokale Dichte von mehr als 4 Personen pro m² während einer Zeitdauer ($t_{>4P/m2}$) von länger als 10 % der Evakuierungsdauer ($0.1 \cdot t_{erf.\ Evak}$) auftritt. [153], S. 9

9 Dokumentation

9.1 Allgemeines

Im Wesentlichen sollte die Dokumentation die Arbeitsergebnisse eines jeden in Kapitel 1.10 aufgeführten Prozessschrittes beschreiben.

Eine sorgfältige Dokumentierung der Prozessschritte

- fördert unter den Projektbeteiligten die Verständigung,
- begünstigt die Akzeptanz von Planungsergebnissen,
- bietet dem Fachingenieur oder Unternehmer die Basis für seine Planungs- bzw. Installationsarbeiten,
- ist für die Behörde Voraussetzung, um erforderliche Plausibilitätsprüfungen zur Beurteilung der Qualität und Zuverlässigkeit der Ergebnisse und um die Abnahme der brandschutztechnischen Anlagen durchführen zu können,
- vermindert Meinungsverschiedenheiten betreffend Baugenehmigung, Realisierung, Inbetriebnahme und Benutzung des Gebäudes,
- gewährleistet, dass die Brandschutzplanung korrekt umgesetzt wird,
- ermöglicht den Anlageneigentümern bzw. -betreibern die Durchführung von Funktionskontrollen sowie von notwendigen Wartungs- und Instandsetzungsarbeiten zur Gewährleistung der Betriebsbereitschaft von brandschutztechnischen Anlagen,
- erhöht die Wahrscheinlichkeit, dass die Planungsergebnisse während der Lebensdauer (Bau, Betrieb, Erneuerung, Abbruch) des Gebäudes bekannt bleiben und Beachtung finden,
- erleichtert die Planung und Realisierung von zukünftigen baulichen Änderungen.

Die Form – d.h. Gliederung, Umfang, Stil und Erscheinungsbild – der Dokumentation richtet sich grundsätzlich nach den Bedürfnissen der Projektbeteiligten und nach projektspezifischen Besonderheiten. Dennoch sollten Dokumentationen knapp, präzise, vollständig, nachvollziehbar und überprüfbar abgefasst werden und vom allgemeinen Publikum verstanden werden können.

Die Korrektheit und Vollständigkeit des Schlussberichtes sollten von den folgenden Projektbeteiligten mit ihrer Unterschrift bestätigt werden:

- vom Gebäudeeigentümer, -nutzer und/oder -verwalter,
- vom Architekten,
- vom Brandschutzexperten.

Damit sich die Auswirkungen von allfälligen Änderungen während aller Projektphasen zuverlässig beurteilen lassen, sollten die Verfassenden des Berichtes bis zum Ende des Projektes bzw. bis zur Bauabnahme verpflichtet werden.

9.2 Inhalt, Aufbau

Der Schlussbericht über die leistungsorientierte Brandschutzplanung sollte aus den folgenden Teilen bestehen (vgl. Abbildung 1):

- Bericht über die Planungsgrundlagen (Planungsgrundlagenbericht),
- Bericht über die evaluierte und genehmigte Brandschutzplanung (Planungsbericht),
- Brandschutzplänen, Ausführungsplänen und Ausschreibungsunterlagen,
- Dokumentation von Abweichungen,
- Dokumentation von Tests,
- Anleitung über den Gebäudebetrieb und Unterhalt brandschutztechnischer Anlagen.

Der Schlussbericht ist der zuständigen Brandschutzbehörde rechtzeitig zur Genehmigung einzureichen (VKF-BSR 22-03, Ziffer 5, Absatz 3). [4]

Bericht über die Planungsgrundlagen

Der Planungsgrundlagenbericht sollte Annahmen, Gedanken, Herleitungen, Untersuchungsergebnisse, Vereinbarungen, Bewertungen, Parameter und Einflussgrössen betreffend

- Projektrahmen (mit allgemeinen, projektspezifischen Informationen und einer Aufzählung der für das Funktionieren des Brandschutzkonzeptes besonders kritischen betriebs- oder kostenrelevanten Annahmen und Vorgaben; vgl. Kapitel 1.10, Prozessschritt Nr. 1),
- Schutzziele bzw. Schutzinteressen,
- funktionale Schutzziele und Planungsziele,
- Leistungskriterien und brandschutztechnisch relevante Zeiträume,
- Brandszenarien,
- Bemessungsbrandszenarien und
- Grobkonzepte

enthalten. Er dokumentiert die Voranalyse-Phase bzw. die Prozessschritte Nr. 1 bis Nr. 6 (vgl. Kapitel 1.10) und sollte von allen Projektbeteiligten – in zwingender Weise auch von der Brandschutzbehörde – beurteilt und genehmigt werden. Diesbezüglich sei auf VKF-BSN 1-03, Artikel 11, Absatz 2 und auf VKF-BSR 22-03, Ziffer 5, Absatz 1 verwiesen. [3] [4]

Bericht über die evaluierte und genehmigte Brandschutzplanung

Der Planungsbericht dokumentiert die Analyse-Phase bzw. die Prozessschritte Nr. 7 und Nr. 8 (vgl. Kapitel 1.10) und sollte

- das adäquate Berechnungsverfahren mit Wahl
  - der Rechenmethode,
  - des Rechenmodells,
  - des Rechenprogramms,
  - der Ein- und Ausgabedaten,
  - der Sicherheitsfaktoren oder Sicherheitszuschläge;
- die Bewertung der Grobkonzepte anhand der Bemessungsbrandszenarien;
- die Gründe für verworfene Grobkonzepte;
- die gewählten Massnahmen des baulichen, technischen und organisatorischen Brandschutzes;
- die vergleichende Bewertung der Rechenergebnisse bzw. des endgültigen Brandschutzentwurfs mit den Leistungskriterien (Benchmarking);

- die Schlussfolgerungen aus der Interpretation der Rechenergebnisse in Bezug auf die erforderlichen Brandschutzmassnahmen

vollständig, nachvollziehbar und überprüfbar beschreiben.

Wenn der typische Anwendungsbereich eines Berechnungsverfahrens verlassen wird, sollte eine plausible Begründung beigefügt werden.

Brandschutz- und Ausführungspläne, Ausschreibungsunterlagen

Brandschutzpläne, Ausführungspläne und Ausschreibungsunterlagen sollen aufzeigen, wie die Ergebnisse der leistungsorientierten Planung auf der Baustelle umzusetzen sind.

Dokumentation von Abweichungen

Abweichungen von der genehmigten Brandschutzplanung sollten dokumentiert werden, damit

- die Begutachtung und Bewertung der Abweichungen,
- bei Überschreitung vorherbestimmter Toleranzgrenzen eine Neubewertung im Kontext der leistungsorientierten Gesamtplanung,
- eine Aktualisierung der von den Abweichungen beeinflussten Planungsdokumente,
- die Benachrichtigung der Projektbeteiligten, insbesondere des Brandschutzexperten und der Behörde,

gewährleistet sind. Das hierfür benötigte Verfahren sollte vor Baubeginn festgelegt werden.

Dokumentation von Tests

Die Aufzeichnung der Planung und Durchführung von Tests sollten die erfolgreiche Inbetriebnahme und die dauerhafte Betriebsbereitschaft brandschutztechnischer Systeme sicherstellen, indem Verfahrensabläufe, Messtechniken, Prüfkriterien, zu erzielende Ergebnisse, akzeptierte Toleranzen und Kontrollintervalle spezifiziert werden. Dabei sind die Bestimmungen von technischen Richtlinien zu beachten.

Anleitung über den Gebäudebetrieb und Unterhalt brandschutztechnischer Anlagen

Diese Anleitung dokumentiert die den Gebäudebetrieb und den Unterhalt brandschutztechnischer Anlagen betreffenden Anforderungen und sollte

- sicherstellen, dass die brandschutztechnischen Bauteile und Anlagen wie geplant funktionieren;
- die Schnittstellen und die wechselseitige Beeinflussung verschiedenartiger Anlagen und Anlagenteile beschreiben;
- den Ablauf, die Periodizität und die akzeptierbaren Ergebnisse
  - von wiederkehrenden Kontrollen sowie
  - von individuellen und integralen Tests

  brandschutztechnischer Bauteile und Anlagen festlegen;
- den Gebäudeeigentümer und -betreiber
  - auf Randbedingungen, wie z.B. Begrenzung von Brandlasten und Lagerhöhen,
  - auf betriebliche Einschränkungen, wie z.B. Begrenzung der Personenbelegung und der Nutzungsmöglichkeiten, und
  - auf Vorsichtsmassnahmen bei Renovationen, wie z.B. bei Vorhandensein von dämmschichtbildenden Brandschutzanstrichen

  hinweisen;
- einen Unterhaltsplan für die wichtigsten brandschutztechnischen Bauteile und Anlagen enthalten;
- eine Handlungsanweisung liefern, wie bauliche, die Brandschutzplanung tangierende Änderungen zu bewerten und zu dokumentieren sind.

9.3 Darstellungen

Brand- und Evakuierungsszenarien

Für die zweckmässige Darstellung der mit Rechenverfahren zu untersuchenden Brand- und/oder Evakuierungsszenarien bietet sich prinzipiell die tabellarische Form an (vgl. z.B. Tabelle 44).

Einflussgrössen, die für alle Szenarien als konstant erachtet werden, brauchen in der Tabelle nicht aufgeführt zu werden, wohl aber im Planungsgrundlagenbericht.

Ergebnisse

Zweckmässigerweise sollten die Ergebnisse in Form von Tabellen, Diagrammen und Grafiken, welche die zeitliche Entwicklung der brandphysikalischen Kenngrössen (Planungsziele) repräsentieren, dargestellt werden.

Die errechneten Grössenwerte sind mit den entsprechenden Leistungskriterien zu vergleichen, wofür sich die tabellarische Darstellung besonders gut eignet (vgl. z.B. Tabelle 45).

Brandfallsteuerungsmatrix

Die Brandfallsteuerungsmatrix ist eine tabellarische Übersicht sämtlicher Beziehungen zwischen auslösenden Zonen und anzusteuernden Komponenten. Sie dient als Grundlage für

- die Festlegung der automatisch anzusteuernden und zu vernetzenden Systeme und Komponenten;
- die Programmierung der Steuerungen;
- die Durchführung von integralen Tests zur Überprüfung sämtlicher dem Brandschutz dienenden, automatisch angesteuerten Komponenten sowie deren Zusammenwirken;
- die Organisation der Wartungs- und Anpassungsarbeiten;
- die Durchführung der periodischen Kontrollen.

Diesbezüglich sei auf die VKF-Brandschutzerläuterung „Gewährleistung der Betriebsbereitschaft von Brandfallsteuerungen (BFS)“ verwiesen. *[172]*

Schlussfolgerungen

Die Schlussfolgerungen sollten die wesentlichen Elemente der Brandschutzplanung mit den zu treffenden Massnahmen hervorheben. Dies lässt sich am besten mithilfe von Datenblättern darstellen.

Zusammenstellung der Brand- und Evakuierungsszenarien												
Brand-/Evakuierungsszenarium Nr.	**Planungsziele**			**Gebäude**			**Nutzung**			**Brand**		
	Planungsziel 1	**....**	**Planungsziel X**	**Einflussgrösse 1**	**....**	**Einflussgrösse X**	**Einflussgrösse 1**	**....**	**Einflussgrösse X**	**Einflussgrösse 1**	**....**	**Einflussgrösse X**
1												
2												
....												
X												

Tab. 44: Zusammenstellung der Brand- und Evakuierungsszenarien

Zusammenstellung der Ergebnisse												
Brand-/Evakuierungs-szenarium Nr.	**Rechenwert zu Planungs-ziel 1**	**Leistungskriterium 1**	**Leistungskriterium 1 erfüllt?** (Ja/Nein)	**....**	**Rechenwert zu Planungs-ziel X**	**Leistungskriterium X**	**Leistungskriterium X erfüllt?** (Ja/Nein)	**Diagramm/Grafik zu Planungsziel 1** (Bericht Seite)	**....**	**Diagramm/Grafik zu Planungsziel X** (Bericht Seite)	**Text zu Planungsziel 1** (Bericht Seite)	**....**	**Text zu Planungsziel X** (Bericht Seite)
1													
2													
....													
X													

Tab. 45: Zusammenstellung der Ergebnisse

9.4 Kriterienkataloge zur Erstellung von Dokumentationen

Die nachfolgenden Kataloge beinhalten – ohne den Anspruch auf Vollständigkeit zu erheben – eine Sammlung von Kriterien, anhand derer sich Dokumentationen von

- Brandsicherheitsberechnungen (vgl. Tabelle 46),
- Personensicherheitsberechnungen (vgl. Tabelle 47) und
- brandschutztechnischen Anlagen (vgl. Tabelle 48)

erstellen lassen.

Kriterienkatalog für die Dokumentation von Brandsicherheitsberechnungen		Zonenmodell	Feldmodell	Bericht Seite
Grundlagen	Adresse des Objektes	X	X	
	Adresse der Eigentümer-/Bauherrschaft	X	X	
	Adresse des Auftraggebers	X	X	
	Adresse des Verfassers der Brandsicherheitsberechnung	X	X	
	Erstellungsdatum/Stand der Fassung des Berichtes	X	X	
	Datum und Index der beurteilten Planunterlagen	X	X	
	Unterschriften (Verfasser, Auftraggeber, Bauherrschaft)	X	X	
	Inhaltsverzeichnis	X	X	
	Problemstellung	X	X	
	Schutzziele (Schutzinteressen)	X	X	
	Struktur des Gebäudes (Anzahl Geschosse, Geschossverbindungen, Galerien, Atrien)	X	X	
	Nutzungsarten	X	X	
	Analysierter Gebäudeteil/Raum/Brandabschnitt	X	X	
	Brandschutz-Grobkonzept	X	X	
	Simulationssoftware (Name, Hersteller, Version)	X	X	
	Modelltyp, Modellannahmen, Rechenverfahren	X	X	
	Begründung zur getroffenen Softwareauswahl (hinsichtlich des Einsatzbereiches und der Anwendungsgrenzen)	X	X	
Objektspezifikation/Objektmodellierung	Modellierter Raumbereich (Umgebung, Gebäudeteile wie Räume, Brandabschnitte, Rauchabschnitte, Wände etc.) [1)]	X	X	
	Räume/Brandabschnitte (Anzahl, Anordnung, Höhe, Fläche, Verbindungen, Galerien)	X	X	
	Rauchabschnitte (Anzahl, Anordnung, Fläche, Rauchvolumen, Ausbildung, Aktivierungsart von mobilen Einrichtungen)	X	X	
	Öffnungen (Lage, Höhe, Anzahl, geometrische Flächen, aerodynamisch wirksame Flächen)	X	X	
	Umfassungsbauteile, wie Wände, Decken, Dach (Baustoffe, Dicke)	X	X	
	Strömungsrelevante Bauteile und Einrichtungen (Galerien, Geländer, Unterzüge, Stellwände, Lüftungskanäle, Möblierung etc.)	O	X	
	Anzahl virtueller Räume	X	O	
	Art des verwendeten Netzes (Anzahl Netze, Netzelementtyp)	O	X	
	Art der Netzgenerierung	O	X	
	Anzahl Knoten [1)]	O	X	
	Anzahl Netzelemente [1)]	O	X	
	Maximale Kantenlänge der Netzelemente	O	X	

Tab. 46: Kriterienkatalog für die Dokumentation von Brandsicherheitsberechnungen

Kriterienkatalog für die Dokumentation von Brandsicherheitsberechnungen		Zonenmodell	Feldmodell	Bericht Seite
Objektspezifikation/Objektmodellierung	Spezifikation der Stellen mit hohen Gradienten im Strömungsfeld	O	X	
	Spezifikation der Stellen mit lokaler Netzverfeinerung (Rauchgassäule, Deckenstrahl, umströmte Kanten, Öffnungen, Wandoberflächen etc.)	O	X	
	Ausrichtung/Orientierung der Netzelemente in strömungstechnisch sensiblen Zonen bei unstrukturierten Netzen (wie z.B. im Bereich der Rauchgassäule, des Deckenstrahls oder von Öffnungen)	O	X	
	Spezifikation der Stellen von Gitterkopplungen	O	X	
	Randbedingungen aller im Modell definierten Oberflächen (zu Simulationsbeginn) • Zustände in/an Bauteilen, wie Innenwände, Aussenwände, Decken (spezifische Wärmekapazität, Wärmeleitfähigkeit, Dichte etc.) • Atmosphärische Bedingungen (Aussentemperatur für den Sommer-, Winter- und Normalfall sowie Windstärke und Windrichtung) • Innentemperatur • Öffnungsbedingungen von NRWG und bei natürlichen Zuluftstellen • Strömungsbedingungen von MRWG und bei maschinellen Zuluftstellen	X	X	
	Anfangsbedingungen aller im Modell definierten Oberflächen und Volumen (thermo- und aerodynamischer Zustand des Strömungsfeldes zu Simulationsbeginn) • Anfangsströmung im Raum in x-, y-, z-Richtung • Lösungsalgorithmus	O	X	
	Fluideigenschaften (Dichte δ, Viskosität ν, Wärmeleitfähigkeit λ, Wärmekapazität c_p)	O	X	
	Einfluss von lufttechnischen Anlagen	X	X	
Brandverlaufskurven	Begründungen zur Wahl der Brandszenarien	X	X	
	Begründungen zur Wahl der Bemessungsbrandszenarien	X	X	
	Brandleistungskurven (Modell, Kennwerte, Darstellung des Verlaufs)	X	X	
	Maximale Brandleistung (absolut, spezifisch)	X	X	
	Brandintensitätskoeffizient	X	X	
	Brandherd (Lage, Form, Ausdehnung)	X	X	
	Zeitl. Entwicklung der Brandfläche (horizontale, vertikale Brandausbreitungsgeschwindigkeit)	X	X	
	Maximale Brandfläche	X	X	
	Brandlasten (Materialzusammensetzung, Heizwert) [2]	X	X	
	Verbrennungseffektivität [2]	X	X	
	Abbrandrate/Abbrandgeschwindigkeit [2]	X	X	
	Modell Erkennungsweiten-Berechnung [3]	X	X	
	Schadstoffausbeute, Schadstoffmassenstrom (pro Brennstoff) [3]	X	X	
	Massenspezifischer Extinktionskoeffizient [3]	X	X	
	Parameter für Erkennungsweite [3]	X	X	

Tab. 46: Kriterienkatalog für die Dokumentation von Brandsicherheitsberechnungen

Kriterienkatalog für die Dokumentation von Brandsicherheitsberechnungen				Zonenmodell	Feldmodell	Bericht Seite
Brandschutztechnische Anlagen	SPA		Sprinkleranlage (RTI, Nennauslösetemperatur, Sprinklerauslösezeit, spezifische Wasserbeaufschlagung)	X	X	
			Schutzumfang, Anordnung der Sprinkler	X	X	
			Brandleistungs-Reduktions-Modell	X	X	
	BMA		Brandmeldeanlage (Brandkenngrösse, Detektionszeitpunkt)	X	X	
			Überwachungsumfang, Anordnung der Brandmelder	X	X	
	RWA	NRWA	Aerodynamisch wirksame Öffnungsfläche aller Geräte	X	X	
			Aerodynamisch wirksame Öffnungsfläche pro Gerät	X	X	
		MRWA	Gesamtvolumenstrom an den Absaugstellen	X	X	
			Volumenstrom pro Absaugstelle	X	X	
			Gesamtvolumenstrom an den Zuluftstellen	X	X	
			Volumenstrom pro Zuluftstelle (ungünstigster Wert)	X	O	
		NRWA + MRWA	Anzahl Geräte	X	X	
			Klassifizierung der Geräte	X	X	
			Aktivierungszeitpunkt, Aktivierungsart der Abluft	X	X	
			Aktivierungszeitpunkt, Aktivierungsart der Zuluft	X	X	
			Anzahl Zuluftstellen	X	X	
			Totale aerodynamisch wirksame Öffnungsfläche an den Zuluftstellen	X	X	
			Maximale (mittlere) Strömungsgeschwindigkeit an den Zuluftstellen	X	O	
			Darstellung der Lage der Abluft-/Absaugstellen	X	X	
			Darstellung der Lage der Zuluft-/Ansaugstellen	X	X	
Submodelle	Plume-Modell (Ansatz zur Berechnung des Rauchgasmassenstroms)			X	O	
	Modell zur Bestimmung der Flammenhöhe			X	O	
	Modell zur Bestimmung des Wärmetransportes durch Bauteile			X	X	
	Kriterien zur Berechnung der Brandleistung bei Unterventilation			X	O	
	Verbrennungsmodell (Brand- und Rauchquelle)			O	X	
	Auftriebsmodell			O	X	
	Turbulenzmodell			O	X	
	Modelle zur Wärmeübertragung auf/in Bauteile/n (Wärmeleitung, -konvektion, -strahlung) [4)]			X	X	
	Schadstoffmodell (Bilanzierung von Verbrennungsprodukten)			X	X	
	Sprinklermodell			X	X	

Tab. 46: Kriterienkatalog für die Dokumentation von Brandsicherheitsberechnungen

	Kriterienkatalog für die Dokumentation von Brandsicherheitsberechnungen	Zonenmodell	Feldmodell	Bericht Seite
Numerik	Simulationsdauer	X	X	
	Konvergenzparameter/Konvergenzkriterien (Zeitschrittweite, Anzahl Unteriterationen etc.)	X	X	
	Ansatz der Zeitdiskretisierungsmethode	X	X	
	Ansatz der Ortsdiskretisierungsmethode	O	X	
	Numerische Auffälligkeiten während der Simulation	X	X	
Ergebnisse	Feuerwiderstand/Standfestigkeit des Tragwerkes	X	X	
	Feuerwiderstand/Standfestigkeit der raumabschliessenden Bauteile	X	X	
	Spezielle Strömungsphänomene (axialsymmetrische Plumes, nicht axialsymmetrische Plumes, Balkon-Überlauf-Plumes, Anliegende-Überlauf-Plumes etc.)	X	X	
	Parameteranalysen (Typ, Wertebereiche der Eingabevariablen, Anzahl Variationen)	X	(X)	
	Sensitivitätsanalysen (Wertebereiche der Eingabevariablen, Anzahl Variationen, Zielvariable oder Zielfunktion, Gewichtung der Eingabevariablen bezüglich des relativen Einflusses auf die Zielvariable oder Zielfunktion)	X	(X)	
	Angaben zur Unabhängigkeit der Ergebnisse von der Wahl der Konvergenzparameter/Konvergenzkriterien	X	X	
	Angaben zur Unabhängigkeit der Ergebnisse von der Wahl der Grösse des Rechengitters (Netzes)	O	X	
	Tabellarische Zusammenstellung der Brandszenarien (vgl. Tabelle 44)	X	X	
	Tabellarische Zusammenstellung der Ergebnisse (vgl. Tabelle 45)	X	X	
	Schlussfolgerungen (Massnahmenkatalog, Datenblatt mit sämtlichen Anlagenmerkmalen, Mess- und Abnahmekriterien)	X	X	
	Brandfallsteuerungsmatrix (vgl. VKF-BSE 117-03) *[172]*	X	X	
	Planungs- und Ausführungshinweise für die baulich-konstruktive Umsetzung von brandschutztechnischen Anlagen (RWA, BMA, SPA etc.)	X	X	

Tab. 46: Kriterienkatalog für die Dokumentation von Brandsicherheitsberechnungen

Legende zu Tabelle 46

X: relevant

(X): bedingt relevant/nicht praktikabel

O: nicht relevant

Erläuterungen zu Tabelle 46

[1] Die Simulationsergebnisse sollten von der Definition des Simulationsbereiches und der Netzfeinheit unabhängig sein.

[2] Relevant für brandschutztechnische Bemessungen mit einem Verbrennungsmodell (vgl. Tabelle 9).

[3] Relevant für brandschutztechnische Bemessungen mit einem Verbrennungsmodell und Quantifizierung von Brandraucheinflussgrössen (vgl. Tabelle 9).

[4] Es hängt von der Fragestellung ab, ob bei einer Brandsimulation die Berechnung der Wärmeübertragung auf/in Bauteile/n wesentlich ist. Die Berücksichtigung der Wärmeübertragung kann wichtig sein, weil dadurch

- dem Brandraum Wärmeenergie entzogen,
- das Strömungsbild beeinflusst,
- die Oberflächentemperatur von Bauteilen ermittelt,
- die Temperaturentwicklung in Bauteilen bestimmt,
- der Wärmedurchgang durch Bauteile berechnet,
- die Entzündung von Bauteilen beurteilt,
- die Heissbemessung von Bauteilen durchgeführt

werden kann.

Kriterienkatalog für die Dokumentation von Personensicherheitsberechnungen		Hydraulische Modelle	Individualmodelle	Bericht Seite
Grundlagen	Adresse des Objektes	X	X	
	Adresse der Eigentümer-/Bauherrschaft	X	X	
	Adresse des Auftraggebers	X	X	
	Adresse des Verfassers der Personensicherheitsberechnung	X	X	
	Erstellungsdatum/Stand der Fassung des Berichtes	X	X	
	Datum und Index der beurteilten Planunterlagen	X	X	
	Unterschriften (Verfasser, Auftraggeber, Bauherrschaft)	X	X	
	Inhaltsverzeichnis	X	X	
	Problemstellung	X	X	
	Verfügbare Evakuierungsdauer (aus Brand-/Rauchsimulation)	X	X	
	Schutzziele	X	X	
	Struktur des analysierten Gebäudes/Gebäudeteils (Anzahl Geschosse, Geschossflächen, Geschossverbindungen, Galerien, Atrien)	X	X	
	Nutzungsarten, Nutzungszeiten, Nutzungsdauern	X	X	
	Flucht- und Rettungswegkonzept	X	X	
	Ausrüstung der Flucht- und Rettungswege (Fluchtwegkennzeichnung, Sicherheitsbeleuchtung, Leitsysteme etc.)	X	X	
	Alarmierungssystem (BMA, SPA, Sprachalarmanlagen etc.)	X	X	
	Alarmorganisation (Betriebspersonal, Sicherheitsdienst etc.)	X	X	
	Sichere Bereiche (Treppenhäuser, Umgebung)	X	X	
	Simulationssoftware (Name, Hersteller, Version)	O	X	
	Modelltyp, Modellannahmen, Rechenverfahren	X	X	
	Begründung zur getroffenen Softwareauswahl (hinsichtlich des Einsatzbereiches und der Anwendungsgrenzen)	O	X	
	Überprüfung der Simulationsergebnisse von Individualmodellen (Name des hydraulischen Modells)	O	X	

Tab. 47: Kriterienkatalog für die Dokumentation von Personensicherheitsberechnungen

Kriterienkatalog für die Dokumentation von Personensicherheitsberechnungen		Hydraulische Modelle	Individualmodelle	Bericht Seite
Geometrie	Aufenthaltsräume, Aufenthaltsorte	X	X	
	Flucht- und Rettungswege (räumliche Anordnung, Geometrie, Verknüpfungen)	X	X	
	Eigenschaften von Wegelementen, wie Korridore, Treppen, Rampen, Durchgänge, Ausgänge (Anzahl, Lage, Abmessungen, Kapazität etc.)	X	X	
	Eigenschaften von Hindernissen, wie Wände, Verengungen etc. (Anzahl, Lage, Abmessungen, Kapazität etc.)	X	X	
	Versperrungen in den Flucht- und Rettungswegen (blockierte Ausgänge etc.)	O	X	
	Erkennbarkeit von Ausgängen	O	X	
	Spezielle Randbedingungen	X	X	
Population [1)]	Herkunft der Personendaten (Gehgeschwindigkeiten, Personendichten etc.)	X	X	
	Maximale Personenbelegung	X	X	
	Anfängliche maximale Personendichte	X	X	
	Anfangsverteilung der Population	O	X	
	Zuordnung von Personen zu Ausgängen	X	X	
	Detektions-, Alarmierungs-, Reaktionsdauer	X	X	
	Personen-Modell-Interaktion (global/individuell)	O	X	
	Personen-Gebäude-Interaktion (global/individuell)	O	X	
	Parameter, Variablen und Werte für physische Eigenschaften (Alter, Altersverteilung, Körpergrösse, Gewicht, Geschlecht, Bekleidung, Mobilität etc.)	O	X	
	Parameter und Variablen für psychische Eigenschaften (soziales und kommunikatives Verhalten, Nervosität, Geduld, Wahrnehmungs-, Durchsetzungs-, Bewusstseinsvermögen etc.)	O	X	
	Parameter und Variablen für geistige Eigenschaften (Informationsstand, Erfahrungsstand)	O	X	
	Parameter, Variablen und Werte der Gehgeschwindigkeiten von Personen (ungehinderte Gehgeschwindigkeit in der Ebene, auf Treppen, auf Rampen etc.; Gehgeschwindigkeit beim Überholen, Ausweichen etc.)	X	X	
	Parameter und Variablen für Personengruppen (Personenzahl, Personentypen, prozentuale Verteilung der Personentypen etc.)	O	X	
	Modell für die Simulation der Bewegungsrichtung von Personen (mögliche Bewegungsrichtungen)	O	X	

Tab. 47: Kriterienkatalog für die Dokumentation von Personensicherheitsberechnungen

Kriterienkatalog für die Dokumentation von Personensicherheitsberechnungen		Hydraulische Modelle	Individualmodelle	Bericht Seite
Population [1]	Modell für die Simulation der Verhaltenseigenschaften von Personen	O	X	
	Regeln, Gleichungen und Algorithmen für die Beschreibung der Zusammenhänge zwischen den Personeneigenschaften und den Personenbewegungen	O	X	
	Regeln, Gleichungen und Algorithmen für die Beschreibung der Zusammenhänge zwischen den individuellen Verhaltenseigenschaften und den Personenbewegungen	O	X	
	Regeln, Gleichungen und Algorithmen für die Beschreibung der Zusammenhänge zwischen den individuellen Verhaltenseigenschaften und der Entscheidungsfindung	O	X	
	Spezielle Anfangsbedingungen	O	X	
Planungsziele	Höhe der raucharmen Schicht	X	X	
	Gastemperatur in der raucharmen Schicht	X	X	
	Optische Rauchdichte in der raucharmen Schicht	X	X	
	Extinktionskoeffizient in der raucharmen Schicht	X	X	
	Erkennungsweite in der raucharmen Schicht	X	X	
	Russkonzentration in der raucharmen Schicht	X	X	
	CO_2-Konzentration in der raucharmen Schicht	X	X	
	Temperaturgradienten-Verlauf	X	X	
	Wärmestrahlung in der raucharmen Schicht	X	X	
	Gastemperatur in der Rauchgasschicht	X	X	
Ergebnisse	Tabellarische Zusammenstellung der Evakuierungsszenarien	X	X	
	Anzahl Simulationsdurchläufe pro Evakuierungsszenarium [2]	O	X	
	Auffälligkeiten/Besonderheiten während den Simulationen	O	X	
	Parameteranalysen (Typ, Wertebereiche der Eingabevariablen bzw. Populationsdaten, Anzahl Variationen)	O	X	
	Sensitivitätsanalysen (Wertebereiche der Eingabevariablen bzw. Populationsdaten, Anzahl Variationen, Zielvariable oder Zielfunktion, Gewichtung der Eingabevariablen bezüglich des relativen Einflusses auf die Zielvariable oder Zielfunktion)	O	X	
	Angaben zur Unabhängigkeit der Ergebnisse von der Wahl der Konvergenzparameter/Konvergenzkriterien	O	X	
	Angaben zur Unabhängigkeit der Ergebnisse von der Wahl der Zellengrösse und von Rechengittern (Netze)	O	X	

Tab. 47: Kriterienkatalog für die Dokumentation von Personensicherheitsberechnungen

Kriterienkatalog für die Dokumentation von Personensicherheitsberechnungen		Hydraulische Modelle	Individualmodelle	Bericht Seite
Ergebnisse	Beleuchtungsbedingungen zur Erzielung der ermittelten Erkennungsweiten	X	X	
	Tabellarische Zusammenstellung der Ergebnisse	X	X	
	Vergleich der Planungsziele zur Beurteilung der Personensicherheit mit den entsprechenden Leistungskriterien (Personensicherheitsnachweis)	X	X	
	Vergleich der erforderlichen Evakuierungsdauer mit der verfügbaren Evakuierungsdauer (Personensicherheitsnachweis)	X	X	
	Statistische Verteilung der Evakuierungsdauern pro Szenarium	O	X	
	Grafische Darstellung der Häufigkeitsverteilung der Evakuierungsdauern aller Szenarien (Histogramm) mit Angabe der minimalen, maximalen und signifikanten Evakuierungsdauer sowie der Standardabweichung	O	X	
	Evakuierungsverlauf (in Zeitschritten von $\Delta t \leq t_{erf.\ Evak} / 10$)	O	X	
	Dichtemaxima der Personenströme	X	X	
	Dichteverläufe der Personenströme (zeitlich/räumlich)	O	X	
	Bereiche mit signifikanten Personenstaus [3)]	X	X	
	Sicherheitsfaktor/Sicherheitszuschlag	X	X	
	Interpretation/Bewertung der Ergebnisse	X	X	
	Schlussfolgerungen (Massnahmenkatalog)	X	X	
	Planungs- und Ausführungshinweise für die baulich-konstruktive Umsetzung von brandschutztechnischen Anlagen	X	X	

Tab. 47: Kriterienkatalog für die Dokumentation von Personensicherheitsberechnungen

Legende zu Tabelle 47

X: relevant

(X): bedingt relevant/nicht praktikabel

O: nicht relevant

Erläuterungen zu Tabelle 47

[1)] Definition unter besonderer Berücksichtigung von unterschiedlichen

- Nutzungs-/Veranstaltungsarten,
- Nutzungszeiten und
- Nutzungsdauern.

[2)] Weil das Verhalten von Personen stochastisch angenommen wird, sollte für jedes Evakuierungsszenarium eine von der statistischen Verteilung der Evakuierungsdauer abhängige Anzahl Simulationen durchgeführt werden (mindestens 10 Simulationen pro Szenarium). Zur Erzielung statistisch belastbarer Ergebnisse, ist bei ungünstiger statistischer Verteilung der Evakuierungsdauern die Anzahl Simulationen angemessen zu erhöhen (auf 20-50 Simulationen pro Szenarium). [153], S. 9

[3)] Ein signifikanter Personenstau liegt vor, wenn eine lokale Dichte von mehr als 4 Personen pro m^2 während einer Zeitdauer ($t_{>4P/m2}$) von länger als 10 % der Evakuierungsdauer ($0.1 \cdot t_{erf.\ Evak}$) auftritt, also $t_{>4P/m2} > 0.1 \cdot t_{erf.\ Evak}$. [153], S. 9

Kriterienkatalog für die Dokumentation von brandschutztechnischen Anlagen (Dokumente)	**Bericht Seite**
Darstellung der installierten brandschutztechnischen Anlagen (Anlagenbeschreibung, Schemata, Pläne etc.)	
Darstellung des Konzeptes über den elektrischen Funktionserhalt	
EU-Konformitätszertifikate und EU-Konformitätserklärungen über wichtige Anlagenkomponenten	
Von akkreditierten Institutionen erstellte Zertifikate und Anerkennungen	
Bescheinigung über die Übereinstimmung der brandschutztechnischen Anlagen mit den Anforderungen des Brandschutzkonzeptes bzw. der Brand- und/oder Personensicherheitsberechnung	
Bescheinigung über den einwandfreien, ordnungsgemässen und funktionsfähigen Zustand der brandschutztechnischen Anlagen	
Protokolle über die Funktionalitätstests und Inbetriebnahme der Anlagenkomponenten	
Protokoll über die integralen Tests	
Anweisungen über die Inspektions-, Wartungs- und Prüfverfahren sowie deren Periodizität	

Tab. 48: Kriterienkatalog für die Dokumentation von brandschutztechnischen Anlagen (Dokumente)

Teil II

Anwendung von Brandschutzingenieur-methoden

10 Anwendungsfelder von Brandschutzingenieurmethoden

10.1 Allgemeines

Prinzipiell sind im Brandschutzwesen die Anwendungsfelder der ingenieurwissenschaftlichen Methoden unbegrenzt. Einschränkungen bei der Verwendung ingenieurmässiger Ansätze entstehen insofern, als dass die massgebenden Modelle und Verfahren

- entwickelt sein,
- der Allgemeinheit zur Verfügung stehen und
- auf abgestimmter und harmonisierter Basis anerkannt sein

müssen.

Ingenieurmässige Methoden und Modelle zur Beurteilung komplexer Bauvorhaben werden immer wichtiger, was sich in der zunehmenden Akzeptanz durch die Regelwerke, wie z.B. dem Bauprodukterecht, äussert.

10.2 Schweizerisches Bauprodukterecht

Das EU-Grundlagendokument „Wesentliche Anforderungen" Nr. 2, „Brandschutz", nennt für die Brandschutzingenieurmethoden die in Tabelle 49 aufgeführten Anwendungsmöglichkeiten. Einschränkend hält es aber fest, dass

- gegenwärtig nur einige Teile der ingenieurwissenschaftlichen Methoden für den Brandschutz entwickelt sind;
- erhebliche Forschungsanstrengungen erforderlich sind, um einen umfassenden einheitlichen Ansatz zu entwickeln;
- die massgebenden Produktemerkmale zur Verfügung stehen müssen, falls der ingenieurmässige Ansatz angewendet wird. [2], Nr. C 62/29

10.3 VKF-Brandschutzvorschriften

In den VKF-Brandschutzvorschriften, Ausgabe 2003, werden für die ingenieurwissenschaftlichen Methoden die folgenden Anwendungsbereiche genannt (vgl. Tabelle 50):

- Beurteilung der Brandgefahr, des Brandrisikos und der Brandsicherheit;
- Erarbeitung, Vergleich und Optimierung von objektbezogenen Brandschutzkonzepten;
- Erstellung von objektbezogenen Rauch- und Wärmeabzugskonzepten;
- Nachweis der Gleichwertigkeit zwischen präskriptiven und alternativen Brandschutzmassnahmen in Bezug auf die Erfüllung der normativen Schutzziele;
- brandschutztechnische Bemessung von Tragwerken.

Aus den vorstehenden, von den VKF-Brandschutzvorschriften explizit erwähnten Anwendungsbereichen lassen sich unter Umständen weitere Anwendungsmöglichkeiten ableiten, sodass die Zusammenstellung von Tabelle 50 keinen Anspruch auf Vollständigkeit erhebt.

Anwendungsmöglichkeiten von Ingenieurmethoden nach dem Bauprodukterecht		
EU-Grundlagendokument „Wesentliche Anforderungen“ Nr. 2 Ziffer, Litera	**Anwendung**	**Beispiele**
Ziffer 2.3, Litera a [2]	Ermittlung grundlegender Kenntnisse über die Entwicklung und Ausbreitung von Bränden und Rauchgasen.	Berechnung der Brandentwicklung in Räumen. Berechnung der Brandausbreitung innerhalb und ausserhalb von Gebäuden über den Brandentstehungsraum hinaus. Bewertung der Bewegung von Rauchgasen in Gebäuden.
Ziffer 2.3, Litera b [2]	Bewertung von Einwirkungen.	Einwirkung von Wärme und Rauchgasen auf Personen und Bauwerke. Mechanische Einwirkung auf Baukonstruktion und/oder Bauwerke.
Ziffer 2.3, Litera c [2]	Beurteilung des Verhaltens von Bauprodukten, wenn sie einem Brand ausgesetzt sind.	Beurteilung des Verhaltens von Bauprodukten in Entstehungsbränden hinsichtlich • Entzündbarkeit, • Flammenausbreitung, • Wärmeabgabegeschwindigkeit, • Entwicklung von Rauch und • Entwicklung von toxischen Gasen. Widerstand von Konstruktionen gegen einen Brand hinsichtlich ihrer Tragfähigkeit und Trennfunktion.
Ziffer 2.3, Litera d [2]	Beurteilung der Brandmeldung, Aktivierung und Brandbekämpfung.	Zeit bis zur Aktivierung • von Schutzsystemen, • von Brandbekämpfungsanlagen, • der Feuerwehr und • der Gebäudenutzer. Wirkung von Brand- und Rauchschutzanlagen (einschliesslich Löschmittel). Bewertung von Brandmeldezeiten je nach Art und Anordnung der Brand-/Rauchmelder. Wechselwirkung zwischen Brandbekämpfung und anderen Sicherheitsmassnahmen.
Ziffer 2.3, Litera e [2]	Beurteilung und Bemessung von Räumungs- und Rettungsmassnahmen.	

Tab. 49: Anwendungsmöglichkeiten von Ingenieurmethoden nach dem Bauprodukterecht

Anwendungsmöglichkeiten von Ingenieurmethoden nach den VKF-Brandschutzvorschriften

Brandschutznorm Brandschutzrichtlinie Artikel/Ziffer/Absatz	**Anwendung**	**Beispiele**
BSN 1-03, Artikel 11, Absatz 2 [3]	Realisierung von Ersatzmassnahmen anstelle von vorgeschriebenen Brandschutzmassnahmen (Einzel- oder Konzeptlösung).	Objektbezogener Nachweis der Gleichwertigkeit von Ersatzmassnahmen in Bezug auf die Erfüllung der normativen Schutzziele. Optimierung von Brandschutzkonzepten hinsichtlich Kosten, Betriebsabläufe etc.
BSN 1-03, Artikel 11, Absatz 3 [3]	Die Brandgefahr im Einzelfall weicht vom Normalfall derart ab, dass vorgeschriebene Anforderungen als ungenügend oder als unverhältnismässig erscheinen.	Objektbezogener Nachweis der Gleichwertigkeit von erweiterten oder reduzierten Brandschutzmassnahmen in Bezug auf die Erfüllung der normativen Schutzziele für Objekte mit besonders geringen bzw. besonders hohen Brandrisiken.
BSN 1-03, Artikel 13 **BSN 1-03, Artikel 38, Absatz 2** [3]	Objektbezogene Beurteilung von Brandgefahr, Brandrisiko und Brandsicherheit, unter Berücksichtigung der vorgeschriebenen Mindestanforderungen für die Flucht- und Rettungswege.	Nachweis der Brandsicherheit betreffend Erfordernis von Brandmelde- und Sprinkleranlagen (im Sinne von VKF-BSR 19-11, Ziffern 5.2.1, 5.2.3 und 5.3 sowie VKF-BSR 20-11, Ziffern 3.2.1, 3.2.4 und 3.3). [145] [173] Objektbezogene Festlegung der Feuerwiderstandsdauer von Bauteilen. Optimierung der Fluchtweganordnung und -kennzeichnung zwecks Verhinderung von Personenstaus.
BSN 1-03, Artikel 9 [3]	Konkretisierung von qualitativen Schutzzielen durch die Festlegung von quantitativen Schutzzielkriterien.	Erarbeitung von objektbezogenen Brandschutzkonzepten für Gebäude spezieller Bauart, Baukonstruktion oder mit besonderen Brandrisiken.
BSN 1-03, Artikel 31 [3]	Rechnerischer Nachweis des Feuerwiderstandes von Tragwerken.	Feuerwiderstandsnachweis für Tragwerke besonderer Bauart oder von Bauten und Anlagen mit speziellen Brandgefahren.
BSR 14-03, Ziffer 6.1 [174]	Rechnerischer Nachweis des geforderten Feuerwiderstandes von Tragwerken (Einzelbauteile oder Gesamttragwerke) bei Beanspruchung durch Normbrand.	Rechnerischer Nachweis des geforderten Feuerwiderstandes von Tragwerken, falls keine genormten Brandversuche vorliegen oder keine allgemein zugelassenen (nicht zu prüfenden) Bauteile verwendet werden (Sonderkonstruktionen).
BSR 14-03, Ziffer 6.2 [174]	Rechnerischer Nachweis des geforderten Feuerwiderstandes von Tragwerken (Einzelbauteile oder Gesamttragwerke) bei Beanspruchung durch Naturbrand.	Rechnerischer Nachweis des geforderten Feuerwiderstandes von Tragwerken für Sonderbauten, wie z.B. • Bauten mit sehr kleinen oder sehr grossen Brandbelastungen, • sehr komplexe Bauten, • Bauten, bei denen die Anforderungen an den Feuerwiderstand der Tragwerke nicht aus den Vorschriften ableitbar sind.

Tab. 50: Anwendungsmöglichkeiten von Ingenieurmethoden nach den VKF-Brandschutzvorschriften

Anwendungsmöglichkeiten von Ingenieurmethoden nach den VKF-Brandschutzvorschriften

Brandschutznorm Brandschutzrichtlinie Artikel/Ziffer/Absatz	**Anwendung**	**Beispiele**
BSR 22-03, Ziffer 4.2.2, Absatz 3 [4]	Festlegung der für den Rauch- und Wärmeabzug erforderlichen Massnahmen bei Industrie-, Gewerbe- und Lagerräumen sowie bei Parkhäusern und Einstellräumen für Motorfahrzeuge.	Erstellung von nutzungsbezogenen Rauch- und Wärmeabzugskonzepten für • Brandabschnittsflächen > 2400 m² (ohne SPA), • Brandabschnittsflächen > 4800 m² (mit SPA).
BSR 22-03, Ziffer 4.2.4, Absatz 2 [4]	Festlegung der für den Rauch- und Wärmeabzug erforderlichen Massnahmen bei Räumen mit einer Belegung von mehr als 1000 Personen.	
BSR 22-03, Ziffer 4.2.6 [4]	Festlegung der für den Rauch- und Wärmeabzug erforderlichen Massnahmen bei Bauten und Anlagen mit besonderen Nutzungen oder wenn im Brandfall mit einer sehr grossen Rauch- und Wärmeentwicklung zu rechnen ist.	Erstellung von nutzungsbezogenen Rauch- und Wärmeabzugskonzepten, beispielsweise für • Verkehrsanlagen (Bahnhöfe, Flughäfen), • grossvolumige Bauten mit Ladenstrassen oder genutzten Innenhöfen, • Messehallen, • Reifenlager, • Kunststofflager.
BSR 22-03, Ziffer 4.3.3, Absatz 5 [4]	Rechnerischer Nachweis über die Dimensionierung der MRWA von Atrien.	
BSR 22-03, Ziffer 4.3.3, Absatz 6 [4]	Festlegung der für den Rauch- und Wärmeabzug erforderlichen Massnahmen bei Atrien mit einer Grundfläche von mehr als 2400 m².	

Tab. 50: Anwendungsmöglichkeiten von Ingenieurmethoden nach den VKF-Brandschutzvorschriften

Legende zu Tabelle 50

BSN 1-03:	VKF-Brandschutznorm, Ausgabe 2003 [3]
BSR 14-03:	VKF-Brandschutzrichtlinie „Tragwerke“, Ausgabe 2003 [174]
BSR 19-11:	VKF-Brandschutzrichtlinie „Sprinkleranlagen“, Ausgabe 2011 [173]
BSR 20-11:	VKF-Brandschutzrichtlinie „Brandmeldeanlagen“, Ausgabe 2011 [145]
BSR 22-03:	VKF-Brandschutzrichtlinie „Rauch- und Wärmeabzugsanlagen“, Ausgabe 2003 [4]

10.4 Anwendungsmöglichkeiten von Evakuierungsberechnungen nach den VKF-Brandschutzvorschriften

Die in den VKF-Brandschutzvorschriften, Ausgabe 2003, vorgeschriebenen Mindestanforderungen an Flucht- und Rettungswege dürfen nicht aufgrund von Berechnungsmethoden oder technischen Brandschutzeinrichtungen reduziert werden (VKF-BSN 1-03, Artikel 38, Absatz 2). [3]

Damit bleibt der Einsatz von Evakuierungsberechnungen mithilfe algebraischer oder numerischer Modelle in erster Linie auf die folgenden Anwendungsmöglichkeiten beschränkt:

- Optimierung der Flucht- und Rettungswegführung zwecks Reduktion von
  - Staustellen,
  - Stauzeiten,
  - Stauabbauzeiten,
  - aus Staudrücken resultierende Krafteinwirkungen auf Personen,
  - ungleichmässigen Auslastungen;
- Bewertung der Evakuierungsdauer eines Gebäudes oder Teilen davon, unter Berücksichtigung sicherheitstechnischer Aspekte;
- Einschätzung der Flexibilität eines Flucht- und Rettungswegkonzeptes für den Fall, dass ein Fluchtwegbereich aufgrund eines Zwischenfalls nicht mehr verfügbar ist;
- Planung von organisatorischen Massnahmen (Alarmorganisation);
- Festlegung der Simulationsdauer von Brandsicherheitsberechnungen;
- Konzeption der Signaletik von Flucht- und Rettungswegen.

Selbst bei Umsetzung der normativen Anforderungen der VKF-Brandschutzrichtlinie „Flucht- und Rettungswege“ können sich bei entsprechend grossen Personenbelegungen, unter ungünstigen Bedingungen, Stausituationen ergeben. Solche Bedingungen existieren beispielsweise beim Übergang von einem horizontalen Verkehrsweg zu einer abwärts führenden Treppe, und zwar deshalb, weil der maximal mögliche spezifische Personenstrom (als Produkt aus der Personendichte und der Gehgeschwindigkeit) auf dem horizontalen Wegelement grösser ist als auf dem vertikalen, die beiden Wegelemente, gemäss Brandschutzvorschriften, aber die gleiche Durchgangsbreite aufweisen dürfen.

Fazit

Nicht die Ermittlung einer minutengenauen Evakuierungsdauer, sondern die Voraussage möglicher Problemsituationen und die Untersuchung von Alternativen sollten Ziel und Zweck der Anwendung von Evakuierungsmodellen sein.

11 Rauch- und Wärmeabzugsanlagen

11.1 Allgemeines

RWA umfassen sowohl Systeme zur Ableitung von Rauch und Wärme als auch solche zur Rauchfreihaltung.

Anlagen zur Rauchableitung führen naturgemäss nebenher auch Wärme ab. Solche Anlagen funktionieren nach den folgenden Prinzipien (vgl. Tabelle 51):

- Entlüftung,
- Verdünnung,
- Strömungsbeeinflussung.

Anlagen zur Rauchfreihaltung bauen eine Druckkaskade auf, die das Eindringen von Rauchgasen in den zu schützenden Raum – in der Regel ein Flucht- und Rettungsweg – für eine bestimmte Zeitdauer verhindert (Rauchschutz-Druckanlagen, Differenzdrucksysteme). Aufgrund ihres Wirkprinzips führen solche Anlagen aus Gebäuden keine substanziellen Wärmemengen ab. Sie sind nicht Gegenstand des vorliegenden Handbuches.

Unter Wahrung von objektbezogenen Schutzzielen haben RWA als Gesamtsystem die folgenden Aufgaben zu erfüllen:

- frühzeitige Detektion des Brandes und Aktivierung des Systems,
- Abführung der Rauchgasströme,
- Begrenzung der Rauchausbreitung,
- Gewährleistung der Wirksamkeit, unabhängig von äusseren und inneren Störgrössen (Wind, raumlufttechnische Anlagen etc.). [24], S. 5

Die Verwendung von lufttechnischen Anlagen zur Ableitung von Rauch und Wärme ist mit den folgenden Nachteilen verbunden:

- Die Anlagentechnik von lufttechnischen Anlagen ist nicht auf den Brandfall ausgelegt, da
  - Brandschutzklappen im Brandfall schliessen (und nicht wieder öffnen),
  - die thermische Stabilität von Bauteilen und deren Befestigungen nicht gegeben ist,
  - die Sicherheitsstromversorgung fehlt.
- Aus hygienischen Gründen muss die raumlufttechnische Anlage nach einem Brandereignis demontiert und ersetzt werden.
- Bei lufttechnischen Anlagen wird die Zuluft in der Regel im Deckenbereich eingebracht, was die Bildung einer stabilen Rauchgasschicht verunmöglicht.
- Die im Brandfall benötigten Fördervolumina sind um ein Vielfaches höher als im Komfortlüftungsbetrieb, sodass eine energie- und kostenoptimierte Auslegung der Anlage in den meisten Fällen nicht möglich ist.
- Kombinierte Anlagen müssen mit vielen Klappen (Strömungs-, Entrauchungs-, Brandschutzklappen) ausgerüstet werden, die zusätzliche Strömungswiderstände und folglich hohe Investitions- und Betriebskosten verursachen.

11.2 Prinzipien der Rauch- und Wärmeableitung

11.2.1 Entlüftung

Die sich durch die thermischen Auftriebskräfte ergebende Schichtung von deckennaher, verrauchter heisser Luft und darunter liegender, weitgehend rauchfreier kühler Luft wird stabilisiert, indem die RWA im Brandfall heissen Brandrauch aus der Heissgasschicht abzieht und im unteren Gebäudebereich kalte Umgebungsluft zuführt. Solche RWA helfen

- den Benutzern von Bauten und Anlagen, sich via Flucht- und Rettungswege in Sicherheit zu bringen;
- den Rettungskräften, Personen zu retten;
- der Feuerwehr, einen Brand wirksam zu bekämpfen;
- die Brandbeanspruchung von Baukonstruktionen zu vermindern;
- Sachwerte und Einrichtungen vor Brandeinwirkung zu schützen;
- Brandfolgeschäden durch Rauchgase und thermische Zersetzungsprodukte herabzusetzen. [4], Ziffer 3.1

11.2.2 Verdünnung

Lässt sich eine hinreichend hohe raucharme Schicht nicht erzeugen oder aufrechterhalten – wie beispielsweise in niedrigen Räumen –, so müssen im Aufenthaltsbereich von Personen die optische Dichte des Brandrauches bzw. der Extinktionskoeffizient, die Schadstoffkonzentrationen und die Raumtemperatur durch eine Verdünnung mit Frischluft auf bezüglich der Sichtverhältnisse und der Gesundheitsgefährdung zulässige Werte gesenkt werden.

Die zur Verdünnung erforderliche Umgebungsluftmenge kann in solchen Fällen nur mit einer maschinellen RWA gefördert werden, weil die thermischen Auftriebskräfte für eine ausreichende Rauchgasverdünnung zu gering sind.

Die optische Dichte von Brandrauch wird hauptsächlich durch die nicht verbrannten Bestandteile und bei Temperaturen < 100 °C durch kondensierenden Wasserdampf beeinflusst. Damit hängt die optische Dichte nicht nur von den Stoffeigenschaften des Brandgutes und dem Sauerstoffangebot ab, sondern auch von den räumlichen Verhältnissen und von der Abkühlung des Brandrauches durch Frischluft und kalte Wände. Weil all diese Randbedingungen bei realen Brandfällen kaum vorhersehbar sind, muss, ohne weiteren Nachweis, bei jedem Brandereignis, unabhängig des vorhandenen Brennstoffes, von Verhältnissen ausgegangen werden, die bei einem (stark russenden) Ölbrand auftreten. [36], S. 4; zitiert nach [175], S. 28-29

Bei den ungünstigen Ölbränden sollte der Verdünnungsgrad ca. 1000 betragen, sodass der Extinktionskoeffizient nicht grösser als 0.2 m^{-1} wird (vgl. Abbildung 119).

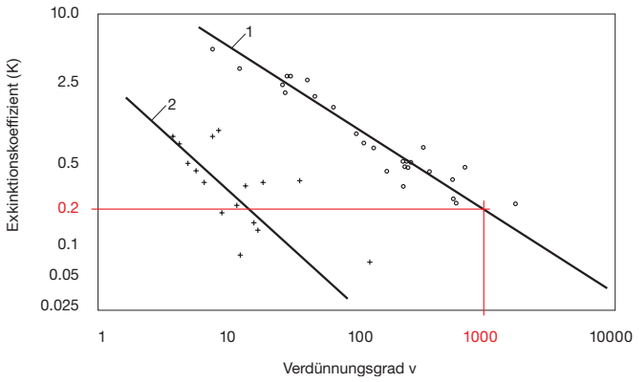


Abb. 119: Abhängigkeit des Extinktionskoeffizienten vom Verdünnungsgrad bei der Verbrennung von Heizöl EL (Kurve 1) und Holz (Kurve 2)

Dabei wird der Verdünnungsgrad definiert als Verhältnis

- zwischen Frischluftvolumen und unverdünntem Brandrauchvolumen

  oder

- zwischen Frischluftvolumenstrom und unverdünntem Brandrauchvolumenstrom.

Von den häufigsten toxischen Stoffen im Brandrauch ist der CO-Gehalt am kritischsten, wodurch dieser den erforderlichen Verdünnungsgrad festlegt. Weil mit einem Verdünnungsgrad ≥ 200 der CO-Gehalt im Brandrauch zulässig wird, ist für die Festlegung des Verdünnungsgrades nicht die Toxizität des Brandrauches, sondern dessen optische Dichte massgebend. [36], S. 4-5; zitiert nach [175], S. 30-31

Da die Brandrauchzusammensetzung von Stoffgemischen unter realen Verhältnissen unbekannt ist, lassen sich differenzierende Abschätzungen auf gesicherter physikalischer Grundlage kaum vornehmen. Somit bleibt das Prinzip der Rauchverdünnung auf spezielle Anwendungen beschränkt. Im Gegensatz dazu ist die Bildung von raucharmen Schichten nach den allgemein anerkannten Regeln der Technik plan-, umsetz- und nachweisbar.

11.2.3 Strömungsbeeinflussung

Die frei ansaugenden und ausblasenden Axial- oder Radial-/Zentrifugalventilatoren von Impuls-Ventilations-Systemen (IVS) erzeugen einen Luftstrahl mit hohem Impuls. In diesen Freistrahl wird Umgebungsluft induziert, sodass das transportierte Luftvolumen um ein Vielfaches höher wird als das eigentliche Fördervolumen des Ventilators (Venturi-Effekt). Der dadurch erzeugte Hauptluftstrom wird zum nächstgelegenen Impulsventilator oder in den Unterdruckbereich einer zentral angeordneten Absaugeinrichtung geführt, womit eine kontinuierliche Luftbewegung entsteht.

IVS bestehen im Wesentlichen aus den folgenden Komponenten:

- Impulsventilatoren in axialer oder radialer/zentrifugaler Bauart,
- mindestens eine zentrale Absaugeinrichtung (z.B. Abluftschacht mit eingebautem Abluftventilator),
- mindestens eine zentrale Zuluftversorgung, falls eine passive Nachströmung von Frischluft über entsprechende

Öffnungen nicht möglich oder nicht ausreichend ist (z.B. Frischluftschacht mit eingebautem Zuluftventilator),

- flächendeckend installierte Brandmeldeanlage mit einzeladressierten Brandmeldern,
- Regel- und Steuereinrichtungen,
- Sicherheitsstromversorgung.

IVS werden für die Belüftung und Entrauchung von unterirdischen Autoeinstellhallen gebaut. Bei korrekter Planung ermöglichen IVS

- eine Eindämmung der Rauchgase auf vorherbestimmte Transportwege und Raumbereiche,
- eine kontrollierbare, zielgerichtete Beförderung der Rauchgase zu den zentralen Absaugstellen.

Durch die Installation von Ventilatoren mit umkehrbarer Lauf- bzw. Schubrichtung lassen sich die unterschiedlichsten Brandszenarien berücksichtigen.

Die sichere Planung und Bemessung der IVS, die im Speziellen

- die Definition von repräsentativen Brandszenarien,
- die Ermittlung von Anzahl, Positionierung und Leistung der Impulsventilatoren und der Absaugeinrichtungen sowie
- die Gestaltung der passiven oder aktiven Zuluftversorgung

beinhalten sollten, machen eine Simulation des Rauchflusses mithilfe von CFD-Programmen unentbehrlich und können überdies erst nach Vorliegen des Flucht- und Rettungswegkonzeptes angegangen werden (vgl. Abbildung Nr. 120).

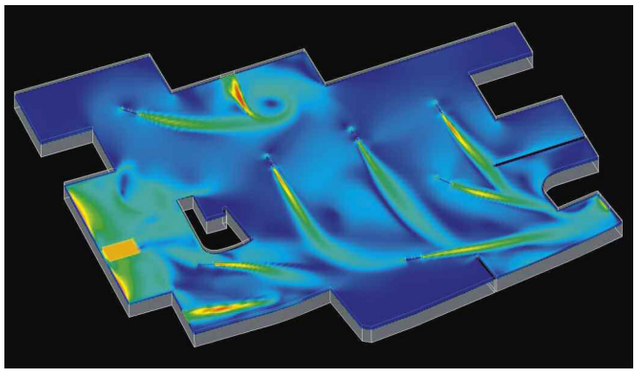


Abb. 120: Contour-Plot einer CFD-Analyse (Rauchkonzentration)

In Tabelle 51 werden die genannten Prinzipien der Rauch- und Wärmeableitung nach den folgenden Kriterien beschrieben, die ihre anlagentechnische Umsetzung, charakteristischen Eigenschaften und Leistungsgrenzen aufzuzeigen und zu differenzieren vermögen:

- anlagentechnische Umsetzung,
- Funktionsprinzip,
- physikalisches Prinzip,
- Ziel in Bezug auf Personenschutz und Wirken von Einsatzkräften,
- Vorteile,
- Nachteile,
- Einschränkungen.

Prinzipien der Rauch- und Wärmeableitung				
Kriterium	**Entlüftung**		**Verdünnung**	**Strömungsbeeinflussung**
Anlagentechnische Umsetzung	Natürliche RWA (NRWA)	Maschinelle RWA (MRWA)	Rauchgasventilator	Impuls-Ventilations-System (IVS) [1]
Funktionsprinzip	Bildung einer stabilen Rauchgasschichtgrenze		Verdünnung der Rauchgase	Erzeugung einer richtungskontrollierten, horizontalen Rauchgasströmung
Physikalisches Prinzip	Thermischer Auftrieb	Erzeugung eines Unterdrucks durch maschinelle Rauchgasabsaugung	Erzeugung eines Über- oder Unterdrucks durch maschinelle Zuluftzufuhr oder maschinelle Rauchgasabsaugung	Strahl- und Induktionswirkung (Schubkraft und Venturi-Effekt) [2]
Ziel in Bezug auf Personenschutz und Wirken von Einsatzkräften	Bildung einer raucharmen Schicht mit einer Schichtgrenze oberhalb des Aufenthaltsbereiches von Menschen		Verdünnung von die Sicht trübenden und toxischen Rauchgasen auf ein für Menschen erträgliches Mass	Bildung von raucharmen Raumbereichen (virtuelle Rauchabschnittsbildung)
Vorteile	Automatische Anpassung der Abzugsleistung an zusätzliches Rauchgasvolumen und bei zunehmenden Temperaturen [3]	Gute Wirksamkeit bei niedrigen Rauchgastemperaturen [3] Seitenwindunempfindlich	Auch für niedrige Räume mit Raumhöhen < 3 m geeignet	Ein Netz an horizontalen Entrauchungsleitungen entfällt Geringe Bauhöhe
Nachteile	Eingeschränkte Wirksamkeit bei niedrigen Rauchgastemperaturen [3] Seitenwindabhängigkeit	Mit zunehmenden Temperaturen sinkt der geförderte Massenstrom [3]	Verwirbelung der Rauchgase im gesamten Raumvolumen	Verwirbelung der Rauchgase im stromabwärts liegenden Raumvolumen Komplexe Regel- und Steuerungstechnik Komplexe, zeitintensive Bemessungs- und Planungsarbeit
Einschränkungen	An der Rauchgasschichtgrenze darf es nicht zu Verwirbelungen kommen, was eine Begrenzung der Rauchabschnittsgrössen und eine Lenkung der Zuluftströmung bedingt		Sehr hohe Luftvolumenströme erforderlich Beeinträchtigung der Flucht und Rettung durch verdünnte Rauchgase Bei maschineller Zuluftzufuhr können Brandprodukte in nicht verrauchte Gebäudeteile eindringen	Es ist mindestens ein Zentralschacht mit eingebautem Abluftventilator erforderlich Die Planung kann erst bei bekanntem Flucht- und Rettungswegkonzept angegangen werden Eingeschränkter Anwendungsbereich (unterirdische Autoeinstellhallen)

Tab. 51: Prinzipien der Rauch- und Wärmeableitung

Erläuterungen zu Tabelle 51

[1] Der Impuls ist das Produkt aus der Masse m der beschleunigten Luft und deren Geschwindigkeit v.

[2] Der Schub bzw. die Schubkraft F ist das Produkt aus dem Massenstrom $\dot{m}$ der beschleunigten Luft und deren Geschwindigkeit v ($F = \dot{m} \cdot v$). Die Nettoschubkraft eines Jet-Ventilators resultiert, gemäss Impulserhaltungssatz, aus der Differenz des Schubes zwischen ausgestossener und angesaugter Luftmasse: $F = \dot{m}_{aus} \cdot v_{aus} - \dot{m}_{an} \cdot v_{an}$.

Der Venturi-Effekt besagt, dass sich die Fliessgeschwindigkeit eines durch ein Rohr strömenden Fluids zu einem sich verändernden Rohrquerschnitt umgekehrt proportional verhält. Dies bedeutet, dass mit kleiner werdendem Querschnitt die Strömungsgeschwindigkeit des Fluids zunimmt. Demgegenüber entdeckte Bernoulli, dass mit steigender Strömungsgeschwindigkeit der statische Druck im Fluid abnimmt.

[3] Abbildung 121 zeigt das Verhalten der auf 300 °C bezogenen Massenströme von NRWA und MRWA, in Abhängigkeit der Rauchgastemperaturen. Bei NRWA wächst der abgeführte Massenstrom mit zunehmender Dicke und zunehmender Temperatur der Rauchgasschicht an. Die Ventilatoren von MRWA fördern, unabhängig von sich ändernder Dichte bzw. Temperatur der Rauchgase, näherungsweise konstante Volumenströme. Weil mit zunehmender Temperatur die Dichte der Rauchgase abnimmt, sinkt hingegen der geförderte Massenstrom. [176], S. 29

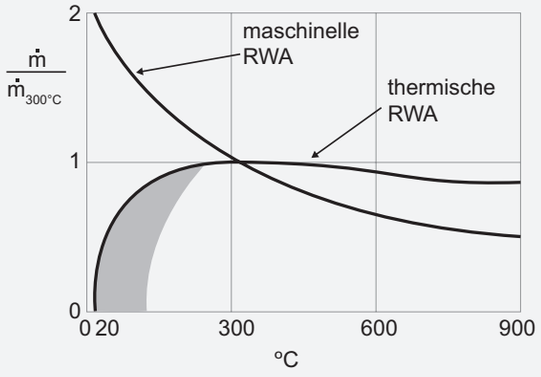


Abb. 121: Vergleich der Massenströme von NRWA und MRWA

11.3 VKF-Brandschutzrichtlinie „RWA“ (VKF-BSR 22-03)

Die VKF-Brandschutzrichtlinie „RWA“, Ausgabe 2003, spezifiziert für RWA

- die Begriffe (VKF-BSR 22-03, Ziffer 2),
- die Anforderungen (VKF-BSR 22-03, Ziffer 3),
- die Notwendigkeit (VKF-BSR 22-03, Ziffer 4),
- den Nachweis der Wirksamkeit (VKF-BSR 22-03, Ziffer 5),
- die Kontrollen (VKF-BSR 22-03, Ziffer 6),
- die Betriebsbereitschaft und Wartung (VKF-BSR 22-03, Ziffer 7). [4]

Tabelle 52 enthält eine Zusammenfassung des Inhalts der VKF-Brandschutzrichtlinie „RWA“, gegliedert nach den von ihr definierten Systemen, nämlich

- Entrauchungsöffnungen,
- natürliche RWA (NRWA),
- maschinelle RWA (MRWA) und
- Rauchschutz-Druckanlagen (RDA).

Für Entrauchungsöffnungen in Flucht- und Rettungswegen (Treppenhäuser, Korridore) sowie in Aufzugsanlagen und Installationsschächten gelten separate Regelungen, die in Tabelle 52 nicht erfasst sind. Diesbezüglich sei verwiesen auf

- BSR 15-03, Ziffer 3.7.4 (Entrauchungsöffnungen in Installationsschächten), [177]
- BSR 22-03, Ziffer 4.2.1 (Entrauchungsöffnungen in Treppenhäusern), [4]
- BSR 22-03, Ziffer 4.2.4 (Entrauchungsöffnungen in Korridoren von Räumen mit grosser Personenbelegung und von Verkaufsräumen), [4]
- BSR 24-03, Ziffer 4.3 (Entrauchungsöffnungen in Aufzugsschächten und Triebwerksräumen), [178]
- BSA 1007-03, Ziffer 6.5.1 (Entrauchungsöffnungen in Sicherheitstreppenhäusern). [179]

Wie bereits erwähnt, sind Entrauchungsöffnungen und Rauchschutz-Druckanlagen (RDA) nicht Gegenstand des vorliegenden Handbuches.

11.4 Nationale und internationale Normen, Richtlinien und technische Regeln

Von der VKF-Brandschutzrichtlinie „RWA“ abgesehen, befassen sich in der Schweiz und im umliegenden Ausland (Deutschland, Frankreich, Österreich) die in Tabelle 53 aufgeführten Normen, Richtlinien und technischen Regeln mit der Ableitung und Lenkung von Rauchgasen.

Entwürfe und Korrigenda zu Normen, Richtlinien und technischen Regeln sind in der Tabelle nicht aufgeführt. Ebenfalls nicht berücksichtigt werden Normen, Richtlinien und technische Regeln zu Ausrüstungen für Entrauchungsöffnungen, die der Feuerwehr den Einsatz mobiler Rauch- und Wärmeabzugsgeräte ermöglichen.

VKF-Brandschutzrichtlinie „Rauch- und Wärmeabzugsanlagen“ (VKF-BSR 22-03)			
Kriterium (Ziffer)		**NRWA**	**MRWA**
Zweck (Ziffer 2)		Kontrollierte Abführung von Rauch und Wärme ins Freie	
Aufbau, Funktionalität (Ziffer 2)		Fest installierte Einrichtungen, die im Brandfall durch den entstehenden thermischen Auftrieb wirksam werden	Fest installierte Einrichtungen, die im Brandfall mittels Ventilatoren wirksam werden
Aktivierung (Ziffern 3.4-3.5)		manuell und, je nach Brandschutzkonzept, zusätzlich automatisch [1]	
RWA-Konzept		erforderlich	
Bemessung		gemäss RWA-Konzept [2] [3]	gemäss RWA-Konzept [2]
Lage/Anzahl von Abluft- und Zuluftöffnungen		gemäss RWA-Konzept [2] [4]	
Notwendigkeit von Massnahmen für den Rauch- und Wärmeabzug (Ziffer 4)	**Industrie-, Gewerbe-, Lagerräume, Parkhäuser, Einstellräume für Motorfahrzeuge** [5]	Brandabschnittsfläche > 2400 m² (ohne SPA) oder Brandabschnittsfläche > 4800 m² (mit SPA): gemäss nutzungsbezogenem RWA-Konzept [2]	
	Atrien	Grundfläche ≤ 2400 m²: prozentuale Vorgabe	Bemessung aufgrund eines rechnerischen Nachweises
		Grundfläche > 2400 m²: gemäss RWA-Konzept [2]	
	Räume mit grosser Personenbelegung, Verkaufsräume	Personen > 1000: gemäss RWA-Konzept [2]	
	Beherbergungsbetriebe Typ a [6]		
	Hochhäuser		
	Bühnen		
	Hochregallager	ohne zweckmässig ausgebaute Feuerwehrzugänge: prozentuale Vorgabe	
	Besondere Nutzungen	gemäss nutzungsbezogenem RWA-Konzept [2]	

Tab. 52: VKF-Brandschutzrichtlinie „Rauch- und Wärmeabzugsanlagen“ (VKF-BSR 22-03)

Entrauchungsöffnungen			RDA
Ermöglichung des Einsatzes mobiler RWG (Klein-/Grosslüfter) für die Feuerwehr			Schutz der Flucht- und Rettungswege vor dem Eindringen von Rauch und Wärme
Direkt ins Freie führende Öffnungen (Öffnungen in Fassaden und Dächern; Schächte, Kanäle)			Fest installierte Einrichtungen, die im Brandfall mittels Ventilatoren wirksam werden
manuell			manuell und automatisch
nicht erforderlich			
prozentuale Vorgabe			messtechnisch (häufig) oder rechnerisch (selten)
nach Absprache mit der Behörde und/oder Feuerwehr			nach Bemessung
Brandabschnittsflächen (BAF) [m^2]			
	ohne SPA	mit SPA	
BA ohne Öffnungen	600 < BAF ≤ 2400	1200 < BAF ≤ 4800	
BA mit Öffnungen	1200 < BAF ≤ 2400	2400 < BAF ≤ 4800	
100 < Personen ≤ 1000			Treppenbreite ≥ 3.6 m (aufgrund Personenbelegung) [7]
			mehr als 4 Geschosse und nur 1 Treppenhaus
			Sicherheitstreppenhäuser
Grundfläche > 100 m^2 und Abstand Decke zu Bühnenöffnung > 1.5 m			
mit zweckmässig ausgebauten Feuerwehrzugängen, die den Einsatz mobiler RWG (Klein-/Grosslüfter) gewährleisten			

Erläuterungen zu Tabelle 52

[1] Per se wird keine automatische Inbetriebsetzung der RWA gefordert. Eine automatische Aktivierung kann aus dem Wirksamkeitsnachweis der RWA oder aufgrund von Vorgaben der Brandschutzbehörde resultieren. [4], Ziffer 3.4, Ziffer 5

[2] Die Wirksamkeit von RWA-Konzepten ist nachzuweisen. Die Nachweise könnten rechnerisch, aber auch mithilfe von experimentellen Methoden geführt werden. Experimentelle Methoden basieren auf Untersuchungen an massstabgetreuen Modellen oder auf am Originalbaukörper durchgeführten messtechnischen Verfahren. [4], Ziffer 5

[3] Ausnahme: Bei Atrien und Hochregallagern liefern die VKF-Brandschutzvorschriften zur Bemessung der NRWA eine prozentuale Vorgabe. [4], Ziffer 4.3.2, Ziffer 4.3.3

[4] Bei Vorliegen eines rechnerischen Nachweises besteht für grosse Hallen mit mehreren Rauchabschnitten in Ausnahmefällen die Möglichkeit, die Ersatzluft über die Oberlichter eines benachbarten Rauchabschnittes nachströmen zu lassen. Dabei ist das Folgende zu beachten:

- Es sind tief liegende, mindestens 1 m unter die Rauchgasschichtgrenze reichende Rauchschürzen zu installieren, sodass die Nachströmung in die raucharme Schicht erfolgt.
- Über der Dachfläche sind Strömungskurzschlüsse, bei denen Brandrauch ins Gebäude zurückströmt, zuverlässig zu verhindern (wie z.B. durch eine Windwächteranlage mit selektiver Ansteuerung der Zuluftöffnungen).

DIN 18232-2 empfiehlt eine solche Zuluftführung über andere Rauchabschnitte nicht, weil die Randbedingungen, unter denen die Erhaltung der Schichtung im Raum möglich ist, nicht generell sichergestellt sind. [26], S. 27

[5] In Industrie-, Gewerbe-, Lagerräumen, Parkhäusern und Einstellräumen für Motorfahrzeuge kann auf den Einbau von RWA verzichtet werden bei:

- Brandabschnitten mit sehr kleiner Brandbelastung (≤ 250 MJ/m^2);
- unter Terrain liegenden oder allseitig geschlossenen Brandabschnitten, wenn deren Fläche ≤ 600 m^2 (≤ 1200 m^2 mit SPA) beträgt;
- über Terrain liegenden, nicht allseitig geschlossenen Brandabschnitten, wenn deren Fläche ≤ 1200 m^2 (≤ 2400 m^2 mit SPA) gross ist. [4], Ziffer 4.2.2

[6] Beherbergungsbetriebe, in denen dauernd oder vorübergehend kranke, pflegebedürftige oder auf fremde Hilfe angewiesene Personen untergebracht sind, wie Krankenhäuser, Alters- und Pflegeheime, Heime für Behinderte, Strafanstalten, geschlossene Erziehungsanstalten.

[7] Auf Verlangen der Brandschutzbehörde sind auch als Fluchtweg dienende Korridore, wie z.B. solche mit sehr hohem Personenaufkommen, mit Rauchschutz-Druckanlagen rauchfrei zu halten. [4], Ziffer 4.2.4

Für den Rauch- und Wärmeabzug und die Rauchlenkung relevante Normen, Richtlinien und technische Regeln

Land	Bezeichnung	Titel	Typ/Status	Jahr
CH	SN EN 12101-1	Rauch- und Wärmefreihaltung, Teil 1: Bestimmungen für Rauchschürzen Systèmes pour le contrôle des fumées et de la chaleur, Partie 1: Spécifications relatives aux écrans de cantonnement de fumée	Produktnorm	2005
D	DIN EN 12101-1			2006
A	ÖNORM EN 12101-1			2006
F	NF EN 12101-1			2005
CH	SN EN 12101-2	Rauch- und Wärmefreihaltung, Teil 2: Bestimmungen für natürliche Rauch- und Wärmeabzugsgeräte Systèmes pour le contrôle des fumées et de la chaleur, Partie 2: Spécifications relatives aux dispositifs d'évacuation naturelle de fumées et de chaleur	Produktnorm	2003
D	DIN EN 12101-2			2003
A	ÖNORM EN 12101-2			2003
F	NF EN 12101-2			2003
CH	SN EN 12101-3	Rauch- und Wärmefreihaltung, Teil 3: Bestimmungen für maschinelle Rauch- und Wärmeabzugsgeräte Systèmes pour le contrôle des fumées et de la chaleur, Partie 3: Spécifications pour les ventilateurs extracteurs de fumées et de chaleur	Produktnorm	2002
D	DIN EN 12101-3			2002
A	ÖNORM EN 12101-3			2002
F	NF EN 12101-3			2002
CH	SN EN 12101-7	Rauch- und Wärmefreihaltung, Teil 7: Entrauchungsleitungen Rauch- und Wärmefreihaltung, Teil 7: Entrauchungskanalstücke Systèmes pour le contrôle des fumées et de la chaleur, Partie 7: Tronçons de conduit de désenfumage	Produktnorm	2011
D	DIN EN 12101-7			2011
A	ÖNORM EN 12101-7			2011
F	NF EN 12101-7			2011
CH	SN EN 12101-8	Rauch- und Wärmefreihaltung, Teil 8: Entrauchungsklappen Systèmes pour le contrôle des fumées et de la chaleur, Partie 8: Volets de désenfumage	Produktnorm	2011
D	DIN EN 12101-8			2011
A	ÖNORM EN 12101-8			2011
F	NF EN 12101-8			2011
CH	SN EN 12101-10	Rauch- und Wärmefreihaltung, Teil 10: Energieversorgung Systèmes pour le contrôle des fumées et de la chaleur, Partie 10: Équipement d'alimentation en énergie	Produktnorm	2005
D	DIN EN 12101-10			2006
A	ÖNORM EN 12101-10			2007
F	NF EN 12101-10			2006
CH	SN EN 1366-8	Feuerwiderstandsprüfungen für Installationen – Teil 8: Entrauchungsleitungen	Prüfnorm	2004
CH	SN EN 1366-9	Feuerwiderstandsprüfungen für Installationen – Teil 9: Entrauchungsleitungen für einen Einzelabschnitt	Prüfnorm	2008
D	DIN 18232-1	Rauch- und Wärmefreihaltung, Teil 1: Begriffe, Aufgabenstellung	Systemnorm	2002

Tab. 53: Für den Rauch- und Wärmeabzug und die Rauchlenkung relevante Normen, Richtlinien und technische Regeln

Für den Rauch- und Wärmeabzug und die Rauchlenkung relevante Normen, Richtlinien und technische Regeln

Land	Bezeichnung	Titel	Typ/Status	Jahr
D	DIN 18232-2	Rauch- und Wärmefreihaltung, Teil 2: Natürliche Rauchabzugsanlagen (NRA); Bemessung, Anforderungen, Einbau	Bemessungsnorm	2007
D	DIN 18232-4	Rauch- und Wärmefreihaltung, Teil 4: Wärmeabzüge (WA); Prüfverfahren	Prüfnorm	2003
D	DIN 18232-5	Rauch- und Wärmefreihaltung, Teil 5: Maschinelle Rauchabzugsanlagen (MRA); Anforderungen, Bemessung	Bemessungsnorm	2012
D	DIN 18232-7	Rauch- und Wärmefreihaltung, Teil 7: Wärmeabzüge aus schmelzbaren Stoffen; Bewertungsverfahren, Einbau	Bemessungsnorm	2008
D	VdS CEA 4020	VdS CEA-Richtlinien für Rauch- und Wärmeabzugsanlagen (RWA): Natürliche Rauch- und Wärmeabzugsanlagen – Planung und Einbau	technische Regel	2009
D	VdS 2159	VdS-Richtlinien für natürliche Rauchabzugsanlagen – Pneumatische Rauch- und Wärmeabzugssysteme – Anforderungen und Prüfmethoden	technische Regel	2005
D	VdS 2579	VdS-Richtlinien für natürliche Rauchabzugsanlagen – Verriegelungseinrichtungen – Anforderungen und Prüfmethoden	technische Regel	2012
D	VdS 2580	VdS-Richtlinien für natürliche Rauchabzugsanlagen – Elektromechanische Antriebe – Anforderungen und Prüfmethoden	technische Regel	2012
D	VdS 2581	VdS-Richtlinien für natürliche Rauchabzugsanlagen – Elektrische Steuereinrichtungen – Anforderungen und Prüfmethoden	technische Regel	2002
D	VdS 2583	VdS-Richtlinien für natürliche Rauchabzugsanlagen – Pneumatische Öffnungsaggregate – Anforderungen und Prüfmethoden	technische Regel	2012
D	VdS 2584	VdS-Richtlinien für natürliche Rauchabzugsanlagen – Branderkennungs- und Ansteuereinrichtungen – Anforderungen und Prüfmethoden	technische Regel	2012
D	VdS 2592	VdS-Richtlinien für natürliche Rauchabzugsanlagen – Elektrische Handansteuereinrichtungen – Anforderungen und Prüfmethoden	technische Regel	2002
D	VdS 2593	VdS-Richtlinien für natürliche Rauchabzugsanlagen – Elektrische Energieversorgungseinrichtungen – Anforderungen und Prüfmethoden	technische Regel	2002
D	VdS 2594	VdS-Richtlinien für natürliche Rauchabzugsanlagen – Elektrische Rauch- und Wärmeabzugssysteme – Anforderungen und Prüfmethoden	technische Regel	2010
D	VdS 2815	Zusammenwirken von Wasserlöschanlagen und Rauch- und Wärmeabzugsanlagen (RWA) – Merkblatt zum Brandschutz	technische Regel	2001
D	VdS 2821	VdS-Richtlinien für maschinelle Rauchabzugsanlagen – Elektrische Steuereinrichtungen – Anforderungen und Prüfmethoden	technische Regel	2004

Tab. 53: Für den Rauch- und Wärmeabzug und die Rauchlenkung relevante Normen, Richtlinien und technische Regeln

Für den Rauch- und Wärmeabzug und die Rauchlenkung relevante Normen, Richtlinien und technische Regeln

Land	Bezeichnung	Titel	Typ/Status	Jahr
D	VdS 2822	VdS-Richtlinien für maschinelle Rauchabzugsanlagen – Elektromechanische Klappenantriebe – Anforderungen und Prüfmethoden	technische Regel	2004
D	VdS 2823	VdS-Richtlinien für maschinelle Rauchabzugsanlagen – Elektrische Handansteuereinrichtungen – Anforderungen und Prüfmethoden	technische Regel	2004
D	VdS 2824	VdS-Richtlinien für maschinelle Rauchabzugsanlagen – Elektrische Energieversorgungseinrichtungen – Anforderungen und Prüfmethoden	technische Regel	2004
D	VdS 2825	VdS-Richtlinien für maschinelle Rauchabzugsanlagen – Systeme – Anforderungen und Prüfmethoden	technische Regel	2004
D	VdS 2881	VdS-Richtlinien für selbsttätige Rauchschürzen – Antriebe – Anforderungen und Prüfmethoden	technische Regel	2004
D	VdS 2882	VdS-Richtlinien für selbsttätige Rauchschürzen – Elektrische Energierversorgungseinrichtungen – Anforderungen und Prüfmethoden	technische Regel	2004
D	VdS 2883	VdS-Richtlinien für selbsttätige Rauchschürzen – Elektrische Handansteuereinrichtungen – Anforderungen und Prüfmethoden	technische Regel	2004
D	VdS 2884	VdS-Richtlinien für selbsttätige Rauchschürzen – Elektrische Steuereinrichtungen – Anforderungen und Prüfmethoden	technische Regel	2004
D	VdS 2885	VdS-Richtlinien für selbsttätige Rauchschürzen – Systeme – Anforderungen und Prüfmethoden	technische Regel	2004
D	VdS 3122	Merkblatt zum Brandschutz – Winderkennungseinrichtungen zur Steuerung windbeeinflusster Rauch- und Wärmeabzugsanlagen	technische Regel	2009
D	VdS 3530	VdS-Richtlinien für Rauchabzugsanlagen – Windgeber und Differenzdruckaufnehmer – Anforderungen und Prüfmethoden	technische Regel	2008
D	VDMA 24177	Ventilatoren zur Rauch- und Wärmefreihaltung von Gebäuden im Brandfall	technische Regel	2009
D	VDMA 24200-1	Gebäudeautomation – Automatisierte Brandschutz- und Entrauchungssysteme (ABE)	technische Regel	2004
A	TRVB S 125	Rauch- und Wärmeabzugsanlagen	technische Regel	1997
F	IT 246	Relative au désenfumage dans les établissements recevant du public	technische Regel	2004

Tab. 53: Für den Rauch- und Wärmeabzug und die Rauchlenkung relevante Normen, Richtlinien und technische Regeln

11.5 Komponenten von RWA

RWA umfassen die folgenden Systemkomponenten:

- natürliche und maschinelle Rauch- und Wärmeabzugsgeräte (RWG) zur Abführung von Rauchgasen aus einem Gebäude;
- Entrauchungsklappen zur Steuerung der Strömung von Rauchgasen in eine Leitung hinein, aus einer Leitung heraus oder innerhalb einer Leitung;
- Entrauchungsleitungen und -kanäle zur Steuerung der Bewegung und/oder Eindämmung von Rauchgasen;
- Energieversorgung;
- Rauchschürzen zur Verhinderung der Rauchausbreitung und zur Begrenzung von Rauchreservoiren.

Tabelle 54 zeigt eine Zusammenstellung der normativen Anforderungen an RWA-Komponenten, unter anderem in Bezug auf

- den Anwendungsbereich,
- die Merkmale und Anforderungen an die Konstruktion und an die Bauteile,
- das aerodynamische Leistungsverhalten,
- die Leistungsanforderungen, Leistungskriterien und Klassifizierung,
- die Kennzeichnung und Dokumentation,
- den Einbau und die Installation,
- die Wartung und Instandhaltung,
- die Prüfverfahren,
- die Konformitätsbewertung,
- die EG-Konformitätserklärung und CE-Kennzeichnung.

RWA-Komponenten (Anforderungen, Prüfverfahren, Kennzeichnung)

Kriterium	**Ziffer/Anhang, Litera**					
	Natürliche RWG SN EN 12101-2 [180]	**Maschinelle RWG SN EN 12101-3** [181]	**Entrauchungsklappen SN EN 12101-8** [182]	**Entrauchungsleitungen SN EN 12101-7** [183]	**Energieversorgung SN EN 12101-10** [184]	**Rauchschürzen SN EN 12101-1** [185]
Anwendungsbereich	1 Anhang ZA.1	1 Anhang ZA.0	1 Anhang ZA.1	1 Anhang ZA.1	1 Anhang ZA.1	1 Anhang ZA.0
Konstruktion, Bauteile (Merkmale, Anforderungen)	4	4	4.2	4.2	4, 5, 7	4
Aerodynamisches Leistungsverhalten	6		5.5			
Leistungsanforderungen, Leistungskriterien, Klassifizierung	7	6	4.1 4.3 4.4	4.1 4.3 4.4	6 8	5
Kennzeichnung, Dokumentation	9	7	7 8.1	7 8.1	9 10	9
Einbau, Installation	10.1		8.2	8.2		7
Wartung, Instandhaltung	10.2		8.3	8.3		8
Prüfverfahren	Anhang A-G	Anhang A-E	5	5	11 12	Anhang A-E
Konformitätsbewertung	8	8	6	6	13	6
EG-Konformitätserklärung, CE-Kennzeichnung	Anhang ZA.2-ZA.4	Anhang ZA.2-ZA.4	Anhang ZA.2-ZA.3	Anhang ZA.2-ZA.3	Anhang ZA.2-ZA.3	Anhang ZA.2-ZA.4

Tab. 54: RWA-Komponenten (Anforderungen, Prüfverfahren, Kennzeichnung)

11.6 Bemessung von RWA

Allgemeines

Der Entwurf und die Planung eines Rauchmanagements für Gebäude erfordern Rechenmethoden und -verfahren, die in der Lage sind, für ein Bemessungsbrandszenarium das produzierte Rauchgasvolumen vorherzusagen. Davon ausgehend, lässt sich das Fördervermögen von mechanischen oder die strömungswirksame Fläche von natürlichen Rauch- und Wärmeabzugsgeräten festlegen.

Weil die europäischen Bemühungen um die Erstellung einer Bemessungsnorm für natürliche und mechanische Rauch- und Wärmeabzugsanlagen (EN 12101-5) gescheitert sind, gelten für die Bemessung und Projektierung solcher Anlagen weiterhin die nationalen Bestimmungen.

Zur Bemessung von RWA stehen

- algebraische (statische) Verfahren und
- numerische (dynamische) Verfahren

zur Verfügung.

Verschiedene Bemessungsverfahren dürfen für die Auslegung einer RWA nicht miteinander kombiniert werden, weil sich die Rahmenbedingungen der einzelnen Verfahren unterscheiden.

Bemessung von RWA mit algebraischen Verfahren

Tabelle 55 zeigt eine Zusammenstellung der in Deutschland und Österreich geregelten tabellarischen Verfahren und Handrechenmethoden zur Bemessung von natürlichen und mechanischen RWA sowie von Wärmeabzügen (WA).

Bemessung von RWA mit numerischen Verfahren

Die Vorgehensweise zur Bemessung von RWA mit numerischen Verfahren (Computersimulationen) kann Kapitel 1.10, Abbildung 1 entnommen werden. Hierbei handelt es sich um die Analyse einer brandschutztechnischen Anlage und nicht um die Brandschutzplanung eines Gebäudes, sodass in Abhängigkeit des Analyse-Umfanges entsprechende Prozessschritte entfallen.

11.7 Spezielle Aspekte der Bemessung, der Ausführung und des Betriebs von RWA

Im Rahmen der Bemessung, der Ausführung und des Betriebs von RWA ist den folgenden Aspekten besondere Beachtung zu schenken (vgl. Tabelle 56):

- Nachströmung der Ersatzluft (Grösse, Lage und aerodynamisch wirksame Fläche von Zuluftöffnungen),
- Abströmung der Rauchgase (Plugholing-Effekt, Anforderungen an RWG und Entrauchungsleitungen) sowie
- Betriebssicherheit, Prüfung und Wartung.

Ferner sind, wie nachfolgend beschrieben, die Wechselwirkungen zwischen

- Raumlüftung und Brandort,
- Thermik und Umgebungstemperatur,
- Thermik und Umgebungsdruck (Windkräfte)

im Auge zu behalten.

Lufttechnische Anlagen

Lufttechnische Anlagen, wie Lüftungs-, Klima- und Absauganlagen, versetzen die Raumluft in Bewegung. Bei grösseren Räumen wiegt die durch die Ventilatoren bewegte Luftmasse mehrere Tonnen, die erst nach einer bestimmten Verzögerungszeit durch äussere und innere Reibungskräfte zum Stillstand gebracht wird (Dichte von Luft: $\rho = 1.2\ kg/m^3$ bei 20 °C). Nicht genügend rasch deaktivierte lufttechnische Anlagen können aus diesem Grund eine unkontrollierte Rauchgasverteilung bewirken und die Schutzzielerfüllung beeinträchtigen.

Im Rahmen von Entrauchungsberechnungen ist daher eine Aussage zu treffen, wie mit möglichen Einflüssen von lufttechnischen Anlagen umgegangen wird. Ein praktikabler Ansatz besteht darin, dass derartige Einflüsse vernachlässigt werden und als Kompensation, hinsichtlich Brennstoffdaten und Aktivierungszeitpunkt der RWA, auf der sicheren Seite liegende Annahmen getroffen werden.

Umgebungstemperatur

Bei NRWA ist vorzugsweise mit dem Sommerfall zu rechnen, weil sich bei hohen Umgebungstemperaturen eine von oben nach unten gerichtete thermische Strömung einstellen kann (Reverse Stack Effect), die den Rauchabzug über Dach beoder verhindert.

Bei MRWA, und in Sonderfällen auch bei NRWA, ist der auslegungsrelevante Fall nicht einfach prognostizierbar, sodass im Zweifelsfall der Sommer- und der Winterfall zu untersuchen sind.

Windkräfte

Windrichtung und -stärke sowie Lage und Grösse bzw. Anzahl der Zuluftöffnungen beeinflussen die Stabilität der Rauchgasschicht. Der Winddruck – als Differenzdruck zwischen Luv- und Leeseite gemessen – kann bis 50 Pa oder mehr betragen.

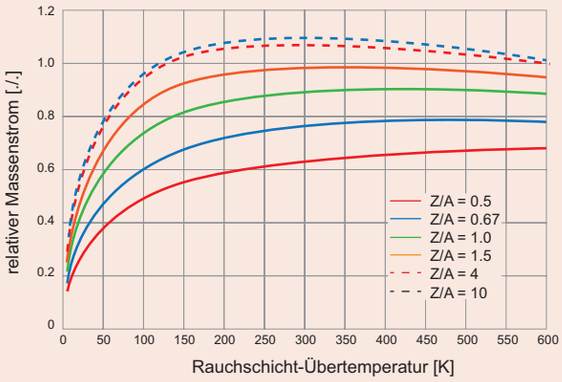
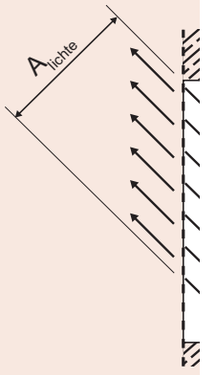
Können die gängigen Empfehlungen zur Minderung negativer Einflüsse von Wind- und Ersatzluftströmungen – wie beispielsweise in DIN 18232-2 beschrieben – nicht beachtet werden, so sind diese in den Berechnungen zu berücksichtigen.

Bei MRWA erübrigt sich in den meisten Fällen die Untersuchung des Windeinflusses.

Bemessung von RWA mit tabellarischen Verfahren und Handrechenmethoden								
Kriterium	**Ziffer**							
	NRWA				**MRWA**			**WA**
	DIN 18232-2 [26]	**VdS CEA 4020** [105]	**TRVB S 125** [30]	**VDI 6019 Blatt 2** [64]	**DIN 18232-5** [27]	**TRVB S 125** [30]	**VDI 6019 Blatt 2** [64]	**DIN 18232-7** [186]
Anwendungsbereich	1	1.1	5	1	1	5	1	1
Schutzziele		1.3	4	7		4	7	
Bemessungsgrundlagen	5	4.1 4.2	6	5 8.1	4	6	5 8.1	5
Bemessungsverfahren	6	4.3	7 8	6 8.2 8.3 8.4	5	7 8	6 8.2 8.3 8.4	6 7
Rauchabschnittsfläche	5.4	7	6.1	8.1	4.4	6.1	8.1	
Anordnung der RWG	7.2	5.1 5.4	12.1	8.6.2	7		8.7.1	8
Anforderungen an RWG	7.1	0 9	12.2	8.8	5	13.1		
Einbau der RWG	7	10	12.3		7	13.2		8
Dimensionierung der RWG	7.2.2	5.2 5.3	9.1	8.6 8.8	7	9.2	8.7	6 7
Auslösung, Rückstellung	7.2.4	6	10			10		
Zuluftflächen	5.5	8	9.3 9.4	8.5 8.8	4.5	9.4	8.5 8.8	
Energieversorgung, Steuerung			11		8 9	11		
Zusammenwirken mit Löschanlagen	8	1.1	7.2.4		B.3	7.2.4		
Errichtung, Prüfung, Betrieb	10.1	11.2	16 18			16 18		
Wartung, Instandhaltung	10.2 10.3	11.2	17			17		

Tab. 55: Bemessung von RWA mit tabellarischen Verfahren und Handrechenmethoden

Spezielle Aspekte der Bemessung, der Ausführung und des Betriebs von RWA

Aspekt	NRWA	MRWA
1. Nachströmung von Ersatzluft		
Grösse von Zuluftöffnungen	**Zuluft-/Abluftflächen-Verhältnis** NRWA reagieren empfindlich auf zu geringe Zuluftöffnungsflächen. Beispielsweise bewirkt eine Verminderung der Zuluftflächen bis zum Zuluft-/Abluftflächen-Verhältnis Z/A = 0.5 etwa 40 % Massenstromabnahme gegenüber Zuluftflächen mit dem von DIN 18232-2 geforderten Verhältnis Z/A = 1.5. Hingegen bewirken 4- oder gar 10-fache Zuluftflächen kaum 10 % Massenstromzunahme. [81], S. 118  Abb. 122: Einfluss der effektiven Zuluftflächen, bezogen auf die effektive Abluftfläche bei NRWA **Zuluftgeschwindigkeit** Unter dem Aspekt des Personenschutzes ist die mittlere Strömungsgeschwindigkeit in den Zuluftöffnungen auf 1 m/s zu begrenzen. [30], S. 16; [64], S. 9; [81], S. 118-119 **Maschinelle Zufuhr der Ersatzluft** Die Zuluft lässt sich auch maschinell zuführen, wobei hinsichtlich des Personenschutzes die maximale Strömungsgeschwindigkeit 1 m/s betragen darf. [30], S. 17; [81], S. 118-119	**Zuluftgeschwindi** Die Nachströmges S. 16; [64], S. 9; [8 Die von VKF-BSR erscheint zu hoch! **Unterdruck** Bei knapp bemess 50 Pa nicht überst meidung von Gebä **Maschinelle Zufu** Bei MRWA kann in Zufuhr der Zuluft z Volumina von Zu- u „Push-Pull“-Syste zitiert nach [96]
Lage und wirksame Fläche von Zuluftöffnungen	Der Abstand zwischen der Oberkante der Zuluftöffnung und der unteren Rauchgasschichtgrenze sollte bei NRWA und MRWA • mindestens 1.0 m, • in günstigen Fällen, wie z.B. bei maximal 1.25 m breiten Nachströmöffnungen, mindestens 0.5 m und • in ungünstigen Fällen, wie z.B. bei aufwärts gerichteten Strömungen, mindestens 1.5 m betragen. [26], S. 9; [27], S. 8 Die wirksamen bzw. effektiven Flächen von Zuluftöffnungen für NRWA und MRWA errechnen sich als Produkte aus den Rohbau-Öffnungsmassen und den Korrekturfaktoren c_z. Die wirksame – oder effektive, freie bzw. lichte – Öffnungsfläche A_{lichte} ist der freie Querschnitt einer lufttechnischen Einrichtung. Dagegen bezeichnet die geometrische Öffnungsfläche A_{geo} – oder Nennfläche – die Anströmfläche der lufttechnischen Einrichtung. (vgl. Abbildung 123). [64], S. 24 [1)] Den in Tabelle 56.1 angegebenen Öffnungswinkeln darf jeweils ein Grenzmass von ± 5° zugeordnet werden. [26], S. 9	 Abb. 123: Geometris und lichte Öffnungs

Tab. 56: Spezielle Aspekte der Bemessung, der Ausführung und des Betriebs von RWA

indigkeit

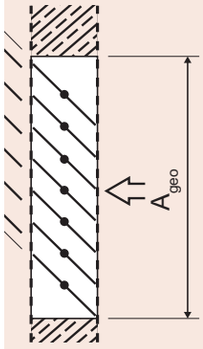
ngeschwindigkeit der Zuluft ist auf 1 m/s zu begrenzen. [27], S. 6; [30], 9; [81], S. 118-119

BSR 22-03 als zulässig angegebene Grenzgeschwindigkeit von 5 m/s och! [4], Ziffer 3.3,

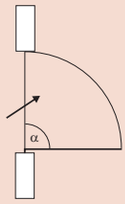
messenen Zuluftöffnungen ist zu überprüfen, ob der Unterdruck im Raum ersteigt (zur Begrenzung der Öffnungskräfte von Fluchttüren und zur Ver- Gebäudeschäden).

Zufuhr der Ersatzluft

nn im Verlaufe eines sich ändernden Brandgeschehens eine maschinelle uft zu erheblichen Schwankungen der Differenzdrücke führen, falls die Zu- und Abluft nicht gleich gross sind. Deshalb kann die Installation solcher ysteme nicht vorbehaltlos empfohlen werden. [30], S. 17; [81], S. 120; 3]



netrische ungsfläche

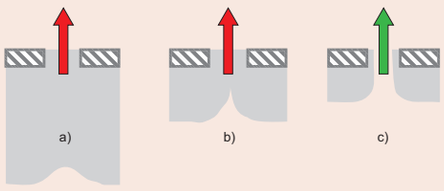
Öffnungsart	Öffnungs-winkel	Korrektur-faktor c_z
Tür-/Toröffnungen, Maschengitter		0.70
Jalousien	90°	0.65
Dreh-/Kippflügel, nach innen öffnend 	90°	0.65
	≥ 75°	0.60
	≥ 60°	0.50
	≥ 45°	0.40
	≥ 30°	0.30

Tab. 56.1: Korrekturfaktoren c_z für unterschiedliche Öffnungsarten von Zuluftöffnungen

Spezielle Aspekte der Bemessung, der Ausführung und des Betriebs von RWA

Aspekt		NRWA	MRWA
2. Abströmung von Rauchgasen			
Kritischer Volumen-/ Massenstrom (Plugholing)		Sind die Anzahl Abluftöffnungen (bei NRWA) bzw. Absaugöffnungen (bei MRWA) und die Rauchgasschichtdicke zu gering, so wird Luft von der raucharmen Schicht durch die Rauchschicht zu den Rauch- und Wärmeabzugsgeräten (RWG) abgezogen, was im Fachjargon als „Plugholing“ bezeichnet wird (vgl. Abbildung 124). Zwecks Vermeidung von Plugholing ist der von einem NRWG bzw. MRWG abzuführende Volumen- bzw. Massenstrom durch die Wahl einer ausreichend grossen Anzahl Geräte zu begrenzen. Der von einem RWG maximal abführbare Massenstrom beträgt: [188], S. 4/407 $\dot{m}_{max} = 1.5 \cdot \{g \cdot (H - z)^5 \cdot [(T_s - T_\infty) / T_s] \cdot (T_\infty / T_s)\}^{0.5}$ Der von einem RWG maximal abführbare Volumenstrom beträgt: [31], S. 14 $\dot{V}_{max} = 4.16 \cdot \gamma \cdot d_s^{2.5} \cdot [(T_s - T_\infty) / T_\infty]^{0.5}$ $\dot{m}_{max}$ maximaler Massenstrom pro RWG ohne Plugholing [kg/s] $\dot{V}_{max}$ maximaler Volumenstrom pro RWG ohne Plugholing [m³/s] d_s Dicke der Rauchgasschicht unterhalb der tiefsten Stelle der Abluft-/Absaugöffnung ($d_s = H - z$) [m] g Erdbeschleunigung (9.81 m/s²) H Abstand zwischen der Brandgutoberfläche und der tiefsten Stelle der Abluft-/Absaugöffnung [m] T_s absolute Temperatur in der Rauchgasschicht [K] T_∞ absolute Umgebungstemperatur [K] z Abstand zwischen der Brandgutoberfläche und der unteren Grenzfläche der Rauchgasschicht [m] γ Faktor für die Situierung der Absaugöffnung [-] $\gamma = 1.0$ für Abluft-/Absaugöffnung mit einem Wandabstand $\geq 2 \cdot D_A$ $\gamma = 0.5$ für Abluft-/Absaugöffnung mit einem Wandabstand $< 2 \cdot D_A$ D_A Durchmesser der Abluft-/Absaugöffnung, wobei $D_A = 2 \cdot a \cdot b / (a + b)$ für rechteckige Abluft-/Absaugöffnung der Länge a und Breite b Das Nomogramm der DIN 18232-5 zur Ermittlung des über eine einzelne Absaugstelle maximal abführbaren Rauchgasvolumenstroms basiert auf der in NFPA 204 dargestellten Plugholing-Gleichung (vgl. Abbildung 126). [27], S. 19; [31], S. 14 [2)]	
RWG	**Anforderungen**	An NRWG bestehen Anforderungen hinsichtlich: • den automatischen Auslöseelementen; • des Öffnungsmechanismus; • der Grösse und der Form der geometrischen Öffnungsfläche; • des Leistungsverhaltens, wie - Funktionssicherheit (Anzahl Öffnungszyklen), - Öffnen unter Last (Schnee- und Seitenwindlast), - Belastung unter niedriger Umgebungstemperatur, - Windbelastung, - Wärmebeständigkeit (unter Brandbelastung). [180], Ziffer 4, Ziffer 7	An MRWG bestehe • der Anwendung • der Motorleistu • des Leistungsv - Funktionsdau - Fördervolum - äussere Ober - Windbelastur - Schneebelast - Belastung un - Zuverlässigke

Tab. 56: Spezielle Aspekte der Bemessung, der Ausführung und des Betriebs von RWA



Fall a): Dicke Rauchschicht unter der Absaugstelle

Fall b): Zur Absaugstelle strömt gerade nur noch Rauch

Fall c): Bei der Absaugstelle strömt Rauch aus der Rauchschicht und Luft aus der raucharmen Schicht ab (Plugholing)

Abb. 124: Plugholing

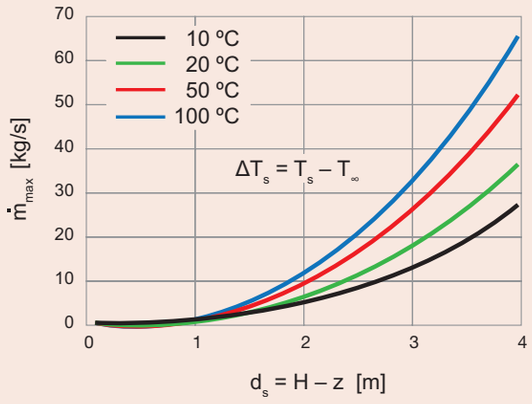


Abb. 125: Einfluss von Dicke und Temperaturerhöhung der Rauchgasschicht auf den maximalen Massenstrom pro RWG

stehen Anforderungen hinsichtlich:

dung;

eistung;

ngsverhaltens, wie

sdauer unter Temperaturbeanspruchung (Temperaturzeitklassifizierung),

lumen und statischer Druck bei hohen Temperaturen,

Oberflächen- und Kühllufttemperatur von wärmegedämmten Geräten,

astung,

elastung,

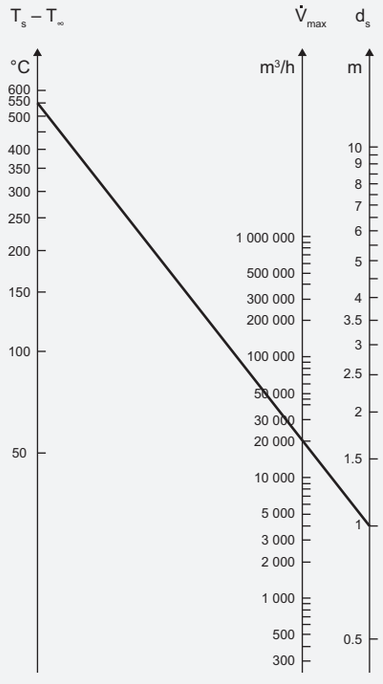
g unter niedriger Umgebungstemperatur,

igkeit (Funktionssicherheit). [181], Ziffer 4, Ziffer 6

Erläuterungen zu Tabelle 56

[1] Der Korrekturfaktor c_z stellt die Relation zwischen Anströmfläche und freiem Querschnitt her und ist nicht zu verwechseln mit dem Durchflussbeiwert c_v. Anhand des Durchflussbeiwertes c_v lässt sich aus der geometrischen Anströmfläche A_{geo} der lufttechnischen Einrichtung die aerodynamisch wirksame Fläche A_w ermitteln, die ein Vergleichswert zur Beurteilung des Druckverlusts unterschiedlicher Konstruktionen bei gleichem Durchfluss darstellt ($A_w = A_{geo} \cdot c_v$). Diesbezüglich besteht zwischen DIN 18232-2 und VDI 6019 Blatt 2 einerseits sowie TRVB 125 S andererseits ein Widerspruch. [26], S. 9; [30], S. 15-16, S. 46-47; [64], S. 25

[2] Nomogramm der DIN 18232-5 zur Ermittlung des über eine einzelne Absaugstelle maximal abführbaren Rauchgasvolumenstroms.



d_s = 1 m, $T_s - T_\infty$ = 550 °C

→ $\dot{V}_{max}$ = 20000 m³/h

Abb. 126: Beispielanwendung des Nomogramms nach DIN 18232-5

Spezielle Aspekte der Bemessung, der Ausführung und des Betriebs von RWA			
Aspekt		**NRWA**	**MRWA**
2. Abströmung von Rauchgasen			
Rauch- und Wärmeabzugsgeräte (RWG)	**Klassifizierung**	NRWG werden wie folgt klassifiziert: • Funktionssicherheit (Re A, Re 50, Re 1000), • Schneelast (SL 0, SL 125, SL 250, SL 500, SL 1000, SL A), • niedrige Umgebungstemperatur (T(-25), T(-15), T(-05), T(00), TA), • Windlast (WL 1500, WL 3000, WL A), • Wärmebeständigkeit (B 300, B 600, B A). [180], Ziffer 7	MRWG werden wi • Anwendungskl - wärmegedän - geeignet/ung - Abzugsgerät - Kühlluftleitun • Motorisations • Temperaturzeitl klassifiziert); • Schneelast (SL • niedrige Umgeb • Funktionssiche
	Kennzeichnung	NRWG sind zu kennzeichnen mit: • dem Namen oder dem Firmenzeichen des Lieferanten/Herstellers, • dem Typ und Modell, • dem Herstellungsjahr, • den technischen Kenngrössen der äusseren Energiequelle, wie z.B. Leistung, Strom, Spannung, Druck (etwaige Druckpatronen müssen mit der Masse und Art des verendeten Gases, der Füllmenge und der nominalen Temperatur gekennzeichnet sein), • der Temperatur der thermischen Auslöseeinrichtung (sofern eingebaut), • der aerodynamisch wirksamen Öffnungsfläche in m^2, • den Klassen für Funktionssicherheit, Windlast, Schneelast, niedriger Umgebungstemperatur und Wärmebeständigkeit, • der Normbezeichnung und dem Ausgabejahr der Europäischen Norm, • dem allfälligen Vermerk „nur geeignet für den Einbau in Seitenwänden in Verbindung mit einer windrichtungsabhängigen Steuereinrichtung“. [180], Ziffer 9	MRWG sind zu ke • dem Namen od • dem Typ und M • den Anwendun • der Temperatur • der maximalen A • der Funktionsc • dem Herstellun • den technische • der Motorisolat • der Schneelastl • der Nummer ur
	Einbauregeln	NRWG • müssen strömungstechnisch korrekt montiert werden; [26], S. 18 • sind, möglichst gleichmässig verteilt, innerhalb des Rauchabschnittes anzuordnen; [26], S. 18 • dürfen auf Dachpartien, bei denen durch Windeinflüsse Überdruck- oder Windsogbelastungen entstehen können, nur dann eingebaut werden, wenn sie den dadurch bedingten Anforderungen nachweislich genügen; [26], S. 18 • sollen mit ihren Austrittsöffnungen mindestens 25 cm über angrenzenden Dachflächen liegen; [26], S. 18 • sollen zweckmässigerweise in grösserer Anzahl, dafür mit kleineren Abmessungen (statt umgekehrt) installiert werden, ohne dabei die Mindestfläche von 1 m^2 geometrischer Öffnungsfläche zu unterschreiten; [26], S. 18 • sollten zur Vermeidung von Plugholing eine kleinere Seitenlänge bzw. einen Durchmesser aufweisen, die/der den Wert von $1.5 \cdot z^{1/2}$ (z = Höhe der Rauchgasschicht) nicht überschreitet; [26], S. 18	Bei MRWG ist dara • die Absaugstell werden; • Absaugstellen gleichmässig ve • der maximale V Abhängigkeit d festgelegt wird • zwecks Erzeug chungsanlage • nicht nachweisl dungsklasse er gestellt werden • bei Ventilatoren fern nicht zur Z

Tab. 56: Spezielle Aspekte der Bemessung, der Ausführung und des Betriebs von RWA

n wie folgt klassifiziert:

gsklasse, nämlich

edämmt/nicht wärmegedämmt,

/ungeeignet für den Betrieb innerhalb eines Rauchabschnittes,

erät mit Doppelfunktion/nur als Not-Abzugsgerät,

itungsanschluss erforderlich/nicht erforderlich;

ionsklasse (B, C, E, F, H);

zeitkategorie (F 200, F 300, F 400 (90), F 400 (120), F 600, F 842, nicht);

: (SL 0, SL 125, SL 250, SL 500, SL 1000, SL A);

ngebungstemperatur (T(-25), T(-15), T(-05), T(00), TA);

icherheit (Re A, Re 50, Re 1000). [181], Ziffer 4, Ziffer 6

u kennzeichnen mit:

n oder dem Firmenzeichen des Lieferanten/Herstellers,

nd Modell,

ndungsklassen,

aturzeitklasse,

alen Absaugtemperatur in °C,

onsdauer in Minuten,

ellungsjahr,

schen Daten (z.B. Leistung, Strom, Spannung, Druck, Volumenstrom),

solationsklasse,

elastklasse,

er und dem Ausgabejahr der Europäischen Norm. [181], Ziffer 7

darauf zu achten, dass

gstellen und/oder Einzelventilatoren strömungstechnisch korrekt montiert

llen und/oder Einzelventilatoren innerhalb des Rauchabschnittes möglichst sig verteilt angeordnet werden; [27], S. 17

ale Volumenstrom einer Absaugstelle und/oder eines Einzelventilators in eit der Ausrichtung der Absaugöffnung bzw. Dicke der Rauchgasschicht wird (zur Vermeidung von Plugholing); [27], S. 17-19

zeugung von Unterdruck, Ventilatoren vorzugsweise am Ende der Entrauage platziert werden (Vermeidung von Rauchübertragungen);

weislich für Brandbeanspruchung geeignete Zentralventilatoren der Anwense entsprechend ausserhalb des zu entrauchenden Rauchabschnittes aufrden; [27], S. 19

oren die Eintauchtiefe von temperaturbeanspruchten Schwingungsdämpur Zerstörung der elastischen Anschlussstutzen führt; [81], S. 135 [3)]

Spezielle Aspekte der Bemessung, der Ausführung und des Betriebs von RWA			
Aspekt		**NRWA**	**MRWA**
2. Abströmung von Rauchgasen			
RWG	**Einbauregeln** (Fortsetzung)	• sollen zu Aussenwänden einen Abstand von mindestens 5 m und höchstens 10 m aufweisen; [26], S. 18 • müssen bei Dachneigungen ≥ 15° erwiesenermassen seitenwindunempfindlich sein; [105], S. 14 • sind mit genügend grossen Sicherheitsabständen zu brennbarem Material einzubauen; [191], Ziffer 5.3.1 • dürfen über abgehängten Decken montiert werden, falls der Abstand zwischen der Deckenverkleidung und der Abluftöffnung maximal 0.5 m beträgt und die Deckenverkleidungen einen Öffnungsgrad von mindestens 50 % aufweist (bei einem Öffnungsgrad von weniger als 50 %, ist eine objektbezogene Beurteilung – gegebenenfalls mit einer Strömungsberechnung – durchzuführen); [105], S. 20-21 • erfordern bei seitenwindempfindlichen Einbausituationen eine windrichtungsabhängige Ansteuerung, wie beispielsweise im Merkblatt VdS 3122 spezifiziert. *[192]*	• zwischen Rauc mieden wird, in - Rauchaustritt werden oder - bei Einbau in Ansaugstelle Rauchaustritt - bei Einbau in Rauchaustritt nicht oberhalb - Rauchaustritt ordnet werde stellen minde Rauchaustritt • zu brennbarem [191], Ziffer 5.3
Entrauchungsleitungen	**Anforderungen**	An Entrauchungsleitungen bestehen Anforderungen hinsichtlich: • des Raumabschlusses (E), • der Wärmedämmung (I) (nur für Mehrfachabschnitte), • der Rauchdichtigkeit (S), • der mechanischen Formstabilität, • der Aufrechterhaltung des Querschnittes. [183], Ziffer 4.1 Bauteile von Entrauchungsleitungen, wie Tragkonstruktionen (z.B. Dübel, Gewindestangen und Traversen), Di Kompensatoren, Leitbleche, Strömungsanzeigen, Gitter etc., müssen die Anforderungen der Entrauchungsleit Grundsätzen der SN EN 1366-8 oder SN EN 1366-9 geprüft worden sein. [183], Ziffer 4.2; *[193] [194]* Die Erfüllung der Anforderungen wird mit der EU-Konformitätsbewertung, welche die Basis für die CE-Kennze bestätigt verbindlich die Erfüllung der festgelegten Anforderungen. Bei feuerwiderstandsfähigen Lüftungsleitungen wird der Erhalt des Querschnittes nicht gefordert. Deshalb dü eingesetzt werden.	
	Klassifizierung	Entrauchungsleitungen werden wie folgt klassifiziert: • Feuerwiderstandsklasse (E, EI), • Bezeichnung(en) der Eignung für vertikale und/oder horizontale Anwendung (v_e, h_o), • Leckagerate (S), • Gebrauchstauglichkeit bezüglich Unterdruck (500, 1000, 1500). [183], Ziffer 4.3-4.4	
	Kennzeichnung	Entrauchungsleitungen sind zu kennzeichnen mit: • Name oder Identifizierungskennzeichnung des Herstellers, • Modell/Typ, • Klassifizierung für die Feuerwiderstandsfähigkeit und ähnliche Angaben nach EN 13501-4, • allfällige Klassifizierung S (Wortzusatz „leckagebewertet“), • Herstellungsdatum, • Nummer und Jahr der Veröffentlichung der Europäischen Norm. [183], Ziffer 7	

Tab. 56: Spezielle Aspekte der Bemessung, der Ausführung und des Betriebs von RWA

auchaustrittsstellen und Zuluftöffnungen ein Strömungskurzschluss ver-
d, indem

strittsstellen mindestens 2.5 m oberhalb von Ansaugstellen angeordnet
oder

u in Wänden der horizontale Abstand zwischen Rauchaustritts- und
tellen mindestens 8 m beträgt und Ansaugöffnungen nicht oberhalb der
strittsstellen angeordnet werden oder

u in Flachdächern ohne Aufbauten der horizontale Abstand zwischen
stritts- und Ansaugstellen mindestens 8 m beträgt und Ansaugöffnungen
rhalb von Rauchaustrittsstellen angeordnet werden oder

stritts- und Ansaugstellen an unterschiedlichen Fassadenseiten ange-
erden, der horizontale Abstand zwischen Rauchaustritts- und Ansaug-
indestens 2.5 m beträgt und Ansaugöffnungen nicht oberhalb von
strittsstellen angeordnet werden; [27], S. 19-20

rem Material genügend grosse Sicherheitsabstände eingehalten werden.
5.3.1

), Dichtungsmittel, Abschlüsse von Revisionsöffnungen, Schalldämpfer,
gsleitung erfüllen, in die sie ein- bzw. angebaut werden, und nach den

nnzeichnung bildet, dargelegt. Die EU-Konformitätserklärung erklärt und

lb dürfen diese, ohne weitere Prüfungen, nicht als Entrauchungsleitungen

Erläuterungen zu Tabelle 56

[3] Im Rahmen von Brandversuchen bei 600 °C konnten sich vorgespannte Schraubenfeder-Schwingungsdämpfer nur bis zum Aufsitzen der Windungen verformen, wogegen Schwingungsdämpfer mit Aluminiumguss-Gehäusen zerstört wurden. [81], S. 135

[4] Der Funktionserhalt

- bezweckt eine ausreichend lange Funktionsfähigkeit der NRWA bzw. MRWA im Brandfall;
- umfasst sowohl den **mechanischen Funktionserhalt** der NRWG bzw. MRWG als auch den **elektrischen Funktionserhalt** der dazugehörenden elektrischen Betriebsmittel;
- muss auch bei möglichen Wechselwirkungen mit anderen Anlagen (z.B. Wasserbenetzung durch Sprinkleranlagen) oder Einrichtungen (z.B. im Brandfall herunterfallende haustechnische Installationen) gewährleistet bleiben;
- ist lediglich im Rahmen eines spezifischen Projektes detailliert beschreibbar.

Der Funktionserhalt von elektrischen Betriebsmitteln lässt sich prinzipiell wie folgt realisieren:

- Aufstellung in feuerwiderstandsfähigen Räumen mit kleiner Brandgefährdung (z.B. Sanitärverteilräume),
- Abtrennung mit feuerwiderstandsfähigen Gehäusen, Kanälen oder Schächten (wobei die Zulässigkeit der Innenraumtemperatur und der Luftfeuchtigkeit im Brandfall gegebenenfalls nachzuweisen ist),
- Verlegung in Beton, in Mauerwerk oder unter Putz mit entsprechender Dicke,
- Erfüllung der Prüfanforderungen nach DIN 4102-12 bei elektrischen Kabelanlagen (vgl. Funktionserhaltsklassen nach Tabelle 56.2). [187], Ziffer 5.2.1; [189], Ziffer 3.3.3

Funktionserhaltsklassen	**Funktionserhalt** [min]
E 30	≥ 30
E 60	≥ 60
E 90	≥ 90

Tab. 56.2: Funktionserhaltsklassen E von elektrischen Kabelanlagen nach DIN 4102-12

[5] Elektrische Betriebsmittel sind Produkte, die zum Zweck der Erzeugung, Umwandlung, Übertragung, Verteilung oder Anwendung von elektrischer Energie benutzt werden, wie z.B. Maschinen, Transformatoren, Schalt-, Steuer- und Messgeräte, Schutzeinrichtungen, Kabel und Leitungen, elektrische Verbrauchsmittel. [190], Ziffer 2.1.16.01

Bei der Planung und Dimensionierung von elektrischen Betriebsmitteln müssen durch Temperaturerhöhung induzierte Änderungen von elektrischen Widerständen, Strömen und Leistungen berücksichtigt werden.

Spezielle Aspekte der Bemessung, der Ausführung und des Betriebs von RWA			
Aspekt		**NRWA**	**MRWA**
2. Abströmung von Rauchgasen			
Entrauchungsleitungen	**Einbauregeln**	Entrauchungsleitungen sind nach den von den Herstellern zur Verfügung zu stellenden Installationsanleitungen • Tragkonstruktion (z.B. Gewindegrössen, Setztiefen, Abstände der Aufhängungen zueinander und zu Kanalw Traversen), • Dehnungsausgleich (z.B. Länge der Dehnungsaufnahme, Abstände zwischen Kompensatoren), • Abdichtung von Durchbrüchen, • Dichtungsmittel zwecks Verringerung des Luft-/Gasaustritts, • Installationsverfahren, • Arbeitsschutz enthalten müssen. [183], Ziffer 8.1-8.2; [195]	
3. Betriebssicherheit, Prüfung, Wartung			
Funktionserhalt [4]		Die Dauer des Funktionserhaltes von NRWA ist auf • die Schutzziele und Brandszenarien, • das objektbezogene Brandschutzkonzept, • die geforderte Klassifizierung der NRWG betreffend Wärmebeständigkeit (mechanischer Funktionserhalt), • die Verlegeart von elektrischen Betriebsmitteln (elektrischer Funktionserhalt) [5] abzustimmen. Der mechanische Funktionserhalt von NRWG wird anhand der von SN EN 12101-2 spezifizierten Leistungsanforderungen und Klassifizierungen definiert. *[180]* Der elektrische Funktionserhalt von NRWA kann entfallen, wenn • die NRWA als Fail-Safe-System konzipiert ist, sodass bei einem Ausfall der Energieversorgung oder bei einem Kurzschluss (Fail) die NRWA automatisch den sicheren Zustand (Safe) – also die Entrauchungsposition – einnimmt oder [6] • die Leitungsanlagen der NRWA in Räumen verlegt sind, die durch automatische Rauchmelder überwacht werden und das Ansprechen eines Rauchmelders bewirkt, dass die NRWA in die Entrauchungsposition fährt. [187], Ziffer 5.3.2, Litera e; [196], S. 236 Ansonsten muss der elektrische Funktionserhalt, zumindest im zu entrauchenden Brandabschnitt, gewährleistet sein.	Die Dauer des Fun • die Schutzziele • das objektbezo • die geforderte T halt), • die Verlegeart v abzustimmen. Der mechanische spezifizierten Leist Der elektrische Fu Brandabschnitt, g
Integrale Tests		Ein integraler Systemtest der RWA bezweckt die Überprüfung sämtlicher der RWA dienenden, automatisch ar gen, Entrauchungsklappen, Zuluftöffnungen, Energieversorgung, Rauchschürzen, die dazugehörenden Installa die korrekte Ansteuerung und Funktion sowie deren Bescheinigung. Bezüglich Aufbau, Ablauf und Protokollierung von integralen Tests sei auf VKF-BSE 117-03 verwiesen. *[172]*	
Inspektion, Wartung, Instandsetzung		Die Lieferanten/Hersteller müssen für die Wartung ihrer RWA-Komponenten – wie NRWG, MRWG, Entrauchun Anweisungen erstellen, die folgende Angaben enthalten: • Inspektions- und Wartungsverfahren, • empfohlene Häufigkeit der Betriebsüberprüfungen und Reinigungen/Wartung, • empfohlene Überprüfungen auf Korrosion. [180], Ziffer 10.2 Die Inspektionen sollten durch entsprechend qualifiziertes Personal, mindestens einmal im Jahr, erfolgen. [26], S Beim Austausch von Verbrauchs- oder Ersatzteilen ist darauf zu achten, dass das ordnungsgemässe und stör sichergestellt ist. Es dürfen nur Verbrauchs- oder Ersatzteile mit entsprechender Anerkennung oder Originalteil	

Tab. 56: Spezielle Aspekte der Bemessung, der Ausführung und des Betriebs von RWA

ngen einzubauen, die Einzelheiten betreffend

nalwänden, maximale Zugbelastung/Zugspannung in Gewindestangen/

Funktionserhaltes von MRWA ist auf

ziele und Brandszenarien,

bezogene Brandschutzkonzept,

erte Temperaturzeitklassifizierung der MRWG (mechanischer Funktionser-

art von elektrischen Betriebsmitteln (elektrischer Funktionserhalt) [5)]

che Funktionserhalt von MRWG wird anhand der von SN EN 12101-3 Leistungsanforderungen und Klassifizierungen definiert. *[181]*

e Funktionserhalt von MRWA muss, zumindest im zu entrauchenden tt, gewährleistet sein (vgl. Abbildung 127). [196], S. 236 [7)]

h angesteuerten Komponenten – wie NRWG, MRWG, Entrauchungsleitun-tallationen etc. – sowie das Zusammenwirken derselben. Dies beinhaltet

2]

chungsleitungen und -klappen, Zuluftöffnungen, Energieversorgung etc. –

6], S. 19-20; [105], S. 22

störungsfreie Zusammenwirken der Anlagenteile (Systemkompatibilität) alteile verwendet werden.

[6)] Bei Fail-Safe-Systemen ist den durch Fehlauslösungen allfällig verursachten Schäden Beachtung zu schenken.

[7)] Elektrischer Funktionserhalt von MRWA im zu entrauchenden Brandabschnitt.

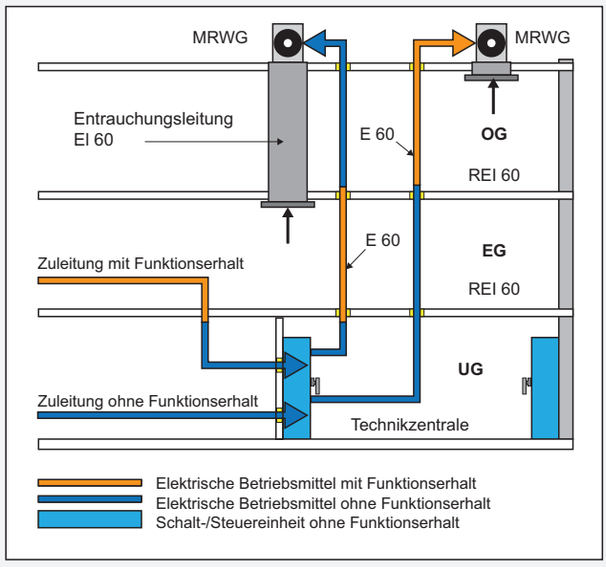


Abb. 127: Verlegung elektrischer Betriebsmittel in zu entrauchenden Brandabschnitten (EG, OG)

Teil III
Verzeichnisse

12 Verzeichnisse

12.1 Quellenverzeichnis

Normen, Richtlinien, Merkblätter werden mit **fett** geschriebenen, Publikationen, Fachartikel, Berichte, Handbücher mit normal geschriebenen Indizes gekennzeichnet.

[1] Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften Nr. L 40/12 bis Nr. L 40/26 vom 11.02.1989. Richtlinie 89/106/EWG des Rates vom 21.12.1988.

[2] Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften Nr. C 62/23 bis Nr. C 62/72 vom 28.02.1994. Grundlagendokument „Wesentliche Anforderungen“ Nr. 2, „Brandschutz“.

[3] Vereinigung Kantonaler Feuerversicherungen (VKF): Brandschutznorm VKF-BSN 1-03. Bern: Eigenverlag 2003.

[4] Vereinigung Kantonaler Feuerversicherungen (VKF): Brandschutzrichtlinie VKF-BSR 22-03, Rauch- und Wärmeabzugsanlagen. Bern: Eigenverlag 2003.

[5] Schneider, U. u.a.: Ingenieurmethoden im baulichen Brandschutz: Grundlagen, Normung, Brandsimulationen, Materialdaten und Brandsicherheit. Kontakt & Studium, Band 531. 7. Auflage, Renningen: Expert Verlag 2014.

[6] Vereinigung zur Förderung des Deutschen Brandschutzes e.V. (vfdb): Richtlinie 01/01, Brandschutzkonzept. Köln: VdS Schadenverhütung Verlag 2008.

[7] Österreichisches Institut für Bautechnik (OIB): Leitfaden Abweichungen im Brandschutz und Brandschutzkonzepte. Wien: Eigenverlag 2011.

[8] Schweizerisches Institut zur Förderung der Sicherheit: Sicherheitsdokument 1101-00.d, Brandschutzkonzepte. Zürich: Eigenverlag 1996.

[9] International Organization for Standardization (ISO): ISO 23932, fire safety engineering. General principles. Genf: Eigenverlag 2009.

[10] Society of Fire Protection Engineers (SFPE): SFPE Engineering guide to performance-based fire protection. 2. Auflage, Bethesda: Eigenverlag 2007.

[11] Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein (SIA): SN EN 1991-1-2 (Eurocode 1), Einwirkungen auf Tragwerke. Teil 1-2: Allgemeine Einwirkungen. Brandeinwirkungen auf Tragwerke. Zürich: Eigenverlag 2002.

[12] Wilk, E.; Weskamp, F.; Lessig, R.: Rauchbelastung in Rettungswegen und im Angriffsweg der Feuerwehr. Betrachtungen aus experimenteller und praktischer Sicht. In: vfdb-Zeitschrift, 57. Jahrgang, Nr. 2 (2008), S. 73-80.

[13] Kaiser, G.: „O.R.B.I.T. 2010“, aktuelle Erkenntnisse zu medizinischen und rettungstechnischen Grundlagen der Planung im Feuerwehrwesen. Manuskript zum Vortrag anlässlich der 60. Jahresfachtagung der Vereinigung zur Förderung des Deutschen Brandschutzes e.V. (vfdb) vom 23. Mai 2012 in Köln. Giftinformationszentrum-Nord (GIZ)/Universitätsmedizin Göttingen (UMG). http://www.giz-nord.de/cms/index.php/vortraege/410-vortraege-von-mitarbeiterinnen-und-mitarbeitern-2012.html (Stand: 06.09.2013).

Ferdinand Porsche AG; Wirtschaftsberatungsgesellschaft WIBERA: Forschungsbericht KT 7612, Feuerwehrsystem O.R.B.I.T. Entwicklung eines Systems zur optimierten Rettung und Brandbekämpfung mit integrierter technischer Hilfeleistung. Im Auftrag des Bundesministeriums für Forschung und Technologie 1978.

[14] Vereinigung zur Förderung des Deutschen Brandschutzes e.V. (vfdb): Technischer Bericht vfdb 02-01, methodischer Leitfaden zur Brandursachenermittlung. Köln: VdS Schadenverhütung GmbH 2012.

[15] Österreichisches Normungsinstitut (ON): ONR 49000, Risikomanagement für Organisationen und Systeme. Begriffe und Grundlagen. Umsetzung von ISO 31000 in die Praxis. Wien: Austrian Standards plus GmbH 2010.

[16] Preiss, R.: Methoden der Risikoanalyse in der Technik. Wien: TÜV Austria Akademie GmbH 2009.

[17] Deutsches Institut für Normung e.V. (DIN): DIN EN 31010, Risikomanagement. Verfahren zur Risikobeurteilung. Berlin: Beuth Verlag GmbH 2010.

[18] International Organization for Standardization (ISO): ISO/TR 13387-2, fire safety engineering. Part 2: Design fire scenarios and design fires. Genf: Eigenverlag 1999.

[19] International Organization for Standardization (ISO): ISO/TS 16733, fire safety engineering. Selection of design fire scenarios and design fires. Genf: Eigenverlag 2006.

[20] Vereinigung zur Förderung des Deutschen Brandschutzes e.V. (vfdb): Technischer Bericht TB 04-01, Leitfaden Ingenieurmethoden des Brandschutzes. 2. Auflage, Braunschweig: Eigenverlag 2009.

[21] National Fire Protection Association (NFPA): NFPA 101, life safety code. Quincy: Eigenverlag 2009.

[22] Meacham, B.J.: Performance-based regulatory systems. Principles and experiences. Inter-Jurisdiction Regulatory Collaboration Committee (IRCC) 2010.

[23] International Organization for Standardization (ISO): ISO 13387-1, fire safety engineering. Part 1: Application of fire performance concepts to design objectives. Genf: Eigenverlag 1999.

[24] Verein Deutscher Ingenieure (VDI): VDI-Richtlinie 6019 Blatt 1, Ingenieurverfahren zur Bemessung der Rauchableitung aus Gebäuden. Brandverläufe, Überprüfung der Wirksamkeit. Berlin: Beuth Verlag GmbH 2006.

[25] National Fire Protection Association (NFPA): NFPA 92B, guide for smoke management systems in malls, atria and large spaces. Quincy: Eigenverlag 2009.

[26] Deutsches Institut für Normung e.V. (DIN): DIN 18232-2, Rauch- und Wärmefreihaltung. Teil 2: Natürliche Rauchabzugsanlagen (NRA). Bemessung, Anforderungen und Einbau. Berlin: Beuth Verlag GmbH 2007.

[27] Deutsches Institut für Normung e.V. (DIN): DIN 18232-5, Rauch- und Wärmefreihaltung. Teil 5: Maschinelle Rauchabzugsanlagen (MRA). Anforderungen, Bemessung. Berlin: Beuth Verlag GmbH 2012.

[28] The British Standards Institution (BSI): BS 7346-5, components for smoke and heat control systems. Part 5: Functional recommendations and calculation methods for smoke and heat exhaust ventilation systems, employing time-dependent design fires. Code of practice. London: Eigenverlag 2005.

[29] The British Standards Institution (BSI): BS 7346-4, components for smoke and heat control systems. Part 4: Functional recommendations and calculation methods for smoke and heat exhaust ventilation systems, employing steady-state design fires. Code of practice. London: Eigenverlag 2003.

[30] Österreichischer Bundesfeuerwehrverband; die österreichischen Brandverhütungsstellen: TRVB S 125, Rauch- und Wärmeabzugsanlagen („Smoke and heat exhaust systems“) und Rauchableitungsanlagen. Technische Richtlinien vorbeugender Brandschutz. Wien: Eigenverlag 2010.

[31] National Fire Protection Association (NFPA): NFPA 204, guide for smoke and heat venting. Quincy: Eigenverlag 2012.

[32] Klote, J.H.; Milke, J.A.: Principles of smoke management. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning (ASHRAE); Society of Fire Protection Engineers (SFPE). Atlanta: Eigenverlag 2002.

[33] Fleming, R.P.: Automatic sprinkler system calculations. In: National Fire Protection Association (NFPA): The SFPE handbook of fire protection engineering. 4. Auflage, Quincy: Eigenverlag 2008, S. 4/72-4/88.

[34] Rusch, H.: Brandmodellierung und Sprinkleranlagen. In: vfdb-Zeitschrift, 57. Jahrgang, Nr. 1 (2008), S. 150-159.

[35] Custer, R.L.P.; Meacham, B.J., Schifiliti, R.P.: Design of detection systems. In: National Fire Protection Association (NFPA): The SFPE handbook of fire protection engineering. 4. Auflage, Quincy: Eigenverlag 2008, S. 4/1-4/44.

[36] John, R.; Schatz, H.: Brandrauch. Entstehung, Ausbreitung, Auswirkung. Gutachten für den Fachverband Lichtkuppel, Lichtband und RWA e.V. Karlsruhe: Eigenverlag 1997.

[37] Madrzykowski, D.; Vettori, R.L.: NISTIR 4833, a sprinkler fire suppression algorithm for the GSA engineering fire assessment system. National Institute of Standards and Technology (NIST). Gaithersburg: Eigenverlag 1992.

[38] Evans, D.: NISTIR 5254, sprinkler fire suppression algorithm for HAZARD. National Institute of Standards and Technology (NIST). Gaithersburg: Eigenverlag 1993.

[39] Davis, W.D.: NISTIR 6324, the zone fire model jet. A model for the prediction of detector activation and gas temperature in the presence of a smoke layer. National Institute of Standards and Technology (NIST). Gaithersburg: Eigenverlag 1999.

[40] Hosser, D.; Dobbernack, R.; Siegfried, W.: Rauchabzug in ausgedehnten Räumen ohne und mit Sprinkleranlage am Beispiel des Industriebaus. In: vfdb-Zeitschrift, 46. Jahrgang, Nr. 4 (1997), S. 147-152.

[41] Deutsches Institut für Normung e.V. (DIN): DIN EN 1991-1-2/NA, nationaler Anhang. National festgelegte Parameter. Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke. Teil 1-2: Allgemeine Einwirkungen. Brandeinwirkungen auf Tragwerke. Berlin: Beuth Verlag GmbH 2010.

[42] ASTM International: ASTM E 1591-07, standard guide for obtaining data for deterministic fire models. West Conshohocken: Eigenverlag 2007.

[43] Forell, B.: Einteilung, Quellterme und Bewertung der akuten Toxizität von Brandrauch. In: 58. Jahresfachtagung der Vereinigung zur Förderung des Deutschen Brandschutzes e.V. (vfdb), 25.-27. Mai 2009, Mannheim. Tagungsband, S. 307-335.

[44] Blume, G.W.: Ingenieurmodell zur brandschutztechnischen Bemessung von Bauteilen auf der Basis von experimentell ermittelten Verbrennungseffektivitäten. Dissertationsschrift, Technische Universität Carolo-Wilhelmina, Braunschweig 2003.

[45] Comité Européen de Normalisation (CEN): CEN/TR 12101-5, systèmes pour le contrôle des fumées et de la chaleur. Partie 5: Guide de recommandations fonctionnelles et de calcul pour les systèmes d’évacuation de fumée et de chaleur. (Deutscher Titel: Rauch- und Wärmefreihaltung. Teil 5: Anleitung zu funktionellen Empfehlungen und Rechenverfahren für Anlagen zur Rauch- und Wärmefreihaltung). Brüssel: Europäisches Komitee für Normung (CEN) 2005.

[46] Vereinigung Kantonaler Feuerversicherungen (VKF): Brandschutzerläuterung VKF-BSE 115-03, Bewertung Brandabschnittsgrössen. Bern: Eigenverlag 2007.

[47] Deutsches Institut für Normung e.V. (DIN): DIN 18230-4, Baulicher Brandschutz im Industriebau. Teil 4: Ermittlung der äquivalenten Normbranddauer und des Wärmeabzugsfaktors durch Brandsimulation. Entwurf Oktober 2010.

[48] Österreichischer Bundesfeuerwehrverband; die österreichischen Brandverhütungsstellen: TRVB A 126, Brandschutztechnische Kennzahlen verschiedener Nutzungen, Lagerungen, Lagergüter. Technische Richtlinien vorbeugender Brandschutz. Wien: Eigenverlag 1987.

[49] Arbeitsgemeinschaft Brandsicherheit (AGB); Deutsches Institut für Normung e.V. (DIN): Baulicher Brandschutz im Industriebau. Kommentar zur DIN 18230. 3. aktualisierte und überarbeitete Auflage, Berlin: Beuth Verlag GmbH 2003.

[50] Babrauskas, V.; Lawson, J.R.; Walton, W.D. u.a.: NBSIR 82-2604, upholstered furniture heat release rates measured with a furniture calorimeter. U.S. Department of Commerce, National Bureau of Standards (NBS); heute: National Institute of Standards and Technology (NIST). Gaithersburg: Eigenverlag 1982.

[51] Babrauskas, V.: Heat release rates. In: National Fire Protection Association (NFPA): The SFPE handbook of fire protection engineering. 4. Auflage, Quincy: Eigenverlag 2008, S. 3/1-3/59.

[52] Deutsches Institut für Normung e.V. (DIN): DIN 18230-3, Baulicher Brandschutz im Industriebau. Teil 3: Rechenwerte. Berlin: Beuth Verlag GmbH 2002.

[53] Portz, H: Brand- und Explosionsschutz von A-Z, Begriffserläuterungen und brandschutztechnische Kennwerte. 1. Auflage, Wiesbaden: Vieweg Verlag 2005.

[54] Beilicke, G.: Bautechnischer Brandschutz. Brandlastberechnung. Erweiterter Reprint, Leipzig: Beilicke Brandschutz Verlag 2010.

[55] Schneider, U.; Lebeda, Ch.: Baulicher Brandschutz. Schriftenreihe Brand- und Explosionsschutz, Band 4. 1. Auflage, Stuttgart: W. Kohlhammer GmbH 2000.

[56] Tewarson, A.: Generation of heat and gaseous, liquid and solid products in fires. In: National Fire Protection Association (NFPA): The SFPE handbook of fire protection engineering. 4. Auflage, Quincy: Eigenverlag 2008, S. 3/109-3/194.

[57] Babrauskas, V.: Burning rates. In: National Fire Protection Association (NFPA): The SFPE handbook of fire protection engineering. 2. Auflage, Quincy: Eigenverlag 1995, S. 3/1ff.

[58] Quintiere, J.G.: Principles of fire behavior. 1. Auflage, Albany: Delmar 1998.

[59] The British Standards Institution (BSI): BSI DD 240-1, fire safety engineering in buildings. Guide to the application of fire safety engineering principles. London: Eigenverlag 1997 *(ersetzt und zurückgezogen).*

[60] VdS Schadenverhütung GmbH: VdS 2827, Bemessungsbrände für Brandsimulationen und Brandschutzkonzepte. Köln: Eigenverlag 2000.

[61] Bukowsky, R.W.: How to evaluate alternative designs based on fire modeling. In: NFPA Journal, 89. Jahrgang, Nr. 2 (1995), S. 68-74.

[62] Hansell, G.O.; Morgan, H.P.: BR 258, design approaches for smoke control in atrium buildings. Building Research Establishment (BRE). Garston/Watford: BRE Press 1994.

[63] Schweizerische Unfallversicherungsanstalt (SUVA): SUVA-Bestellnummer 1469.d: Sicherheitstechnische Kenngrössen von Flüssigkeiten und Gasen. Luzern: Eigenverlag 2010.

[64] Verein Deutscher Ingenieure (VDI): VDI-Richtlinie 6019 Blatt 2, Ingenieurverfahren zur Bemessung der Rauchableitung aus Gebäuden. Ingenieurmethoden. Berlin: Beuth Verlag GmbH 2009.

[65] Society of Fire Protection Engineers (SFPE): Guidelines for substantiating a fire model for a given application. Bethesda: Eigenverlag 2011.

[66] Olenick, S.M.; Carpenter, D.J.: An updated international survey of computer models for fire and smoke. In: Journal of Fire Protection Engineering, 13. Jahrgang, Nr. 2 (2003), S. 87-110.

[67] Martinez de Aragón, J.J.; Rey, F.; Chica, J.A.: ECSC research project RFS-C2-03048: Dissemination of structural fire safety engineering knowledge (DIFISEK). LABEIN Technological Centre. Bilbao 2005.

[68] McCaffrey, B.J.: Momentum implications for buoyant diffusion flames. In: Combustion and Flame, 52. Jahrgang, 1983, S. 149-167.

[69] McCaffrey, B.J.: NBSIR 79-1910, purely buoyant diffusion flames. Some experimental results. U.S. Department of Commerce, National Bureau of Standards (NBS); heute: National Institute of Standards and Technology (NIST). Gaithersburg: Eigenverlag 1979.

[70] Jones, W.W.; Peacock, R.D.; Forney, G.P. u.a.: NIST Special Publication SP-1026, CFAST, Consolidated model of fire growth and smoke transport (version 6). Technical reference guide. National Institute of Standards and Technology (NIST). Gaithersburg: Eigenverlag 2009.

[71] Max, U.; Lebeda, C.: MRFC Version 2.7: Theorie Manual MRFC, Band 1. Arbeitsgemeinschaft Brandsicherheit (AGB); Technische Universität Wien, Institut für Hochbau und Technologie. Wien/Bruchsal: Eigenverlag 2000.

[72] Zukoski, E.E.; Kubota, T.; Cetegen, B.: Entrainment in fire plumes. In: Fire Safety Journal, 3. Jahrgang, Nr. 3 (1980), S. 107-121.

[73] International Organization for Standardization (ISO): ISO 16735, fire safety engineering. Requirements governing algebraic equations: Smoke layers. Genf: Eigenverlag 2006.

[74] Thomas, P.H. u.a.: Fire Research Technical Paper Nr. 7, investigations into the flow of hot gases in roof venting. London: HMSO 1963.

[75] Hinkley, P.L.: Rates of production of hot gases in roof venting experiments. In: Fire Safety Journal, 10. Jahrgang, Nr. 1 (1986), S. 57-65.

[76] Heskestad, G.: Fire plumes, flame height and air entrainment. In: National Fire Protection Association (NFPA): The SFPE handbook of fire protection engineering. 3. Auflage, Quincy: Eigenverlag 2002, S. 2/1-2/17.

[77] Heskestad, G.: Fire plumes, flame height and air entrainment. In: National Fire Protection Association (NFPA): The SFPE handbook of fire protection engineering. 4. Auflage, Quincy: Eigenverlag 2008, S. 2/1-2/20.

[78] International Organization for Standardization (ISO): ISO 16734, fire safety engineering. Requirements governing algebraic equations: Fire plumes. Genf: Eigenverlag 2006.

[79] Brein, D.: Anwendungsbereiche und -grenzen für praxisrelevante Modellansätze zur Bewertung der Rauchausbreitung in Gebäuden (Plume-Formeln), Version 1.2. Forschungsstelle für Brandschutztechnik an der Universität Karlsruhe (TH). Karlsruhe: Eigenverlag 2001.

[80] Morgan, H.P. et. al.: BR 368, design methodologies for smoke and heat exhaust ventilation. Building Research Establishment (BRE). Garston/Watford: BRE Press 1999.

[81] Kuhn, J.; Ostertag, D.; Zitzelsberger, J.: Rauchfreihaltung/Entrauchung von Räumen und Gebäuden. Grundlagenermittlung für die Erstellung bauaufsichtlicher Richtlinien. Band A: Entrauchungsanlagen. Forschungs- und Versuchslabor des Lehrstuhls für Bauklimatik und Haustechnik der Technischen Universität München (TUM). Dachau: Eigenverlag 2003.

[82] The British Standards Institution (BSI): PD 7974-2, application of fire safety engineering principles to

the design of buildings. Part 2: Spread of smoke and toxic gases within and beyond the enclosure of origin. London: Eigenverlag 2002.

[83] Morgan, H.P.: The horizontal flow of buoyant gases toward an opening. In: Fire Safety Journal, 11. Jahrgang, Nr. 3 (1986), S. 193-200.

[84] Hansell, G.O.; Morgan, H.P.: Atrium buildings: Calculating smoke flows in atria for smoke control design. In: Fire Safety Journal, 12. Jahrgang, Nr. 1 (1987), S. 9-25.

[85] Ko, Y.; Hadjisophocleous, G.; Lougheed, G.D.: CFD Study of the air entrainment of balcony spill plumes at the balcony edge. In: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning (ASHRAE) Transactions, 114. Jahrgang, 2008, S. 344-354.

[86] Harrison, R.: Entrainment of air into thermal spill plumes. Department of Civil and Natural Resources Engineering, University of Canterbury, Christchurch 2009.

[87] Bartholomäus, M.: Möglichkeiten der Visualisierung von Risikobewertungen. Diplomarbeit, Universität Magdeburg 2006.

[88] Zukoski, E.E.: Properties of fire plumes. In: Cox G. (Hg.): Combustion fundamentals of fire. London: Academic Press 1995.

[89] Garrad, G.; Poreh, M.: A study of wall and corner fire plumes. FRS, Building Research Establishment, Garston/Watford; Faculty of Civil Engineering, Technion, Israel Institute of Technology, Haifa. In: Fire Safety Journal, 34. Jahrgang, Nr. 1 (2000), S. 81-98

[90] Marshall, N.R.; Morgan, H.P.; Thomas, P.H.: The spill plume in smoke control design. In: Fire Safety Journal, 30. Jahrgang, Nr. 1 (1998), S. 21-46.

[91] Lee, S.-L.; Emmons, H.W.: A study of natural convection above a line fire. In: Journal of Fluid Mechanics, 11. Jahrgang, Nr. 3 (1961), S. 353-368.

[92] Marshall, N.R.; Poreh, M.; Regev, A.: Entrainment by adhered two-dimensional plumes. In: Fire Safety Journal, 43. Jahrgang, Nr. 5 (2008), S. 344-350.

[93] Tiong, H.Y.: Numerical modelling of unchannelled balcony spill plumes using FDS 5. Department of Civil Engineering, University of Canterbury, Christchurch 2012.

[94] The British Standards Institution (BSI): PD 7974-1, application of fire safety engineering principles to the design of buildings. Part 1: Initiation and development of fire within the enclosure of origin. London: Eigenverlag 2003.

[95] The British Standards Institution (BSI): BS 7346-7, components for smoke and heat control systems. Part 7: Code of practice on functional recommendations and calculation methods for smoke and heat control systems for covered car parks. London: Eigenverlag 2013.

[96] Gardner J.P.; Morgan, H.P.: BR 186, design principles for smoke ventilation in enclosed shopping centres. Building Research Establishment (BRE). Garston/Watford: BRE Press 1990.

[97] Thomas, P.H.; Walton, W.D.: Estimating temperatures in compartment fires. In: National Fire Protection Association (NFPA): The SFPE handbook of fire protection engineering. 4. Auflage, Quincy: Eigenverlag 2008, S. 3/204-3/221.

[98] Thomas, I.: Enclosure fire temperature-time estimation. In: National Fire Protection Association (NFPA): The SFPE handbook of fire protection engineering. 4. Auflage, Quincy: Eigenverlag 2008, S. 4/208-4/227.

[99] Klote, J.H.; Milke, J.A.; Turnbull, P.G. u.a.: Handbook of smoke control engineering. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning (ASHRAE); International Code Council (ICC); Society of Fire Protection Engineers (SFPE); National Fire Protection Association (NFPA). Atlanta: Eigenverlag 2012.

[100] Siegfried, W.; Will, J.: Die Verwendung des Verdünnungsverhältnisses zur Bewertung von Ergebnissen bei der Modellierung der Rauchableitung. In: vfdb-Zeitschrift, 51. Jahrgang, Nr. 3 (2002), S. 101-107.

[101] Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein (SIA): SN EN 1363-1, Feuerwiderstandsprüfungen. Teil 1: Allgemeine Anforderungen. Zürich: Eigenverlag 2012.

[102] International Organization for Standardization (ISO): ISO 834-1, fire-resistance tests. Elements of building construction. Part 1: General requirements. Genf: Eigenverlag 1999.

[103] Deutsches Institut für Normung e.V. (DIN): DIN 4102-11: Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen. Teil 11: Rohrummantelungen, Rohrabschottungen, Installationsschächte und -kanäle sowie Abschlüsse ihrer Revisionsöffnungen. Begriffe, Anforderungen und Prüfungen. Berlin: Beuth Verlag GmbH 1985.

[104] Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein (SIA): SN EN 1363-2, Feuerwiderstandsprüfungen. Teil 2: Alternative und ergänzende Verfahren. Zürich: Eigenverlag 1999.

[105] VdS Schadenverhütung GmbH: VdS CEA 4020, VdS CEA-Richtlinien für Rauch- und Wärmeabzugsanlagen (RWA). Natürliche Rauch- und Wärmeabzugsanlagen. Planung und Einbau. Köln: Eigenverlag 2009.

[106] Madrzykowski, D.: Office work station heat release rate study. Full scale versus bench scale. National Institute of Standards and Technology (NIST). In: Interflam '96, 7. Interflam Konferenz, 26.-28. März 1996, Cambridge. Tagungsband. London: Interscience Communications Ltd., S. 47-55.

[107] Ohlemiller, T.J.; Shields, J.R.; McLane, R.A. u.a.: NISTIR 6497, flammability assessment methodology for mattresses. National Institute of Standards and Technology (NIST). Gaithersburg: Eigenverlag 2000.

[108] Hietaniemi, J.; Mangs, J.; Hakkarainen, T.: VTT Research Notes 2084, burning of electrical household appliances. Valtion Teknillinen Tutkimuskeskus (VTT). Espoo: Eigenverlag 2001.

[109] Bundy, M.; Ohlemiller, T.J.: NISTIR Technical Note 1461, flammability assessment methodology for mattresses. National Institute of Standards and Technology (NIST). Gaithersburg: Eigenverlag 2004.

[110] Mitler, H.E.: Input data for fire modeling. In: NISTIR 6030, Band 1: 13th meeting of the UJNR panel on fire research and safety, 13.-20. März 1996. National Insti-

tute of Standards and Technology (NIST). Gaithersburg: Eigenverlag.

[111] Chow, W.K.; Dong, H.; Gao, Y. u.a.: Necessity of carrying out full-scale burning tests for post-flashover retail shop fires. In: International Journal on Engineering Performance-Based Fire Codes, 5. Jahrgang, Nr. 1 (2003), S. 20-27.

[112] Madrzykowski, D.; Walton, W.D.: NIST Special Publication SP-1021, Cook County Administration Building fire, 69 West Washington, Chicago, Illinois, October 17, 2003. Heat release rate experiments and FDS simulations. National Institute of Standards and Technology (NIST). Gaithersburg: Eigenverlag 2004.

[113] Lawson, J.R.; Walton, W.D.; Twilley, W.H.: NBSIR 83-2787, fire performance of furnishings as measured in the NBS furniture calorimeter, part 1. U.S. Department of Commerce, National Bureau of Standards (NBS); heute: National Institute of Standards and Technology (NIST). Gaithersburg: Eigenverlag 1983.

[114] Walton, W.D.; Budnick, E.K.: NBSIR 88-3695, quick response sprinklers in office configurations. Fire test results. U.S. Department of Commerce, National Bureau of Standards (NBS); heute: National Institute of Standards and Technology (NIST). Gaithersburg: Eigenverlag 1988.

[115] Kakegawa, S. u.a.: Design fires for means of egress in office buildings based on full-scale fire experiments. Japan's National Research Institute of Fire and Desaster (NRIFD). In: 7th International Symposium on Fire Safety Science, 15.-19. Juni 2002, Worcester. Tagungsband. London: International Association for Fire Safety Science (IAFSS), S. 975-986.

[116] Jansens, M.: SwRI Report Nr. 01.06939.01.003, development of a database of full-scale calorimeter tests of motor vehicle burns. Prepared for Motor Vehicle Fire Research Institute (MVFRI), Charlottesville. Southwest Research Institute (SwRI). San Antonio: Eigenverlag 2008.

[117] Department for Communities and Local Government (DCLG), Building Research Establishment (BRE): Report BD2552, fire spread in car parks. London/Watford: Eigenverlag 2010.

[118] Ingason, H.; Gustavsson, S.; Dahlberg, M.: SP Report 1994:08, heat release rate measurements in tunnel fires. SP Swedish National Testing and Research Institute; heute: SP Technical Research Institute of Sweden. Borås: Eigenverlag 1994.

[119] Studiengesellschaft Stahlanwendung e.V.: EUREKA Project EU 499, FIRETUN. Fires in transport tunnels, report on full-scale tests. Düsseldorf: Verlag- und Vertriebsgesellschaft mbH 1995.

[120] Grant, G.B.; Drysdale, D.: Estimating heat release rates from large-scale tunnel fires. University of Edinburgh, Department of Civil and Environmental Engineering. In: 5th International Symposium on Fire Safety Science, 3.-7. März 1997, Melbourne. Tagungsband. London: International Association for Fire Safety Science (IAFSS), S. 1213-1224.

[121] Haack, A.: Studiengesellschaft für unterirdische Verkehrsanlagen e.V. (STUVA), European Thematic Network Fire in Tunnels (FIT). Technical report part 1: Design fire scenarios. Brüssel: Wetenschappelijk en Technisch Centrum voor het Bouwbedrijf (WTCB) (ohne Jahr).

[122] Ingason, H.; Lönnermark, A.; Li, Y.Z.: SP Report 2011:55, Runehamar tunnel fire tests. SP Technical Research Institute of Sweden. Borås: Eigenverlag 2011.

[123] Bureau de Normalisation: Norme belge NBN S 21-208-2/prA1, protection incendie dans les bâtiments. Conception des systèmes d'évacuation des fumées et de la chaleur (EFC) des parkings fermés. 2. Ausgabe, Brüssel: Eigenverlag 2010.

[124] Münch, M.: Kritische numerische Aspekte bei der Anwendung von Feldmodellen. In: 55. Jahresfachtagung der Vereinigung zur Förderung des Deutschen Brandschutzes e.V. (vfdb), 21.-25. Mai 2006, Salzburg. Tagungsband.

[125] Gobeau, N.; Lea, C.J.; Ledin, H.S.: Guidance for HSE inspectors. Smoke movement in complex enclosed spaces. Assessment of computational fluid dynamics. Health & Safety Laboratory, Fire and Explosion Group. Buxton: Eigenverlag 2002.

[126] The British Standards Institution (BSI): PD 7974-6, the application of fire safety engineering principles to fire safety design of buildings. Part 6: Human factors. Life safety strategies. Occupant evacuation, behaviour and condition. London: Eigenverlag 2004.

[127] International Organization for Standardization (ISO): ISO 13571, life-threatening components of fire. Guidelines for the estimation of time available for escape using fire data. Genf: Eigenverlag 2007.

[128] Wilk, E.; Lessig, R.: Untersuchungen zur Sichtweite im Rauch und zu Brandgaswirkungen auf den Menschen. In: vfdb-Zeitschrift, 53. Jahrgang, Nr. 3 (2004), S. 168-175.

[129] Purser, D.A.: Assessment of hazards to occupants from smoke, toxic gases and heat. In: National Fire Protection Association (NFPA): The SFPE handbook of fire protection engineering. 4. Auflage, Quincy: Eigenverlag 2008, S. 2/96-2/193.

[130] Schönbucher, A.: Berechnung von Sicherheitsabständen bei Störfällen mit brennbaren Stoffen. In: Hartwig, S.: Schwere Gase und Sicherheitsanalyse – IV. Proc. Symp. Bonn, September 1991. Frankfurt a. M.: Battelle-Eigenverlag 1992.

[131] Bieske, K.; Gall, D.; Kokoschka, S.: Evaluierung von Sicherheitsleitsystemen in Rauchsituationen; Forschungsbericht. Technische Universität Ilmenau, Fachgebiet Lichttechnik. Ilmenau: Eigenverlag 2003.

[132] Bieske, K.; Rohleder, St.: Untersuchung des Einflusses von Reizung der Augen auf die Sehschärfe. Technische Universität Ilmenau, Fachhochschule Jena 2002.

[133] Schneider, V.: Erkennungsweite von Sicherheitszeichen in Rauch. In: vfdb-Zeitschrift, 58. Jahrgang, Nr. 4 (2009), S. 188-198.

[134] Cai, H.: A legibility equation for determining ideal viewing areas in lecture halls. Dissertationsschrift, Universität Michigan 2008.

[135] Schneider, V.: Auswirkungen der Ausbreitung von Rauch und Wärme auf die Personensicherheit. In: vfdb-Zeitschrift, 51. Jahrgang, Nr. 3 (2002), S. 94-100.

[136] International Organization for Standardization (ISO): ISO/TR 16738, fire safety engineering. Technical information on methods for evaluating behaviour and movement of people. 1. Ausgabe, Genf: Eigenverlag 2009.

[137] United States Environmental Protection Agency. Acute exposure guideline levels (AEGLs): AEGL chemical data, final AEGL chemicals. http://www.epa.gov/oppt/aegl/pubs/final.htm (Stand: 15.07.2013).

[138] Jensen, G.: Evacuating in smoke. IGP AS-Studie. Trondheim: Eigenverlag 1993.

[139] Jin, T.: Visibility and human behavior in fire smoke. In: National Fire Protection Association (NFPA): The SFPE handbook of fire protection engineering. 4. Auflage, Quincy: Eigenverlag 2008, S. 2/54-2/66.

[140] Mulholland, G.W.: Smoke production and properties. In: National Fire Protection Association (NFPA): The SFPE handbook of fire protection engineering. 4. Auflage, Quincy: Eigenverlag 2008, S. 2/291-2/302.

[141] Janssens, M.: Calorimetry. In: National Fire Protection Association (NFPA): The SFPE handbook of fire protection engineering. 4. Auflage, Quincy: Eigenverlag 2008, S. 3/60-3/89.

[142] Huggett, C.: Estimation of rate of heat release by means of oxygen consumption measurements. In: Fire and Materials, 4. Jahrgang, Nr. 2 (1980), S. 61-65.

[143] Blomqvist, P.: Emissions from fires, consequences for human safety and the environment. Dissertationsschrift, Universität Lund 2005.

[144] Deutsches Institut für Normung e.V. (DIN): DIN EN ISO 23251, Erdöl-, petrochemische und Erdgasindustrie; Druckentlastungs- und Druckausgleichssysteme. Berlin: Beuth Verlag GmbH 2007.

[145] Vereinigung Kantonaler Feuerversicherungen (VKF): Brandschutzrichtlinie VKF-BSR 20-11, Brandmeldeanlagen. Bern: Eigenverlag 2011.

[146] Xie, H.; Filippidis, L.; Galea, E.R.; Blackshields, D. u.a.: Experimental study of the effectiveness of emergency signage. In: 4th international symposium on human behaviour in fire, 13.-15. Juli 2009, Cambridge. Tagungsband. London: Interscience Communications Ltd., S. 289-300.

[147] Nelson, H.E.; Mowrer, F.W.: Emergency movement. In: National Fire Protection Association (NFPA): The SFPE handbook of fire protection engineering. 3. Auflage, Quincy: Eigenverlag 2002, S. 3/367-3/380.

[148] Weidmann, U.: Transporttechnik der Fussgänger. Institut für Verkehrsplanung, Transporttechnik, Strassen- und Eisenbahnbau der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich (ETHZ). 2. ergänzte Auflage, Zürich: Eigenverlag 1993.

[149] Predtetschenski, W.M.; Milinski, A.I.: Personenströme in Gebäuden; Berechnungsmethoden für die Projektierung. Ergänzter Reprint, Leipzig: Beilicke Brandschutz Verlag 2010.

[150] Proulx, G.: Movement of People: The evacuation timing. In: National Fire Protection Association (NFPA): The SFPE handbook of fire protection engineering. 3. Auflage, Quincy: Eigenverlag 2002, S. 3/342-3/366.

[151] Bryan, J.L.: Behavioral response to fire and smoke. In: National Fire Protection Association (NFPA): The SFPE handbook of fire protection engineering. 4. Auflage, Quincy: Eigenverlag 2008, S. 3/320-3/354.

[152] Lord, J.; Meacham, B.; Moore, A. u.a.: NIST GCR 06-886, guide for evaluating the predictive capabilities of computer egress models. National Institute of Standards and Technology (NIST). Gaithersburg: Eigenverlag 2005.

[153] RiMEA e.V.: Richtlinie für Mikroskopische Entfluchtungs-Analysen (RiMEA). Version 2.2.1, Duisburg: Eigenverlag 2009.

[154] Fruin, J.: Pedestrian planning and design. Metropolitan Association of Urban Designers and Environmental Planners Inc. New York: Eigenverlag 1987.

[155] Gottuk, D.T.; Lattimer, B.Y.: Effect of combustion conditions on species production. In: National Fire Protection Association (NFPA): The SFPE handbook of fire protection engineering. 3. Auflage, Quincy: Eigenverlag 2002, S. 2/54-2/82.

[156] Bundy, M.; Hamins, A.; Johnsson, E.L. u.a.: NIST Technical Note 1483, measurement of heat and combustion products in reduced-scale ventilation-limited compartment fires. National Institute of Standards and Technology (NIST). Gaithersburg: Eigenverlag 2007.

[157] Lock, A.; Bundy, M.; Johnsson, E.L. u.a.: NIST Technical Note 1603, experimental study of the effects of fuel type, fuel distribution and vent size on full-scale underventilated compartment fires in an ISO 9705 room. National Institute of Standards and Technology (NIST). Gaithersburg: Eigenverlag 2008.

[158] Mulholland, G.W.; Croarkin, C.: Specific extinction coefficient of flame generated smoke. In: Fire and Materials, 24. Jahrgang, Nr. 5 (2000), S. 227-230.

[159] Mulholland, G.W.; Choi, M.Y.: Measurement of the mass specific extinction coefficient for acetylene and ethene smoke using the large agglomerate optics facility. In: 27th symposium (international) on combustion, 2.-7. August 1998, Boulder. Tagungsband, Band 1, S. 1515-1522.

[160] John, R.: Ermittlung der erforderlichen Luftvolumenströme zur Verdünnung von Brandrauch auf ein die Gesundheit und Sichtbarkeit in Rettungswegen gewährleistendes Mass. Teil 4: Brandrauch und Sichtbarkeit von Hinweiszeichen in Rettungswegen. Forschungsbericht Nr. 66. Forschungsstelle für Brandschutztechnik an der Universität Karlsruhe. Karlsruhe: Eigenverlag 1988.

[161] Brown, S.K.; Martin, K.G.: A review of the visibility hazard from smoke in building fires. Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization (CSIRO), Division of Building Research. Highett: Eigenverlag 1981.

[162] Vereinigung Kantonaler Feuerversicherungen (VKF): Brandschutzrichtlinie VKF-BSR 16-03, Flucht- und Rettungswege. Bern: Eigenverlag 2003.

[163] Schweizerische Normen-Vereinigung (SNV): SN EN 13200-1, Zuschaueranlagen. Teil 1: Kriterien für die räumliche Anordnung von Zuschauerplätzen; Anforderungen. Winterthur: Eigenverlag 2003.

[164] Schweizerische Bundesbahnen, Direktion Marketing Personenverkehr: Behindertenkonzept SBB. Teilberichte I und II. Bern: Eigenverlag 1989.

[165] Kuligowski, E.D.; Peacock, R.D.: Technical Note 1471, a review of building evacuation models. National Institute of Standards and Technology (NIST). Washington D.C.: U.S. Government Printing Office 2005.

[166] National Fire Protection Association (NFPA): NFPA 130, Standard for fixed guideway transit and passenger rail systems. Quincy: Eigenverlag 2010.

[167] Notarianni, K.A.; Parry, G.W.: Uncertainty. In: National Fire Protection Association (NFPA): The SFPE handbook of fire protection engineering. 4. Auflage, Quincy: Eigenverlag 2008, S. 5/69-5/100.

[168] Schlesinger, S.: Terminology for model credibility. In: Simulation, 32. Jahrgang, Nr. 3 (1979), S. 103-104.

[169] Klein, R.; Münch, M.: Anforderungen an numerische Berechnungen der Brand- und Rauchausbreitung im vorbeugenden Brandschutz. In: vfdb-Zeitschrift, 57. Jahrgang, Nr. 3 (2008), S. 145-151.

[170] International Organization for Standardization (ISO): ISO 13387-3, fire safety engineering. Part 3: Assessment and verification of mathematical fire models. Genf: Eigenverlag 1999.

[171] Jin, T.: Visibility through fire smoke. In: Journal of Fire and Flammability, 9. Jahrgang, April (1978), S. 135-155.

[172] Vereinigung Kantonaler Feuerversicherungen (VKF): Brandschutzerläuterung VKF-BSE 117-03, Gewährleistung der Betriebsbereitschaft von Brandfallsteuerungen (BFS). Bern: Eigenverlag 2008.

[173] Vereinigung Kantonaler Feuerversicherungen (VKF): Brandschutzrichtlinie VKF-BSR 19-11, Sprinkleranlagen. Bern: Eigenverlag 2011.

[174] Vereinigung Kantonaler Feuerversicherungen (VKF): Brandschutzrichtlinie VKF-BSR 14-03, Tragwerke. Bern: Eigenverlag 2003.

[175] John, R.: Ermittlung der erforderlichen Luftvolumenströme zur Verdünnung von Brandrauch auf ein die Gesundheit und Sichtbarkeit in Rettungswegen gewährleistendes Mass; Teil 2: Optische Brandrauchdichte. Forschungsberichte Nr. 50. Forschungsstelle für Brandschutztechnik an der Universität Karlsruhe. Karlsruhe: Eigenverlag 1983.

[176] Hagen, E.; Zitzelsberger, J.: Aus der Normungsarbeit für die Bemessung maschineller Abzüge nach DIN 18232, Teil 5. In: vfdb-Zeitschrift, 44. Jahrgang, Nr. 1 (1995), S. 29-34.

[177] Vereinigung Kantonaler Feuerversicherungen (VKF): Brandschutzrichtlinie VKF-BSR 15-03, Schutzabstände, Brandabschnitte. Bern: Eigenverlag 2003.

[178] Vereinigung Kantonaler Feuerversicherungen (VKF): Brandschutzrichtlinie VKF-BSR 24-03, Aufzugsanlagen. Bern: Eigenverlag 2003.

[179] Vereinigung Kantonaler Feuerversicherungen (VKF): Brandschutzarbeitshilfe VKF-BSA 1007-03, Hochhäuser. Bern: Eigenverlag 2003.

[180] Schweizerische Normen-Vereinigung (SNV): SN EN 12101-2, Rauch- und Wärmefreihaltung. Teil 2: Bestimmungen für natürliche Rauch- und Wärmeabzugsgeräte. Winterthur: Eigenverlag 2003.

[181] Schweizerische Normen-Vereinigung (SNV): SN EN 12101-3, Rauch- und Wärmefreihaltung. Teil 3: Bestimmungen für maschinelle Rauch- und Wärmeabzugsgeräte. Winterthur: Eigenverlag 2002.

[182] Schweizerische Normen-Vereinigung (SNV): SN EN 12101-8, Rauch- und Wärmefreihaltung. Teil 8: Entrauchungsklappen. Winterthur: Eigenverlag 2011.

[183] Schweizerische Normen-Vereinigung (SNV): SN EN 12101-7, Rauch- und Wärmefreihaltung. Teil 7: Entrauchungsleitungen. Winterthur: Eigenverlag 2011.

[184] Schweizerische Normen-Vereinigung (SNV): SN EN 12101-10, Rauch- und Wärmefreihaltung. Teil 10: Energieversorgung. Winterthur: Eigenverlag 2005.

[185] Schweizerische Normen-Vereinigung (SNV): SN EN 12101-1, Rauch- und Wärmefreihaltung. Teil 1: Bestimmungen für Rauchschürzen. Winterthur: Eigenverlag 2005.

[186] Deutsches Institut für Normung e.V. (DIN): DIN 18232-7, Rauch- und Wärmefreihaltung. Teil 7: Wärmeabzüge aus schmelzbaren Stoffen. Bewertungsverfahren und Einbau. Berlin: Beuth Verlag GmbH 2008.

[187] ARGEBAU, Fachkommission Bauaufsicht: Muster-Richtlinie über brandschutztechnische Anforderungen an Leitungsanlagen (Muster-Leitungsanlagen-Richtlinie, MLAR), Stand 17.11.2005.

[188] Milke, J.A.: Smoke management by mechanical exhaust or natural venting. In: National Fire Protection Association (NFPA): The SFPE handbook of fire protection engineering. 4. Auflage, Quincy: Eigenverlag 2008, S. 4/387-4/412.

[189] Vereinigung Kantonaler Feuerversicherungen (VKF): Brandschutzrichtlinie VKF-BSR 17-03, Kennzeichnung von Fluchtwegen, Sicherheitsbeleuchtung, Sicherheitsstromversorgung. Bern: Eigenverlag 2003.

[190] Electrosuisse, Verband für Elektro-, Energie- und Informationstechnik (SEV): Niederspannungs-Installationsnorm SEV 1000 (NIN). Fehraltorf: Eigenverlag 2010.

[191] Vereinigung Kantonaler Feuerversicherungen (VKF): Brandschutzrichtlinie VKF-BSR 26-03, Lufttechnische Anlagen. Bern: Eigenverlag 2003.

[192] VdS Schadenverhütung GmbH: VdS 3122, Winderkennungseinrichtungen zur Steuerung windbeeinflusster Rauch- und Wärmeabzugsanlagen. Köln: Eigenverlag 2009.

[193] Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein (SIA): SN EN 1366-8, Feuerwiderstandsprüfungen für Installationen. Teil 8: Entrauchungsleitungen. Winterthur: Eigenverlag 2004.

[194] Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein (SIA): SN EN 1366-9, Feuerwiderstandsprüfungen für Instal-

lationen. Teil 9: Entrauchungsleitungen für einen Einzelabschnitt. Winterthur: Eigenverlag 2008.

[195] Interessengemeinschaft Brandschutz- und Entrauchungs-Komponenten (IG-BSK): Arbeitsblatt Entrauchungskanäle. Hinwil: Eigenverlag 2006.

[196] Lippe, M.; Wesche, J.; Rosenwirth, D. u.a.: Kommentar mit Anwendungsempfehlungen und Praxisbeispielen zu der Muster-Leitungsanlagen-Richtlinie MLAR, Muster-Systemböden-Richtlinie MSysBÖR, Muster einer Verordnung über den Bau von Betriebsräumen für elektrische Anlagen MEltBauVO. 4. komplett überarbeitete Auflage, Winnenden: Heizungs-Journal Verlags-GmbH 2011.

[197] Feuerwehr Koordination Schweiz (FKS): Feuerwehr 2015, Konzept der FKS. Beschluss der Regierungskonferenz der Feuerwehr Koordination Schweiz FKS vom 5. Juni 2009. Bern: Eigenverlag.

[198] Steinert, C.: Smoke and heat production in tunnel fires. SP Swedish National Testing and Research Institute; heute: SP Technical Research Institute of Sweden. In: International Conference on Fires in Tunnels, 10.-11. Oktober 1994, Borås. Tagungsband.

[199] Schweizerische Normen-Vereinigung (SNV): SN EN ISO 13943, Brandschutz-Vokabular (ISO 13943:2008). Winterthur: Eigenverlag 2010.

[200] Helios Ventilatoren AG: Impulsventilatoren für die Garagen-Entlüftung. Technische Dokumentation. Urdorf: Eigenverlag (ohne Jahr).

[201] Santos, G.; Aguirre, B.E.: A critical review of emergency evacuation simulation models. University of Delaware, Disaster Research Center. Newark: Eigenverlag 2004/2005.

[202] Castle, Ch. J.E.: Guidelines for assessing pedestrian evacuation software applications. University College London, Centre for Advanced Spatial Analysis. London: Eigenverlag 2007.

[203] Deutsches Institut für Normung e.V. (DIN): DIN 4102-12, Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen. Teil 12: Funktionserhalt von elektrischen Kabelanlagen. Anforderungen und Prüfung. Berlin: Beuth Verlag GmbH 1998.

[204] International Organization for Standardization (ISO); International Electrotechnical Commission (IEC): ISO/IEC Leitfaden 51, Leitfaden für die Aufnahme von Sicherheitsaspekten in Normen. Genf: Eigenverlag 1999.

[205] Vereinigung Kantonaler Feuerversicherungen (VKF): Verzeichnis VKF-40-03, Begriffe. Bern: Eigenverlag 2003.

[206] Ingason, H.: SP Report 2005:48, Model scale railcar fire tests. SP Swedish National Testing and Research Institute; heute: SP Technical Research Institute of Sweden. Borås: Eigenverlag 2005.

[207] Schneider, U.: Systematische Zusammenstellung von Bemessungsbrandszenarien für den Brandschutzentwurf. Dokumentation, Stand 20.12.2006. Technische Universität Wien, Institut für Hochbau und Technologie.

[208] Drysdale, D.: An introduction to fire dynamics. 2. Auflage, New York: John Wiley & Sons Ltd 2002.

[209] Harrison, R.; Spearpoint, M.: The balcony spill plume. Entrainment of air into a flow from a compartment opening to a higher projecting balcony. In: Fire Technology, 43. Jahrgang, Nr. 4 (2007), S. 301-317.

[210] Harrison, R.; Spearpoint, M.: A comparison between channelled and unchannelled balcony spill plumes. Department of Civil and Natural Resources Engineering, University of Canterbury, Christchurch 2010.

[211] Harrison, R.; Spearpoint, M.: A review of simple entrainment calculation methods for the thermal spill plume. Department of Civil and Natural Resources Engineering, University of Canterbury, Christchurch. In: Journal on Engineering Performance-Based Fire Codes, 9. Jahrgang, Nr. 4 (2007), S. 142-153.

[212] Chow, W.K.; Han, S.S.; Dong, H. u.a.: Full-scale burning tests on heat release rates of furniture. In: International Journal on Engineering Performance-Based Fire Codes, 6. Jahrgang, Nr. 3 (2004), S. 168-180.

[213] Putorti, A.D.: NIJ Report 604-00, flammable and combustible liquid spill/burn patterns. U.S. Department of Justice, National Institute of Justice. Washington DC: Eigenverlag 2001.

[214] Peacock, R.D; Reneke, P.A.; Bukowski, R.W. u.a.: Defining flashover for fire hazard calculations. In: Fire Safety Journal, 32. Jahrgang, Nr. 4 (1999), S. 331-345.

[215] Wilk, E.; Kotthoff, I.: Der Brand in Räumen. Auswertung von Originalbrandversuchen im Vergleich mit analytischen Rechenverfahren, Teil 1. In: vfdb-Zeitschrift, 61. Jahrgang, Nr. 4 (2012), S. 172-187.

[216] Stroup, D.W.; Madrzykowski, D.: Report of Test FR 4018, heat release rate tests of plastic trash containers. National Institute of Standards and Technology (NIST). Gaithersburg: Eigenverlag 2003.

[217] National Institute of Standards and Technology, Building and Fire Research Laboratory: Fire on the web, fire experiment results. http://fire.nist.gov/bfrlpubs (Stand: 15.07.2013).

[218] Dobbernack, R.: Bedrohung von Kulturgut durch Feuer. In: Tagung „Sicherheit und Katastrophenschutz für Museen, Archive und Bibliotheken“ der Konferenz nationaler Kultureinrichtungen (knk), 26.-29. Oktober 2006, Leipzig. Tagungsunterlagen.

12.2 Tabellenverzeichnis

Tab. 1 Konzept-Stufen für brandschutztechnische Berechnungen

Tab. 2 Formulierungsbeispiele für allgemeine Schutzziele, funktionale Schutzziele und Planungsziele

Tab. 3 Grundlegende Begriffe zur Risikobeurteilung
Eigene Darstellung, Daten entnommen aus: [15], S. 5-16; [16], S. 8-10; [204], S. 2-3

Tab. 4 Verfahren zur Risikobeurteilung in der Brandschutzplanung
Eigene Darstellung, Daten entnommen aus: [17], S. 26-85

Tab. 4.1 Risikoindizes
Eigene Darstellung, Daten entnommen aus: [218], S. 55 (Tabelle 1)

Tab. 5 Vergleich der Verfahren zur Risikobeurteilung in der Brandschutzplanung
Eigene Darstellung, Daten entnommen aus: [17], S. 19-25

Tab. 6 Phasen eines Naturbrandes

Tab. 7 Entwicklung von Brandszenarien

Tab. 8 Systematische Auswahl von Brandszenarien und Bemessungsbrandszenarien
Eigene Darstellung, Daten entnommen aus: [18], S. 5-8; [19], S. 6-11

Tab. 9 Mindestangaben für die Darstellung von Brandverlaufskurven

Tab. 10 Wirkungen von Massnahmen des technischen und abwehrenden Brandschutzes auf den Brandverlauf

Tab. 11 Kenngrössen und Bestimmungsgleichungen zur Quantifizierung des Brandverlaufs

Tab. 12 Kenngrössen zur Quantifizierung der thermischen Eigenschaften von Stoffen

Tab. 13 Mathematisch deterministische Brandmodelle

Tab. 14 Methoden und Modelle zur Festlegung von Bemessungsbränden

Tab. 15 Vereinfachte Naturbrandmodelle für axialsymmetrische Plumes

Tab. 15.1 Formelzeichen für axialsymmetrische Plumes

Tab. 15.2 Einmischkonstante C_e
Eigene Darstellung, Daten entnommen aus: [45], S. 52; [59], [80]

Tab. 15.3 Konstanten k, C und η
Eigene Darstellung, Daten entnommen aus: [69], S. 8

Tab. 16 Vereinfachte Naturbrandmodelle für horizontal strömende Rauchgasschichten

Tab. 17 Vereinfachte Naturbrandmodelle für nicht axialsymmetrische Plumes

Tab. 17.1 Formelzeichen für horizontal strömende Rauchgasschichten und für nicht axialsymmetrische Plumes

Tab. 17.2 Durchflusskoeffizient C_d
Eigene Darstellung, Daten entnommen aus: [80]

Tab. 17.3 Einmischkoeffizient a
Eigene Darstellung, Daten entnommen aus: [85]

Tab. 17.4 Durchflusskoeffizient C_d‘
Eigene Darstellung, Daten entnommen aus: [86], S. 177

Tab. 17.5 Flashover-Parameter
Eigene Darstellung, Daten entnommen aus: [19], S. 13; [214], S. 332-335

Tab. 17.6 Brandleistung zur Erzeugung eines Flashovers
Eigene Darstellung, Daten entnommen aus: [97] [214]

Tab. 18 Konstante Brandleistung

Tab. 18.1 Bemessungsbrände nach CEN/TR 12101-5, BS 7346-4 und BS 7346-7
Eigene Darstellung, Daten entnommen aus: [29], S. 24; [45], S. 29; [95], S. 12

Tab. 18.2 Bemessungsbrände nach NFPA 92B und NFPA 204
Eigene Darstellung, Daten entnommen aus: [25], S. 36; [31], S. 67

Tab. 18.3 Bemessungsbrände nach VdS 2827
Eigene Darstellung, Daten entnommen aus: [60], S. 19

Tab. 18.4 Bemessungsbrände für vollentwickelte Raumbrände
Eigene Darstellung, Daten entnommen aus: [20], S. 72-75; [41], S. 10

Tab. 18.5 Brandleistung typischer Zündquellen
Eigene Darstellung, Daten entnommen aus: [20], S. 61; [51], S. 3/11-3/53; [215], S. 179

Tab. 18.6 Brandleistung typischer Zündquellen nach NFPA 92B und NFPA 204
Eigene Darstellung, Daten entnommen aus: [25], S. 34; [31], S. 67

Tab. 18.7 Charakteristische CO/CO_2-Verhältnisse
Quelle: [100], S. 101

Tab. 19 Nominelle Temperaturzeitkurven

Tab. 20 Brandleistungskurven

Tab. 20.1 Brandentwicklungs-Kategorien und Brandintensitätskoeffizienten von αt^2-Bränden
Eigene Darstellung, Daten entnommen aus: [18], S. 11-12; [19], S. 15-16; [25], S. 38; [31], S. 72

Tab. 20.2 Brandentwicklungs-Kategorien und Brandausbreitungsgeschwindigkeiten von sich kreisförmig ausbreitenden αt^2-Bränden

Tab. 20.3 Parameter zu den Bemessungsbränden nach DIN 18232-2 und DIN 18232-5
Eigene Darstellung, Daten entnommen aus: [26], S. 23; [27], S. 31

Tab. 20.4 Bemessungsgruppen nach DIN 18232-2 und DIN 18232-5
Eigene Darstellung, Daten entnommen aus: [26], S. 10; [27], S. 9

Tab. 20.5 Bemessungsbrände nach DIN 18232-2 und DIN 18232-5

Tab. 20.6 Parameter zu den Bemessungsbränden für Lagerhöhen ≤ 2 m nach TRVB S 125, Anhang 9
Eigene Darstellung, Daten entnommen aus: [30], S. 8-9, S. 51-53

Tab. 20.7 Parameter zu den Bemessungsbränden für Lagerhöhen > 2 m nach TRVB S 125, Anhang 9
Eigene Darstellung, Daten entnommen aus: [30], S. 8-9, S. 51-53

Tab. 20.8 Bemessungsbrände für Lagerhöhen ≤ 2 m nach TRVB S 125, Anhang 9

Tab. 20.9 Brandausbreitungsgeschwindigkeiten für geometrische Ausbreitungsmodelle
Eigene Darstellung, Daten entnommen aus: [5], S. 123, zitiert nach [47]; [26], S. 23; [27], S. 31; [49], S. 272; [55], S. 69

Tab. 20.10 Brandentwicklungsdauer nach DIN 18232-2 und DIN 18232-5
Eigene Darstellung, Daten entnommen aus: [26], S. 9-10; [27], S. 8

Tab. 21 Schematisierte Naturbrandmodelle

Tab. 21.1 Schematisierter Brandverlauf nach VDI 6019 Blatt 1 (Phasen 1-5)
Eigene Darstellung, Daten entnommen aus: [24], S. 13-28

Tab. 21.2 Schematisierter Brandverlauf nach DIN EN 1991-1-2/NA (Phasen 1-3)
Eigene Darstellung, Daten entnommen aus: [41], S. 19-21

Tab. 21.3 Charakteristische Werte für t_α und $\dot{q}_{max}$ nach DIN EN 1991-1-2/NA
Eigene Darstellung, Daten entnommen aus: [41], S. 19

Tab. 21.4 Eurocode 1 mit nationalen Anhängen

Tab. 22 Allgemeine Naturbrandmodelle

Tab. 23 Experimentelle Brandleistungskurven

Tab. 23.1 Maximale Brandleistung von Matratzen inkl. Bettwaren (ohne Raum- und Ventilationsbeeinflussung, mit Zündung durch einen brennenden Papierkorb)
Eigene Darstellung, Daten entnommen aus: [51], S. 3/29

Tab. 24 Anwendung der Feldmodelle

Tab. 25 Modelle zur Quantifizierung der Wirkung des Brandrauches auf Personen

Tab. 25.1 Beurteilungskonzentrationen F_i zur Auslösung von Fluchtunfähigkeit verursachenden Reizungen nach ISO 13571
Eigene Darstellung, Daten entnommen aus: [127], S. 7

Tab. 26 Planungsziele und Leistungskriterien zur Beurteilung der Personensicherheit

Tab. 27 Luft-/Sauerstoffbedarf in Abhängigkeit des Heizwertes H_u
Eigene Darstellung, Daten entnommen aus: [55], S. 58, S. 71-74; [141], S. 3/66; [142], S. 61-65

Tab. 28 Bestimmung des Extinktionskoeffizienten zur Beurteilung der Personensicherheit

Tab. 29 Reaktionsdauern nach PD 7974-6 (Auszug)
Eigene Darstellung, Daten entnommen aus: [126], S. 25; [136], S. 36-37

Tab. 30 Verhaltensszenarien nach PD 7974-6 zur Festlegung der Reaktionsdauer (Auszug)
Eigene Darstellung, Daten entnommen aus: [126], S. 9; [136], S. 24

Tab. 31 Qualifizierung der Gebäudekomplexität, des Alarmierungssystems und der Alarmorganisation nach PD 7974-6
Eigene Darstellung, Daten entnommen aus: [126], S. 10-11; [136], S. 28-29

Tab. 32 Gehgeschwindigkeit, spezifischer Personenstrom und deren Einflussfaktoren

Tab. 33 Gehgeschwindigkeit und spezifischer Personenstrom auf horizontalen und vertikalen Wegelementen nach Nelson und Mowrer
Eigene Darstellung, Daten entnommen aus: [147]

Tab. 34 Faktoren zur Bildung von Evakuierungsszenarien und zur Ermittlung der erforderlichen Evakuierungsdauer

Tab. 35 Zeitdauern einer Evakuierung

Tab. 36 Kenngrössen und Bestimmungsgleichungen zur Quantifizierung des Brandrauches und der Erkennungsweite

Tab. 37 Kenngrössen zur Charakterisierung einer Population

Tab. 38 Evakuierungsmodelle

Tab. 39 Individualmodelle
Eigene Darstellung, Daten entnommen aus: [165] [201] [202]

Tab. 40 Leistungsfähigkeit von Individualmodellen

Tab. 41 Eingabedaten für Individualmodelle

Tab. 42 Kriterienkatalog zur Überprüfung der Qualität von Brandsicherheitsberechnungen

Tab. 43 Kriterienkatalog zur Überprüfung der Qualität von Personensicherheitsberechnungen

Tab. 44 Zusammenstellung der Brand- und Evakuierungsszenarien

Tab. 45 Zusammenstellung der Ergebnisse

Tab. 46 Kriterienkatalog für die Dokumentation von Brandsicherheitsberechnungen

Tab. 47 Kriterienkatalog für die Dokumentation von Personensicherheitsberechnungen

Tab. 48 Kriterienkatalog für die Dokumentation von brandschutztechnischen Anlagen (Dokumente)

Tab. 49 Anwendungsmöglichkeiten von Ingenieurmethoden nach dem Bauproduktерecht

Tab. 50 Anwendungsmöglichkeiten von Ingenieurmethoden nach den VKF-Brandschutzvorschriften

Tab. 51 Prinzipien der Rauch- und Wärmeableitung

Tab. 52 VKF-Brandschutzrichtlinie „Rauch- und Wärmeabzugsanlagen“ (VKF-BSR 22-03)

Tab. 53 Für den Rauch- und Wärmeabzug und die Rauchlenkung relevante Normen, Richtlinien und technische Regeln

Tab. 54 RWA-Komponenten (Anforderungen, Prüfverfahren, Kennzeichnung)

Tab. 55 Bemessung von RWA mit tabellarischen Verfahren und Handrechenmethoden

Tab. 56 Spezielle Aspekte der Bemessung, der Ausführung und des Betriebs von RWA

Tab. 56.1 Korrekturfaktoren c_z für unterschiedliche Öffnungsarten von Zuluftöffnungen
Eigene Darstellung, Daten entnommen aus: [26], S. 9; [30], S. 46

Tab. 56.2 Funktionserhaltsklassen E von elektrischen Kabelanlagen nach DIN 4102-12
Quelle: [203], S. 3

12.3 Abbildungsverzeichnis

Abb. 1 Prozesskette der leistungsorientierten Brandschutzplanung
Eigene Darstellung, Daten entnommen aus: [9], S. 3-17; [10], S. 21-25

Abb. 2 Prozesskette der präskriptiven Brandschutzplanung

Abb. 3 Schema zur Risikobeurteilung nach DIN EN 31010
Quelle: modifiziert übernommen aus [17], S. 10

Abb. 4 Flussdiagramm zur Risikobeurteilung
Quelle: modifiziert übernommen aus [16], S. 11

Abb. 5 Beziehung von Risikobegriffen nach ISO/IEC Leitfaden 51
Eigene Darstellung, Daten entnommen aus: [204], S. 2-3

Abb. 6 Brainstorming

Abb. 7 Strukturierte Befragung

Abb. 8 Beispiel eines Indexverfahrens
Quelle: [46]

Abb. 9 Beispiel eines Ereignisbaumes
Quelle: [17], S. 51

Abb. 10 Beispiel eines Fehlerbaumes
Quelle: [17], S. 48

Abb. 11 Beispiel einer FN-Kurve

Abb. 12 Beispiel einer Risikomatrix
Quelle: modifiziert übernommen aus [87], S. 21

Abb. 13 ALARP-Prinzip
Quelle: [17], S. 76

Abb. 14 Verlauf eines Naturbrandes
Quelle: modifiziert übernommen aus [5], S. 91

Abb. 15 Zeitlicher Verlauf der Brandleistung bei Begrenzung durch Brandlast, Ventilation oder Sprinkleranlage
Quelle: modifiziert übernommen aus [20], S. 229

Abb. 16 Zeitverlauf eines Feuerwehreinsatzes

Abb. 17 Einfluss von Brandmeldeanlagen auf den zeitlichen Verlauf der Brandleistung bei hoher (Kurve A) und bei geringer (Kurve B) Brandausbreitungsgeschwindigkeit
Quelle: modifiziert übernommen aus [20], S. 223

Abb. 18 Durch automatische Löschanlage kontrollierte Brandphase nach VDI 6019 Blatt 1 (Phase 4)
Quelle: modifiziert übernommen aus [24], S. 11

Abb. 19 Einfluss von Sprinklern auf die Brandleistung in Abhängigkeit der Wasserbeaufschlagung und der Löschdauer (mit $\dot{Q}(t_{act}) = 500$ kW und $w \geq 0.07$ mm/s)
Quelle: modifiziert übernommen aus [20], S. 80

Abb. 20 Beispielhafter Brandleistungsverlauf bei Einsatz einer Sprinkleranlage
Quelle: modifiziert übernommen aus [20], S. 230

Abb. 21 Einfluss von Rauch- und Wärmeabzugsanlagen auf die Brandleistung bei einem ventilationsgesteuerten Brand
Quelle: modifiziert übernommen aus [20], S. 234

Abb. 22 Zeitlicher Verlauf der Brandleistung bei Einsatz einer Feuerwehr (qualitativ)
Quelle: modifiziert übernommen aus [20], S. 236

Abb. 23 Einteilung der Brandquelle nach McCaffrey
Quelle: modifiziert übernommen aus [208], S. 119

Abb. 24 Plume über kleinem Brand
Quelle: modifiziert übernommen aus [81], S. 75

Abb. 25 Plume über grossem Brand
Quelle: modifiziert übernommen aus [81], S. 72

Abb. 26 Punkt- und flächenförmige Brandquellen
Quelle: modifiziert übernommen aus [208], S. 120

Abb. 27 Einmischprozesse im Brandraum (1. Strömungsbereich)
Quelle: modifiziert übernommen aus [86], S. 16

Abb. 28 Einmischung zwischen der Brandraumöffnung und der Überlaufkante (2. Strömungsbereich)
Quelle: modifiziert übernommen aus [86], S. 17

Abb. 29 Balkon-Überlauf-Plume
Quelle: modifiziert übernommen aus [210], S. 2

Abb. 30 Anliegender-Überlauf-Plume

Quelle: modifiziert übernommen aus [211], S. 150

Abb. 31 2D-Balkon-Überlauf-Plume mit seitlich abschliessenden Wänden (3. Strömungsbereich)
Quelle: modifiziert übernommen aus [86], S. 186

Abb. 32 2D-Balkon-Überlauf-Plume mit seitlich abschliessenden Wänden und markierten Einmischbereichen
Quelle: modifiziert übernommen aus [86], S. 194

Abb. 33 Einmischung oberhalb der Überlaufkante mit freiem (rechts) und anliegendem (links) 3D-Überlauf-Plume (3. Strömungsbereich)
Quelle: modifiziert übernommen aus [86], S. 18

Abb. 34 Verhalten eines 3D-Balkon-Überlauf-Plumes bei unterschiedlichen Brandraumöffnungsweiten, mit/ohne Schürzen unter dem Balkon
Quelle: modifiziert übernommen aus [86], S. 216

Abb. 35 2D-Anliegender-Überlauf-Plume mit seitlich abschliessenden Wänden (3. Strömungsbereich)
Quelle: modifiziert übernommen aus [86], S. 262

Abb. 36 3D-Anliegender-Überlauf-Plume mit unterschiedlichen Brandraumöffnungsbreiten
Quelle: modifiziert übernommen aus [86], S. 168, S. 268-269, S. 271

Abb. 37 3D-Anliegender-Überlauf-Plume in der Post-Flashover-Phase
Quelle: modifiziert übernommen aus [25], S. 19

Abb. 38 Horizontaler Rauchgasmassenstrom an einer Brandraumöffnung und unter einem Vorsprung

Abb. 39 Laterale Ausdehnung eines Überlauf-Plumes mit Rauchschürzen
Quelle: modifiziert übernommen aus [81], S. 92

Abb. 40 Laterale Ausdehnung eines Überlauf-Plumes ohne Rauchschürzen
Quelle: modifiziert übernommen aus [81], S. 92

Abb. 41 Steady-State-Brände
Quelle: modifiziert übernommen aus [60], S. 14

Abb. 42 Verhältniszahl ξ_{chem} der freigesetzten Energie zur maximal möglichen Energiefreisetzung in Abhängigkeit des Luftangebotes $\Phi = 1/\lambda$
Quelle: modifiziert übernommen aus [81], S. 51

Abb. 43 Einheits-Temperaturzeitkurve
Quelle: modifiziert übernommen aus [102], S. 12

Abb. 44 Schwelbrandkurve
Quelle: modifiziert übernommen aus [103], S. 6

Abb. 45 Aussenbrandkurve und Hydrokarbon-Brandkurve im Vergleich zur ETK und zur Schwelbrandkurve
Quelle: modifiziert übernommen aus [104], S. 10

Abb. 46 Brandleistungskurven für das αt^2-Modell
Quellen: modifiziert übernommen aus [25], S. 40 und [31], S. 73

Abb. 47 Brandleistungskurven zu den Bemessungsbränden „BMG 4-Langsam“, „BMG 4-Mittel“ und „BMG 4-Schnell“

Abb. 48 Brandleistungkurve zum Bemessungsbrand „BRE 1“ für die Dauer von 10 Minuten bis zum Erreichen der maximalen Brandleistung für MRWA

Abb. 49 Ermittlung der Brandfläche über die Geometrie der Brandausbreitung
Quelle modifiziert übernommen aus: [20], S. 68

Abb. 50 Brandleistungsverläufe bei verschiedenen Auslösezeitpunkten und gleicher Effektivität der Löschmassnahmen
Quelle: modifiziert übernommen aus [60], S. 16

Abb. 51 Brandleistungsverläufe bei gleichem Auslösezeitpunkt und unterschiedlicher Effektivität der Löschmassnahmen
Quelle: modifiziert übernommen aus [60], S. 16

Abb. 52 Brandverläufe und -phasen für niedrigenergetische Brände
Quelle: modifiziert übernommen aus [24], S. 10

Abb. 53 Brandverläufe und -phasen für hochenergetische Brände
Quelle: modifiziert übernommen aus [24], S. 11

Abb. 54 Zeitverlauf der Brandleistung nach DIN EN 1991-1-2/NA, Anhang BB
Quelle: modifiziert übernommen aus [41], S. 21

Abb. 55 Brandleistungskurve eines 1.22 m x 1.22 m x 1.22 m grossen Holzpalettenstapels
Quelle: modifiziert übernommen aus [51], S. 3/33

Abb. 56 Brandleistung in Abhängigkeit der Höhe eines aus 1.22 m x 1.22 m grossen Holzpaletten bestehenden Stapels
Quelle: modifiziert übernommen aus [51], S. 3/33

Abb. 57 Spezifische Brandleistung einer Benzinlache auf verschiedenen Bodenbelägen
Quellen: modifiziert übernommen aus [51], S. 3/38 und [213], S. 16-17, S. 23

Abb. 58 Brandleistungskurven von Windjacken
Quelle: modifiziert übernommen aus [51], S. 3/14

Abb. 59 Brandleistungskurven von Handkoffern
Quelle: modifiziert übernommen aus [51], S. 3/28

Abb. 60 Brandleistungskurven von (Kopf-)Kissen
Quelle: modifiziert übernommen aus [51], S. 3/34

Abb. 61 Brandleistungskurven eines Abfallbehälters aus HDPE mit 136 l zellulosischem Inhalt
Quelle: modifiziert übernommen aus [216], S. 6, S. 8, S. 15

Abb. 62 Brandleistungskurven von 2.1 m hohen und 11 kg schweren Douglasien (Christbäume)
Quelle: modifiziert übernommen aus [51], S. 3/34

Abb. 63 Brandleistungskurve einer Matratze ohne Bettwaren, mit Brandentstehung in der Matratzenecke
Quelle: modifiziert übernommen aus [217]

Abb. 64 Brandleistungskurve einer Matratze ohne Bettwaren, mit Brandentstehung in der Matratzenmitte
Quelle: modifiziert übernommen aus [217]

Abb. 65 Brandleistungskurven von Kaffeemaschinen
Quelle: modifiziert übernommen aus [51], S. 3/14

Abb. 66 Brandleistungskurven von freistehenden und eingebauten Geschirrspülern (ohne Inhalt)
Quelle: modifiziert übernommen aus [108], S. 41

Abb. 67 Brandleistungskurven von freistehenden Waschmaschinen (ohne Inhalt)
Quelle: modifiziert übernommen aus [108], S. 39

Abb. 68 Brandleistungskurven von freistehenden und eingebauten Kühl-/Gefrierschränken (ohne Inhalt)
Quelle: modifiziert übernommen aus [108], S. 43

Abb. 69 Brandleistungskurven von Fernsehgeräten
Quelle: modifiziert übernommen aus [108], S. 37

Abb. 70 Brandleistungskurve eines PC (Zentraleinheit)
Quelle: modifiziert übernommen aus [51], S. 3/14

Abb. 71 Brandleistungskurven von PC-Tastaturen (Nadelflammen-Prüfverfahren)
Quelle modifiziert übernommen aus: [109], S. 18

Abb. 72 Brandleistungskurven von 19“-CRT-PC-Monitoren mit HIPS-Gehäusen (Nadelflammen-Prüfverfahren)
Quelle: modifiziert übernommen aus [109], S. 16

Abb. 73 Brandleistungskurven von PC-Druckern (ohne Papier und Toner)
Quelle: modifiziert übernommen aus [51], S. 3/17

Abb. 74 Brandleistungskurve eines hölzernen Schreibtisches
Quellen: modifiziert übernommen aus [51], S. 3/20; [212], S. 170

Abb. 75 Brandleistungskurve einer hölzernen Kommode
Quellen: modifiziert übernommen aus [51], S. 3/21; [217]

Abb. 76 Brandleistungskurven eines hölzernen Verkaufsstandes mit Ablegeflächen und ausgestellter Ware
Quelle: modifiziert übernommen aus [110], S. 197

Abb. 77 Brandleistungskurve eines hölzernen Verkaufsstandes mit hochgeklappten Ablegeflächen
Quelle: modifiziert übernommen aus [110], S. 196, S. 198

Abb. 78 Brandleistungskurve eines Verkaufsstandes
Quelle: modifiziert übernommen aus [217]

Abb. 79 Brandleistungskurve von 2 metallenen Zeitschriften-Ablagegestellen mit total 15 kg Papier
Quelle: modifiziert übernommen aus [111], S. 23

Abb. 80 Brandleistungskurve von 3 metallenen Zeitschriften-Ablagegestellen mit total 90 kg Papier
Quelle: modifiziert übernommen aus [111], S. 22, S. 25

Abb. 81 Brandleistungskurve eines Etagenbettes
Quelle: modifiziert übernommen aus [217]

Abb. 82 Brandleistungskurve eines gepolsterten Schalenstuhls
Quelle: modifiziert übernommen aus [112], S. 36, S. 38

Abb. 83 Brandleistungskurve eines Bürostuhls
Quelle: modifiziert übernommen aus [112], S. 40, S. 43

Abb. 84 Brandleistungskurve eines 2er-Sofas
Quelle: modifiziert übernommen aus [217]

Abb. 85 Brandleistungskurve eines 3er-Sofas
Quelle: modifiziert übernommen aus [217]

Abb. 86 Brandleistungskurven eines Polstersessels, 2er- und 3er-Sofas
Quelle: modifiziert übernommen aus [50], S. 44, S. 46, S. 55

Abb. 87 Brandleistungskurven von Garderoben
Quelle: modifiziert übernommen aus [51], S. 3/51

Abb. 88 Brandleistungskurve eines Einzelarbeitsplatzes
Quelle: modifiziert übernommen aus [112], S. 47, S. 52, S. 54

Abb. 89 Brandleistungskurve eines Mehrfach-Arbeitsplatzes
Quelle: modifiziert übernommen aus [112], S. 57, S. 65, S. 67

Abb. 90 Brandleistungskurve eines Einzelarbeitsplatzes mit 2 Stellwänden
Quelle: modifiziert übernommen aus [217]

Abb. 91 Brandleistungskurve eines Einzelarbeitsplatzes mit 3 Stellwänden
Quelle: modifiziert übernommen aus [217]

Abb. 92 Brandleistungskurven von Einzelarbeitsplätzen
Quelle: modifiziert übernommen aus [51], S. 3/31

Abb. 93 Brandleistungskurven von 4er-Arbeitsplätzen
Quelle: modifiziert übernommen aus [51], S. 3/32

Abb. 94 Brandleistungskurven von Einzelarbeitsplätzen
Quelle: modifiziert übernommen aus [51], S. 3/32

Abb. 95 Brandleistungskurven einzelner Personenwagen mit Baujahr Ende 70er- bis Mitte 80er-Jahre
Quelle: modifiziert übernommen aus [51], S. 3/41

Abb. 96 Brandleistungskurven einzelner Personenwagen (Baujahr unbekannt)
Quelle: modifiziert übernommen aus [51], S. 3/42

Abb. 97 Heizwert eines PKW in Abhängigkeit des Publikationsjahres der Versuchsergebnisse
Quelle: modifiziert übernommen aus [116], S. 10

Abb. 98 Brandleistungskurven von mehreren bzw. einzelnen Personenwagen
Quelle: modifiziert übernommen aus [117], S. 39, S. 44, S. 46, S. 53, S. 55, S. 62, S. 78, S. 80, S. 87, S. 92, S. 94

Abb. 99 Brandleistungskurve eines Schulbusses der Marke „Volvo“ aus den 60er-Jahren
Quellen: modifiziert übernommen aus [118], S. 19 und [119]; zitiert nach [207], S. 62

Abb. 100 Brandleistungskurve eines Sattelschleppers der Marke „Leyland DAF“ mit einer Ladung von 2 t Möbel
Quellen: modifiziert übernommen aus [119]; zitiert nach [207], S. 65-66 und [120], S. 1216, S. 1223

Abb. 101 Brandleistungskurve einer nachgestellten Lastwagenladung
Quellen: modifiziert übernommen aus [118], S. 22 und [119]; zitiert nach [207], S. 63

Abb. 102 Brandleistungskurven von nachgestellten Sattelschlepper-Aufliegern mit Ladung
Quellen: modifiziert übernommen aus [121], S. 58-69; [122], S. 1, S. 13-14

Abb. 103 Brandleistungskurven von Eisen- und U-Bahnwagen
Quellen: modifiziert übernommen aus [119]; zitiert nach [207], S. 67-68, S. 70-71 und [206], S. 9

Abb. 104 Umhüllende Brandleistungskurven von betriebsbereiten Personenwagen
Quelle: modifiziert übernommen aus [207], S. 55-56

Abb. 105 Kurve der konvektiven Brandleistung eines brennenden Personenwagens
Quelle: modifiziert übernommen aus [123], S. 16

Abb. 106 Kurve der konvektiven Brandleistung von zwei brennenden Personenwagen
Quelle: modifiziert übernommen aus [123], S. 16

Abb. 107 Erkennungsweite S als Funktion von D_L nach Jin
Quelle: modifiziert übernommen aus [133], S. 191; zitiert nach [139]

Abb. 108 Erkennungsweite S als Funktion von D_L nach ISO 13571
Quelle: modifiziert übernommen aus [133], S. 191; zitiert nach [127]

Abb. 109 Erkennungsweite S als Funktion von D_L nach Wilk
Quelle: modifiziert übernommen aus [133], S. 192; zitiert nach [12]

Abb. 110 Einfluss der Reizung des Auges auf die Sehschärfe
Quelle: modifiziert übernommen aus [131], S. 39; zitiert nach [132]

Abb. 111 Erkennungsweite als Funktion des Extinktionskoeffizienten für reflektierende und hinterleuchtete Rettungszeichen
Quelle: modifiziert übernommen aus [140], S. 2/299

Abb. 112 Erkennungsweite als Funktion des Extinktionskoeffizienten für reizenden und nicht reizenden Rauch
Quelle: modifiziert übernommen aus [139], S. 2/56

Abb. 113 Gehgeschwindigkeit als Funktion des Extinktionskoeffizienten für reizenden und nicht reizenden Rauch
Quelle: modifiziert übernommen aus [139], S. 2/56

Abb. 114 Verteilung der Reaktionsdauern mit den P_1- und P_{99}-Werten
Quelle: modifiziert übernommen aus [126], S. 24

Abb. 115 Gehgeschwindigkeit als Funktion der Personendichte
Quelle: modifiziert übernommen aus [147], S. 3/370

Abb. 116 Spezifischer Personenstrom als Funktion der Personendichte
Quelle: modifiziert übernommen aus [147], S. 3/371

Abb. 117 Modellierungsarten bei Individualmodellen
Quelle: modifiziert übernommen aus [202], S. 12

Abb. 118 Qualifizierungs-, Verifizierungs- und Validierungs-Prozess nach Schlesinger
Quelle: [169], S. 149; zitiert nach [168], S. 103-104

Abb. 119 Abhängigkeit des Extinktionskoeffizienten vom Verdünnungsgrad bei der Verbrennung von Heizöl EL (Kurve 1) und Holz (Kurve 2)
Quelle: modifiziert übernommen aus [175], S. 57

Abb. 120 Contour-Plot einer CFD-Analyse (Rauchkonzentration)
Quelle: [200], S. 8

Abb. 121 Vergleich der Massenströme von NRWA und MRWA
Quelle: modifiziert übernommen aus [176], S. 29

Abb. 122 Einfluss der effektiven Zuluftflächen, bezogen auf die effektive Abluftfläche bei NRWA
Quelle: modifiziert übernommen aus [81], S. 118

Abb. 123 Geometrische und lichte Öffnungsfläche
Quelle: modifiziert übernommen aus [64], S. 28

Abb. 124 Plugholing
Quelle: modifiziert übernommen aus [81], S. 109

Abb. 125 Einfluss von Dicke und Temperaturerhöhung der Rauchgasschicht auf den maximalen Massenstrom pro RWG
Quelle: modifiziert übernommen aus [188], S. 4/407

Abb. 126 Beispielanwendung des Nomogramms nach DIN 18232-5
Quelle: modifiziert übernommen aus [27], S. 19

Abb. 127 Verlegung elektrischer Betriebsmittel in zu entrauchenden Brandabschnitten (EG, OG)
Quelle: modifiziert übernommen aus [196], S. 236

12.4 Begriffsverzeichnis

Es sei auf die Definitionen des VKF-Verzeichnisses „Begriffe“ (40-03) und auf die Erläuterung der Begriffe in den Tabellen 3, 11, 12 und 36 verwiesen, die an dieser Stelle nicht wiederholt werden. *[205]*

Die Norm SN EN ISO 13943 „Brandschutz-Vokabular (ISO 13943:2008)“ stellt für den Bereich Brandschutz eine einheitliche Terminologie bereit, die an dieser Stelle berücksichtigt und auszugsweise wiedergegeben wird. *[199]*

Abklingen des Brands: Phase des Brandablaufs, nachdem ein Brand seine maximale Intensität erreicht und überschritten hat und bei der sowohl die Brandleistung als auch die Temperatur des Brands wieder abnehmen. [199], Ziffer 4.104

Acute Exposure Guideline Level 2 (AEGL-2): Luftgetragene Stoffkonzentration (in ppm oder mg/m^3), bei deren Einhaltung die allgemeine Bevölkerung in ihrer Fähigkeit zu fliehen nicht beeinträchtigt wird und sie keine irreversiblen oder andere schwerwiegenden, lang andauernden Gesundheitseffekte erleiden kann. Expositionen bei luftgetragenen Stoffkonzentrationen unterhalb AEGL-2 können aber spürbares Unwohlsein hervorrufen.

AEGL-Werte werden für die Expositionszeiten 10, 30, 60, 240 und 480 Minuten ermittelt.

Aerodynamisch wirksame Öffnungsfläche (A_w): Mathematisches Produkt aus geometrischer Öffnungsfläche A_g eines natürlichen RWG und dem Durchflussbeiwert c_v. [26], S. 6

Akzeptanzkriterien: Kriterien, welche die Grundlage für die Beurteilung der Akzeptierbarkeit der Sicherheit der Bemessung einer Baute oder einer Anlage bilden. [199], Ziffer 4.2

Algebraisch: Auf einer oder mehreren mathematischen Gleichungen (Formeln) beruhend, die den Wert einer oder mehrerer Variablen als Funktion des Raumes oder der Zeit berechnen. Die Gleichungen sind exakt lösbar. [65], S. 3

Analytisch: Auf der mathematischen Darstellung eines theoretisch exakt belegbaren physikalischen oder chemischen Prozesses beruhend (im Gegensatz zu empirisch). [65], S. 3

Anfangsbedingungen: Mathematische Werte oder Beziehungen für physikalische Grössen, die diese zur Startzeit einer numerischen Simulation annehmen (z.B. Temperatur der Brandlast vor der Zündung; Temperatur der Raumluft vor Brandbeginn; Öffnungszustand von Türen und Fenstern zu Brandbeginn). [65], S. 4

Bemessungsbrand (design fire): Quantitative Beschreibung der angenommenen Eigenschaften eines Brandes innerhalb des Bemessungsbrandszenariums. [199], Ziffer 4.64

Der Bemessungsbrand ist

- typischerweise eine idealisierte Darstellung der zeitlichen Veränderung wichtiger Brandkenngrössen, wie z.B. Brandleistung, Brandausbreitungsgeschwindigkeit, Flammenhöhe, Ausbeute an Verbrennungsprodukten, Rauchpotenzial und Temperatur, die der Brandschutzbemessung zugrunde gelegt wird (Quellterm);
- der grösste Brand, der sich, hinsichtlich Ausdehnung und produzierter Wärmeleistung, bis zum Einsetzen wirksamer Löschmassnahmen entwickeln kann;
- ein theoretischer – aber durchaus möglicher – Brandverlauf, der eine Vielzahl denkbarer Brandverläufe – etwa 90-95 % aller möglichen Brandverläufe – auf der sicheren Seite erfasst und somit eine ausreichende Brandsicherheit gewährleistet („Worst Credible"-Brand). [20], S. 39-42

Bemessungsbrandszenarium (design fire scenario): Bestimmtes Brandszenarium, für das eine deterministische brandschutztechnische Untersuchung durchgeführt wird. [199], Ziffer 4.65

Das Bemessungsbrandszenarium basiert auf einem geeignet festgelegten Bemessungsbrand und sollte in der Regel aus der Anwendung eines Risikobeurteilungsverfahrens hervorgehen. Es sollte zu einem für die jeweilige brandschutztechnische Problemstellung ausreichend sicheren Brandschutzkonzept führen und Angaben betreffend Raum-Gebäude-Struktur, Ventilationsbedingungen, brandschutztechnische Anlagen, Sicherheitssysteme sowie Verhalten von Personen und Einsatzkräften umfassen. [18], S. 3-8; [60], S. 5

Brandentwicklungsdauer: Zeitspanne zwischen Brandentstehung und Beginn der wirksamen Brandbekämpfung. [26], S. 9; [27], S. 8

Brandlastgesteuerter Brand: Die Abbrandrate wird nur durch die Stoffeigenschaften und die thermische Einwirkung der Umgebung limitiert und ist gleich der Pyrolyserate. Es steht ausreichend Sauerstoff für die Verbrennung zur Verfügung.

Brandmodell, Brandsimulation: Berechnungsverfahren, das ein System oder einen Vorgang in Bezug auf die Entwicklung eines Brandes, einschliesslich Branddynamik und Brandauswirkungen, beschreibt. [199], Ziffer 4.116

Brandphasen: Einteilung des Brandverlaufs in bestimmte Abschnitte (Phasen), die ein oder mehrere gemeinsame charakteristische Merkmale aufweisen. Typischerweise wird der Brand in die Phase der Entzündung, des Schwelens, der Ausbreitung und des Abklingens unterteilt. [20], S. 42

Brandrauch: Bei einer Verbrennung (Pyrolyse) entstehendes Aerosol (Gemisch) aus

- Partikeln der Grösse 10^{-5}-10^{-9} m (z.B. Russ-, Schlacken-, Aschepartikel),
- Flüssigkeitstropfen (z.B. Wassernebel) und
- gasförmigen Produkten (z.B. CO_2, CO, N_2, SO_2, Schwelgase sowie Wasser-, Öl-, Säuredämpfe).

Die Rauchfarbe ergibt sich aus dem Russ (schwarz), dem Wasserdampf (weiss) und durch die Schwelgase (gelblich, grünlich). [53], S. 143

Brandschutzingenieurmethoden, Brandschutzingenieurwesen: Anwendung ingenieurmässiger Ansätze, Prinzipien, Regeln, Verfahren und Methoden, die auf wissenschaftlichen Erkenntnissen basieren und zur Bewertung des erforderlichen Brandsicherheitsniveaus oder zur Bemessung von notwendigen Brandschutzmassnahmen geeignet sind. [2], Nr. C 62/28; [199], Ziffer 4.126

Brandschutzkonzept: Zusammenstellung und Beschreibung der ganzheitlich aufeinander abgestimmten baulichen, technischen, organisatorischen und abwehrenden Brandschutzmassnahmen im Hinblick auf die geforderten Schutzziele, und zwar unter Berücksichtigung der gebäudespezifischen Nutzung, des Brandrisikos und des zu erwartenden Schadenausmasses. Dabei ist der Erreichungsgrad der definierten Schutzziele zu bewerten und das brandschutzrechtlich erforderliche Sicherheitsniveau zu belegen. [6], Ziffer 2; [7], Ziffer 4.2

Brandszenarium (fire scenario): Qualitative Beschreibung des Brandverlaufs mit Zeitangaben für Schlüsselereignisse, die den untersuchten Brand charakterisieren und von anderen möglichen Bränden unterscheidet.

Das Brandszenarium beschreibt üblicherweise den Entstehungs- und Wachstumsprozess eines Brandes sowie seine vollentwickelte Phase und seine Abnahme in Zusammenhang mit der Umgebung (wie bauliche Struktur, Gebäudenutzung, Ventilationsbedingungen), mit Systemen (brandschutztechnische Einrichtungen) und Personen (Löschmassnahmen), die den Brandverlauf beeinflussen. [199], Ziffer 4.129

Brandverlauf: Beschreibung eines Brandes mit zeitlich definierten Parametern, welche die Charakteristik desselben erfassen und ihn von anderen möglichen Bränden differenzieren. Dazu gehören unter anderem die zeitliche Entwicklung der Brandleistung und der Brandfläche.

Ceiling-Jet: Durch einen Plume ausgelöster und sich direkt unter der Decke horizontal ausbreitender Gasstrom (horizontaler Deckenstrahl innerhalb einer Heissgasschicht).

Computational Fluid Dynamics (CFD): Englischer Ausdruck für numerische Strömungsberechnung.

Computational Fluid Dynamics-Model (CFD-Modell): Numerisches Brandmodell, das mithilfe der fundamentalen Gleichungen der Strömungsmechanik und der Thermodynamik die kontinuierliche Verteilung der aero- und thermodynamischen Grössen liefert.

Dosis: Die Dosis ist das Produkt aus Expositionsdauer und Konzentration.

Durchflussbeiwert (c_v): Verhältnis des unter festgelegten Bedingungen gemessenen tatsächlichen Volumenstroms zum theoretischen Volumenstrom eines natürlichen RWG. [180], Ziffer 3.1.7

Empirisch: Auf der näherungsweisen, theoretisch nicht belegbaren mathematischen Darstellung von Experimenten oder Beobachtungen beruhend (im Gegensatz zu analytisch). [65], S. 3

Aus experimentellen Daten abgeleitete Näherungsformeln weisen in der Regel keine direkte Einheitenbeziehung zwischen einzusetzenden und resultierenden Grössen auf. Daher ergibt sich die Einheit des resultierenden Zahlenwertes nicht aus der Gleichung selbst, sondern muss zugewiesen werden.

Entzündung: Einleitung der Verbrennung. [199], Ziffer 4.187

Fail-Safe: Ausfallsicher. Fail-Safe-Systeme gehen im Falle einer Abweichung vom Sollzustand automatisch in den betriebs- oder verfahrenstechnisch sicheren Zustand über (Prinzip des beschränkten Versagens).

Feldmodell: Numerische Strömungsberechnung mit dem CFD-Modell. Der Ausdruck „Feldmodell“ soll verdeutlichen, dass im untersuchten Raum bzw. Feld an sehr vielen Raumpunkten die aero- und thermodynamischen Grössen berechnet werden.

Flashover (Feuerüberschlag): Übergang zu einer Brandphase, in der die gesamte Oberfläche der brennbaren Stoffe in einem geschlossenen Raum am Brand beteiligt ist bzw. Zeitpunkt, in dem die Brandleistung, die Temperatur und die Rauchproduktion stark ansteigen. [10], S. 76; [199], Ziffer 4.156

Geometrische Öffnungsfläche (A_g): Öffnungsfläche eines natürlichen RWG, gemessen in der Ebene, die durch die Oberfläche des Bauwerkes definiert ist, in der sie das natürliche RWG berührt. [180], Ziffer 3.1.12

Integraler Test: Dient der Überprüfung sämtlicher dem Brandschutz dienenden, automatisch angesteuerten Komponenten sowie deren Zusammenwirken. Dies beinhaltet die korrekte Ansteuerung und Funktion. [172], Ziffer 3.2

Konformitätserklärung: Die Konformitätserklärung bescheinigt, dass ein Produkt alle anwendbaren Vorschriften über sein Inverkehrbringen erfüllt, insbesondere diejenigen der grundlegenden Sicherheits- und Gesundheitsanforderungen sowie der Konformitätsbewertung. Sie wird durch den Hersteller oder seinen Vertreter ausgestellt.

Leistungsbezogene Bemessung (performance based design): Bemessung im Hinblick auf die Erreichung bestimmter Ziele und Leistungskriterien. [199], Ziffer 4.249

Leistungskriterien: vgl. Akzeptanzkriterien.

LD_{50}-Wert: Der LD_{50}-Wert gibt die Menge eines Stoffs oder einer Strahlung an, bei der 50 % einer Population bestimmter Lebewesen sterben. Die Werte werden durch Tierversuche ermittelt.

Mehrzonenmodell: Brandmodell, in dem in einem Raum unterschiedliche Zonen definiert werden: die obere (heisse) Schicht, die untere (kalte) Schicht, der Plume, die Wände etc. In der oberen und unteren Schicht werden homogene Temperaturen angenommen.

Mobile Rauch- und Wärmeabzugsgeräte (RWG): Mobile RWG werden von der Feuerwehr bereitgestellt und im Rahmen der Intervention von dieser betrieben. Zu den mobilen RWG zählen beispielsweise die Klein- und Grosslüfter.

Modalwert (Modus): Wert, der bei einer empirischen Häufigkeitsverteilung (Messwertreihe) am häufigsten vorkommt.

Modell: Objekt, das auf der Grundlage einer Analogie zu einem Original eingesetzt und genutzt wird, um Aufgaben zu lösen, deren Durchführung am Original selbst nicht möglich oder zu aufwendig sind. Im Rahmen des ingenieurmässigen Brandschutzes handelt es sich um die mathematisch-physikalische Nach- oder Abbildung der Realität durch mathematische Gleichungen oder durch Nachbauten im verkleinerten Massstab. Die Grundlagen der Abbildung bilden dabei die bestehenden Naturgesetze, wobei modellspezifische Annahmen, Näherungen oder Vereinfachungen beteiligt sind, was bedeutet, dass ein Modell stets die Abbildung eines realen Geschehens mit bestimmten Einschränkungen ist.

Naturbrandmodell: Auf Grundlage der physikalisch bedingten Einwirkungen entwickeltes Modell zur Simulation von natürlichen Bränden.

Perzentil (Perzentilwert): Der Perzentilwert P_x bezeichnet denjenigen Ausprägungsgrad eines Merkmals, unterhalb dessen x Prozent der Beobachtungen liegen. Perzentile weisen einen Wertebereich von P_1 bis P_{99} auf. Beispiel: P_{25} = 1.7 bedeutet, dass 25 % aller Beobachtungen unterhalb des Wertes 1.7 liegen.

Plugholing: Zustand, bei dem Luft von der raucharmen Schicht durch die Rauchgasschicht zum Rauch- und Wärmeabzugsgerät abgezogen wird (infolge zu dünner Rauchgasschicht, zu hoher Förderleistung des MRWG und/oder zu grosser horizontaler Öffnung des NRWG).

Plume: Rauchgassäule, die durch den aufsteigenden Massenstrom der heissen Brandgase und durch eingemischte Umgebungsluft über einem Brandherd gebildet wird. Durch die angesaugte Umgebungsluft nimmt die Strömungsgeschwindigkeit des Auftriebsstrahles auf dem Strömungsweg nach oben ab, während sich seine Masse und sein Volumen vergrössern. Der Ansaugvorgang wird durch die Druckdifferenz zwischen dem ruhenden und dem strömenden Medium angetrieben. Die Druckdifferenz selbst entsteht aus dem Geschwindigkeitsunterschied, gemäss den Gesetzen der Strömungsmechanik.

Plume-Modelle: Auf vereinfachten Strömungsbetrachtungen und experimentell gewonnenen Daten beruhende mathematische Ausdrücke, welche die aufsteigenden Rauchgase und die Einmischung von Umgebungsluft in den Bereich der Flammen beschreiben. Dabei wird der eingemischte Luftmassenstrom im Allgemeinen als Funktion

- der Energiefreisetzungsrate (konvektiver Anteil),
- der Brandfläche und
- der Höhe, über die Luft eingemischt werden kann,

berechnet.

Quellterm: Zeitliche Verläufe für die Freisetzungsraten von Wärme (Brandleistung) und Verbrennungsprodukten (Schadstoffmassenstrom, Schadstoffproduktionsrate).

Randbedingungen: Mathematische Werte oder Beziehungen für physikalische Grössen, die diese an den Rändern des Rechen- bzw. Simulationsraumes annehmen (z.B. konstante Strömungsgeschwindigkeit an einer Deckenöffnung; konstanter Wärmefluss durch eine Wand). [65], S. 3

Rauchabschnitt: Bereich in einem Raum, begrenzt durch Rauchschürzen oder Bauteile unterhalb der Decke, die im Brandfall die horizontale Ausbreitung der Rauchgase begrenzen.

Raucharme Schicht (Kaltgasschicht): Unter der heissen Rauchgasschicht liegende kühle Zone, in die geringe Anteile von Brandrauch eingemischt werden kann.

Rauchfrei: Rauchfreiheit geht davon aus, dass im ganzen Raum, also auch im deckennahen Bereich, kein Rauch vorhanden ist (wie von den Brandschutzvorschriften beispielsweise für Sicherheitstreppenhäuser gefordert).

Rauchgas: vgl. Brandrauch.

Rauch- und Wärmeabzugsanlage (RWA): Gesamtheit aller baulichen und technischen Einrichtungen, die als System dazu dienen, im Brandfall Rauch und Wärme aus Bauten und Anlagen kontrolliert ins Freie abzuführen. Dazu gehören neben NRWG und MRWG auch Öffnungen für die Zufuhr von Ersatzluft oder zum Abbau von Überdruck sowie Rauchschürzen, Steuerungssysteme, Energieversorgung etc. [205], S. 14

Response Time Index (Trägheitsindex): Kennzeichnet die Ansprechempfindlichkeit eines Sprinklers (in $m^{1/2} \cdot s^{1/2}$), die im Wesentlichen durch das Volumen-Oberflächen-Verhältnis seines Auslöseelementes bestimmt wird (Verhältnis von Wärmespeichervermögen zu Wärmeaufnahme in einem Luftstrom mit einer Geschwindigkeit von 1 m/s).

Russ: Feinteilige Kohlenstoffpartikel (z.B. C_8H, C_6H) aus der unvollständigen Verbrennung eines organischen Materials. [53], S. 152

Schwelen: Brennen eines Materials ohne Flammenbildung und ohne sichtbares Licht. [199], Ziffer 4.296

Stack Effect (Kamineffekt): Von unten nach oben gerichtete Luftströmung im Gebäude bei gegenüber innen kälteren Umgebungstemperaturen. Bei gegenüber innen wärmeren Aussentemperaturen stellt sich eine von oben nach unten gerichtete Luftströmung ein (Reverse Stack Effect).

Stöchiometrische Verbrennung: Den chemischen Reaktionsgleichungen entsprechende Verbrennung (Oxidation) mit dem Mindestsauerstoffbedarf.

Ventilationsgesteuerter Brand: Die Abbrandrate wird durch die im Brandbereich verfügbare Luft (Sauerstoff) begrenzt. Es kommt zur Ausbreitung und gegebenenfalls Sekundärzündung nicht verbrannter Pyrolyseprodukte.

Verbrennungsmodell: Quantitative Beschreibung der aus dem Verbrennungsprozess hervorgehenden Produkte. Zu diesen Verbrennungsprodukten gehört neben den stofflichen Produkten auch die entstehende Wärme.

Vollbrand: Brandphase, in der alle in einem Raum vorhandenen brennbaren Stoffe am Brand beteiligt sind. [199], Ziffer 4.164

Vollständige Verbrennung: Verbrennung, bei der alle Verbrennungsprodukte vollständig oxidiert werden. [199], Ziffer 4.50

12.5 Abkürzungsverzeichnis

AEGL	acute exposure guideline level
ALARP	as low as reasonable practicable (so gering wie vernünftigerweise praktikabel)
ASET	available safe egress time
BA	Brandabschnitt
BAF	Brandabschnittsfläche
bb	brennbar
BMA	Brandmeldeanlage
BMG	Bemessungsgruppe (nach DIN 18232)
BRE	Brandrauchentlüftungsanlage (NRWA nach TRVB S 125)
BRA	Brandrauchabsauganlage (MRWA nach TRVB S 125)
BSA	Brandschutzarbeitshilfe der Vereinigung Kantonaler Feuerversicherungen
BSE	Brandschutzerläuterung der Vereinigung Kantonaler Feuerversicherungen
BSI	British Standards Institution
BSN	Brandschutznorm der Vereinigung Kantonaler Feuerversicherungen
BSR	Brandschutzrichtlinie der Vereinigung Kantonaler Feuerversicherungen
BSV	Brandschutzvorschriften der Vereinigung Kantonaler Feuerversicherungen
CE	Conformité Européenne (Übereinstimmung mit EU-Richtlinien)
CEA	Comité Européen des Assurances
CEN	Comité Européen de Normalisation (Europäisches Komitee für Normung)
CFD	Computational Fluid Dynamics
DIBt	Deutsches Institut für Bautechnik
DIN	Deutsches Institut für Normung e.V.
ELA	Elektroakustische Anlage, elektrische Lautsprecheranlage
EN	Europäische Norm
ETK	Einheits-Temperaturzeitkurve
EU	Europäische Union
FEC	fractional effective concentration
FED	fractional effective dose
FDS	Fire Dynamics Simulator (CFD-Modell von NIST)

HDPE	high-density polyethylene (Polyethylen hoher Dichte)
ISO	International Organization for Standardization
IVS	Impuls-Ventilations-System
IVTH	Interkantonale Vereinbarung zum Abbau technischer Handelshemmnisse
LD	letale Dosis
LEF	Löscheinsatz der Feuerwehr
MRWA	maschinelle Rauch- und Wärmeabzugsanlage
MRWG	maschinelles Rauch- und Wärmeabzugsgerät
nbb	nicht brennbar
NBS	National Bureau of Standards (heute: National Institute of Standards and Technology, NIST)
NFPA	National Fire Protection Association
NIST	National Institute of Standards and Technology (USA)
NRWA	natürliche Rauch- und Wärmeabzugsanlage
NRWG	natürliches Rauch- und Wärmeabzugsgerät
OIB	Österreichisches Institut für Bautechnik
PE	Polyethylen
PUR	Polyurethan
RDA	Rauchschutz-Druckanlagen
RSET	required safe egress time
RTI	response time index (Trägheitsindex)
RWA	Rauch- und Wärmeabzugsanlage
RWG	Rauch- und Wärmeabzugsgerät
SES	Verband Schweizerischer Errichter von Sicherheitsanlagen
SFPE	Society of Fire Protection Engineers
SIA	Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein
SN	Schweizer Norm
SNV	Schweizerische Normen-Vereinigung
SPA	Sprinkleranlage
SUVA	Schweizerische Unfallversicherungsanstalt
TRVB	technische Richtlinien vorbeugender Brandschutz
VDI	Verein Deutscher Ingenieure e.V.
VdS	ehemaliger Verband der Schadenversicherer; heute: VdS Schadenverhütung GmbH, ein Unternehmen des Gesamtverbandes der Deutschen Versicherungswirtschaft e.V. (GDV)
VKF	Vereinigung Kantonaler Feuerversicherungen
WA	Wärmeabzug

12.6 Stichwortverzeichnis

A

Abbrand
  ~geschwindigkeit 56f
  ~rate 56f

Abbruchfehler 122f, 172

Abhängigkeit
  exponentielle ~ 169
  proportionale ~ 169

Abklingen 36, 228

Abklingphase 96, 103

Abweichungen 12, 13, 15
  Dokumentation 175

Alarmierungsdauer 49, 144

Alarmierungssystem 148

Alarmorganisation 148

ALARP 27, 33

algebraisch 229

Aktivierungsdauer
  ~ Brandmelder 50
  ~ RWA 52
  ~ Sprinkler 50
  ~ Löscheinsatz 49, 52

analytisch 229

Anfangsbedingungen 64, 128f, 229

Anwesenheitsverzögerung 49

Aspect Ratio 122

atmosphärische Normbedingungen 69, 140

Aufgebotszeit 49

Auftriebsmodell 126f

Ausrückzeit 49

B

Bauprodukte 188
  ~gesetz 12
  ~recht 12, 187
  ~richtlinie 12
  ~verordnung 12

Bemessungsbrand 48, 229
  Definitionsbereich 36
  Entwicklung 48, 66
  Methoden 67
  Modelle 67

Bemessungsbrandszenarium 42, 229
  Auswahl 44
  Entwicklung 42

Bemessungsgruppen 92, 98

Bemessungsstrategie 18

Berechnungskonzept-Stufen 18

Bestimmungsgleichungen

~ zur Quantifizierung der Erkennungsweite 156
~ zur Quantifizierung des Brandrauchs 156
~ zur Quantifizierung des Brandverlaufs 55, 57

Bericht
~ Brandschutzplanung 16, 174
Planungsgrundlagen~ 16, 174
Schluss~ 15ff, 174

Blickwinkel 130f

Boussinesq-Approximation 126f

Brainstorming 28f

Brand
~art 44
~ausbreitungsgeschwindigkeit 54ff, 90, 92, 96, 100
~ausbreitungsmodell 96f
~belastung 54f
brandlastgesteuerter ~ 36, 86f, 137, 229
~entstehung 40
~entwicklungsdauer 49, 98, 229
~entwicklungsfaktor 56f, 90
~erkennungszeit 93, 98
~fläche 54f, 84, 92, 94, 96f, 100
~herd 40, 47
hochenergetischer ~ 100f
~intensitätskoeffizient 56f, 90, 100
niedrigenergetischer ~ 100f
~ort 44, 46
~phasen 35f, 229
~raum 39, 44
~raumtemperatur 36
~sicherheitsniveau 23
~umfang 54f, 84, 94
ventilationsgesteuerter ~ 36, 86f, 137, 231

Brandfallsteuerungsmatrix 175

Brandkurve
Aussen~ 88f
Hydrokarbon-~ 88f
Norm~ 23
Schwel~ 88f

Brandlast 41, 54f
Anordnung 47
Beschaffenheit 47
spezifische ~ 54f

Brandleistung 46, 54f
konstante ~ 84, 86
konvektive ~ 48
spezifische ~ 36, 54ff
~ typischer Zündquellen 86f
~ zur Erzeugung eines Flashovers 83

Brandleistungskurve(n)
~ Abfallbehälter 106
~ Benzinlache 107
~ Bürostuhl 113
~ Douglasien (Christbäume) 107
~ Einzelarbeitsplatz 114f
~ Eisenbahnwagen 118
~ Etagenbett 112
experimentelle ~ 106ff
~ Fernsehgeräte 109
~ Garderoben 112
~ Geschirrspüler 108
~ Handkoffer 106
~ Holzpalettenstapel 106
~ Kaffeemaschinen 108
~ Kommode 110
~ (Kopf-)Kissen 106
~ Kühl-/Gefrierschränke 108
~ Lastwagenladung 118
~ Mehrfach-Arbeitsplatz 114f
~ Matratze 108
~ Personenwagen 116
~ PC-Drucker 111
~ PC-Monitore 110f
~ PC-Tastatur 110
~ PC-Zentraleinheit 110
~ Sattelschlepper 118
~ Sattelschlepper-Auflieger 118
~ Schalenstuhl 112
~ Schreibtisch 110
~ Schulbus 118
~ Sofas 112f
~ U-Bahnwagen 118
~ Verkaufsstand 110f
~ Waschmaschinen 109
~ Windjacken 106
~ Zeitschriften-Ablagegestelle 110f
~ αt^2-Modell 90f

Brandmodelle
allgemeine Natur~ 104f
deterministische ~ 59ff
mathematische ~ 59
physikalische ~ 11, 59
probabilistische ~ 11, 23, 59
schematisierte Natur~ 100ff
vereinfachte Natur~ 68ff

Brandrauch
Bestimmungsgleichungen 156
Kenngrössen 156
Wirkung auf Personen 128 ff

Brandszenarien
Auswahl 43ff
Einflussgrössen 38ff
Entwicklung 38ff

Brandverlauf, Brandverlaufskurven
Beschreibung 46
Bestimmungsgleichungen 55, 57
Darstellung 46f
Kenngrössen 54, 56
Mindestangaben 46f
Wirkung von Massnahmen 48ff

Brandschutzkonzepte
Aufbau 13
Arten 13
Inhalt 13
Wahl 15

Brandschutzmanagement 15

Brandschutzplanung
Bericht 174f

leistungsorientierte ~ 13ff
Prozesskette 13ff
risikoorientierte ~ 24

Brandszenarium, Brandszenarien 38, 229
systematische Auswahl 43ff
Entwicklung 39ff

Brennwert 56

BSI
~ BS 7346-4 84f
~ BS 7346-5 90
~ BS 7346-7 84
~ PD 7974-1 96
~ PD 7974-2 74
~ PD 7974-6 145ff, 151, 162

C

CEN/TR 12101-5 68, 84, 85

CFD 59, 230
~-Modell(e) 61, 63, 65, 77
~-Programme 170, 192
~-Simulationen 49, 117, 140

Compiler 240

Computersimulationen 104f

D

Delphi-Verfahren 28f

Detektionsdauer 144
~ Brandmelder 50
~ Sprinkler 50

Differenzdrucksysteme 191

DIN
~ 4102-11 88
~ 4102-12 211
~ 18232-2 68, 92f, 96, 98, 203f, 207
~ 18232-5 68, 92f, 96, 98, 203, 206f
~ 18232-7 203
~ EN 1991-1-2/NA 87, 98, 102f
~ EN 31010 26

Diskretisierung 122f, 240
Ansätze 61, 240
Fehler 122f, 172
Verfahren 121

Dobbernack 53

Dokumentation 16f, 174ff
Aufbau 174
Darstellungen 175f
Inhalt 174
Kriterienkataloge 177ff

E

Einheits-Temperaturzeitkurve 88f

Einmischkonstante 73

Eintrittshäufigkeit 25

Eintrittswahrscheinlichkeit 25

empirisch(e) 230
~ Ansätze 59
~ Daten 46
~ Formeln 60, 62, 64

Energieversorgung 201, 203

Entlüftung 192, 194

Entrauchungsklappen 201

Entrauchungsleitungen 201, 210ff

Entrauchungsöffnung 195, 197

Entwicklungsbrand 36, 44

Entzündung 36f, 66, 230

Ereignisbaumanalyse 30f

Erkennungsweite 128, 130, 138, 142f, 155
Bestimmungsgleichungen 131, 156f
Parameter für ~ 155f

Ergebnisse 168, 175f, 180, 183f

Erkundungsverzögerung 49

EU-Grundlagendokument 12, 187f

Eurocode 18f, 102f

Evakuierungsberechnungen 191

Evakuierungsdauer 36, 153, 159, 191
erforderliche ~ 144, 152, 154
verfügbare ~ 144

Evakuierungsmodell(e)
Anwendungsgrundsätze 159
Charakterisierung 159ff
Typen 158f

Evakuierungsstrategien 153

Evakuierungsszenarien 152, 154

Evans 51

Expansionsrate des Netzes 122

exponentielle Abhängigkeit 169

Extinktionskoeffizient 134f, 137ff, 154, 156f, 192
massenspezifischer ~ 154, 156f
optischer ~ 154, 156, 157

F

FDS 48, 77, 170

Fehler 168
Abbruch~ 122f, 172
Analysemethoden 168f
Diskretisierungs~ 122f, 172
~quellen 168
~schätzung 169

Fehlerbaumanalyse 30f

Feldmodelle 61, 63, 65, 104f
Anwendung 121ff

FN-Kurven 30f

Feuerwehreinsatz 49

flächenspezifische
~ Abbrandgeschwindigkeit 56

~ Abbrandrate 56f
Flammpunkt 56f
Flashover 36, 83
Brandleistung 83
Parameter 83
Fluchtdauer 144, 146, 149
Folgen-/Wahrscheinlichkeitsmatrix 32f
Formel(n)
empirische ~ 60, 62, 64
Plume-~ 68
Funktionserhalt 211, 212f

G

Gebäudenutzer
Fluchtvermögen 40
Reaktionsvermögen 40
Gefahr 25f
Gehgeschwindigkeit 139ff, 149ff
Gitterpunkte 122
Grenzrisiko 25f
Grundlagendokument 12, 187f

H

Hadjisophocleous 74f
Hansell 74f
Harrison 74ff
Häufigkeit 25
Hautverbrennungen 136, 139
Heissgasschicht 60
Heizwert 54ff
effektiver ~ 54ff
Holz 57
~-Luft-Quotient 137, 139
oberer ~ 56
PKW 117
~-sauerstoff-Quotient 137, 139
~spezifische Schadstoffausbeute 154, 156
~spezifischer Schadstoffpartikel-Entstehungsanteil 154, 156
unterer ~ 56
Heskestad 68f
Hilfsfrist 49
Hinkley 68f
Hosser 53

I

Impulsventilator 192f
Impuls-Ventilation-System 192, 194
Individualmodelle 159, 161, 163
Charakterisierung 163ff
Eingabedaten 167
Leistungsfähigkeit 167
Integraler Test 175, 212, 230
ISO
~ 834-1 23
~ 9705 110, 120
~ 13387-2 43, 90, 96
~ 13571 131, 133, 137, 156
~ 16734 68f
~ 16735 68
~/IEC Leitfaden 53, 26
~/TR 13387-2 43, 90, 96
~/TR 16738 145f, 151, 162
~/TS 16733 43, 90, 96

J

Jin 131, 142f, 156f

K

Kaltgasschicht 231
Kenngrössen
brandtechnologische ~ 47
~ zur Charakterisierung der Bewegung einer Menschenmenge 149
~ zur Charakterisierung einer Population 158
~ zur Quantifizierung der Erkennungsweite 156
~ zur Quantifizierung der thermischen Eigenschaften von Stoffen 58
~ zur Quantifizierung des Brandrauchs 156
~ zur Quantifizierung des Brandverlaufs 54ff
Knoten 122f, 125, 129
Ko 74f
Kokoschka 135
Kompetenzfelder 239
Kompilierung 169, 240
Konvektion 48, 134, 136
Konvergenzkriterium 172
Konzentration
CO-~ 138
CO_2-~ 136ff, 140
HCN-~ 138
O_2-~ 136f
Russ~ 138, 140
Konzentrationsvermögen 142f
Konzept-Stufen 18f
Kriterienkatalog
Dokumentation brandschutztechnischer Anlagen 185
Dokumentation Brandsicherheitsberechnungen 177ff
Dokumentation Personensicherheitsberechnungen 181ff
Qualitätsüberprüfung Brandsicherheitsberechnungen 171f
Qualitätsüberprüfung Personensicherheitsberechnungen 173

L

Leistungskriterien 22ff, 137f, 230

Leucht
~dichte 134f, 139, 154, 156, 158
~dichtekontrast 130f, 156f
~dichteverhältnis 130f, 156f

Lougheed 74f

Luft
~bedarf 54ff
~überschusszahl 54ff
~verhältniszahl 54ff
~technische Anlagen 202

M

Mach-Zahl 62, 170

Madrzykowski 51, 113, 115

massenspezifische(r)
~ Extinktionskoeffizient 130f, 140, 154, 156f
~ optische Rauchdichte 130f, 154, 156f
~ Schadstoffausbeute 130f, 154, 156f

Massenverlustrate 56

McCaffrey 68f, 83

Mindest
~luftbedarf 54ff, 56
~sauerstoffbedarf 57, 231
~zündenergie 56f

Mischbrandlast 38, 57, 86, 102, 133, 157

Modell
algebraisches ~ 18, 59
Auftriebs~ 126f
~bildung 239
geometrisches Brandausbreitungs~ 96f
FEC-~ 128f, 132f, 135ff
FED-~ 128f, 132ff
hydraulisches ~ 158f, 160, 162
Individual~ 158f, 161, 163ff
makroskopisches ~ 144, 158, 160, 162
Massenverlust-~ 128
mikroskopisches ~ 144, 158, 161, 163
~qualifizierung 169, 239
Rauchverdunkelungs-~ 128
räumlich diskretes ~ 158, 161, 163
räumlich kontinuierliches ~ 158, 161, 163
~validierung 169, 239
~verifizierung 169, 239
Schwellenkontrast-~ 135
αt^2-~ 90f, 96

Morgan 74f

N

Nachweisstrategie 18, 153

Naturbrand 35f

Naturbrandmodell(e)
allgemeine ~ 104f
~ für axialsymmetrische Plumes 68f
~ für horizontal strömende Rauchgasschichten 74f
~ für nicht axialsymmetrische Plumes 76ff
~ für vollentwickelte Raumbrände 86f
schematisierte ~ 100ff
vereinfachte ~ 68ff, 86f

Navier-Stokes-Gleichungen 61, 124

Netz
~aufbau 122f
~elemente 61, 63, 122f, 125ff, 129
~feinheit 164, 171, 180
~typen 122f, 163
~verfeinerung 170f
~winkel 122f

NFPA
~ 92B 64, 68f, 78f, 84f, 87, 90f
~ 101 42
~ 130 162
~ 204 68f, 84f, 87, 90f, 206f

Normalfall 40

Normbedingungen 69, 140

O

Open-Source-Programme 170

optische(r)
~ Extinktionskoeffizient 156f
~ Rauchdichte 130ff, 137ff, 154ff

Ordnungsgrad 172

P

Parameteranalyse 169

Parkiersystem 84, 116

Personensicherheit
Berechnungen 128ff
Nachweis 153
Leistungskriterien 22, 137f

Personenstau 173, 184

Personenstrom 149
~dichte 150
spezifischer ~ 149ff

Planungsbericht 174

Planungsgrundlagenbericht 15f, 174f

Planungsziele 14, 16, 21f, 137f

Plugholing 206ff

Plume 230
2D-Anliegender-Überlauf-~ 78f
3D-Anliegender-Überlauf-~ 77, 78f
2D-Balkon-Überlauf-~ 76f
3D-Balkon-Überlauf-~ 76f
Anliegender-Überlauf-~ 74f, 77ff
axialsymmetrischer ~ 68f
Balkon-Überlauf-~ 74ff
~-Bereich 70
Ecken-~ 80
~-Formeln 64, 70
Linien-~ 80
~-Massenstrom 70
nicht axialsymmetrischer ~ 76ff
~ über grossem Brand 70

~ über kleinem Brand 70
Wand-~ 80

Population 158, 182f

Programm(e) 64f, 161ff, 169f
Entwicklungsstufen 240
~ varianten 240

proportionale Abhängigkeit 169

Prozesskette 13ff

Q

Qualitätssicherung 168ff

Quellterm 231, 240

R

Randbedingungen 64, 128f, 231

Rasbash 131, 156

Rauch- und Wärmeableitung 192ff

Rauch- und Wärmeabzugsanlagen 36, 52f, 231
Aufgaben 191
Ausführung 204ff
Bemessung 202ff
Betriebssicherheit 212f
integraler Test 212f
Komponenten 201
Prüfung 212f
Wartung 212f

Rauch- und Wärmeabzugsgeräte 38, 206ff

raucharme Schicht 60f, 138, 231

Rauchgas
~massenstrom 74ff, 78
~säule 80f, 230
~schichtdicke 74ff, 78, 206f
~schichttemperatur 69, 83

Rauchgasanteile, Rauchgaskomponenten
erstickende ~ 128f, 136, 140f, 143
reizende ~ 128f, 131ff, 135, 137, 139ff
toxische ~ 128, 132f, 135ff, 139ff

Rauchpartikel 134

Rauchpotenzial
~ bezogen auf den Extinktionskoeffizienten 156f
~ bezogen auf die optische Dichte pro Weglängeneinheit 156f

Rauchschutz-Druckanlage 191, 197

Rauchschürzen 80, 93, 197, 201

Raumbrände 86f, 140, 157, 169

Reaktionsdauer 144ff

Reizung(en) 132f
~ des Auges 133
Haut~ 136

Restrisiko 25

Rettungszeichen
hinterleuchtete ~ 134, 140, 142f, 158
reflektierende ~ 134, 139, 142f, 158

Risiko 25
~analyse 25ff
~beurteilung 24ff
~bewertung 25ff
~ermittlung 25f
~indizes 28f, 32
~kriterien 25, 27
~matrix 32f
nicht vertretbares ~ 25f
vertretbares ~ 25f

S

Sauerstoff
~bedarf 54, 139
~konzentration 137

Schadstoffausbeute
heizwertspezifische ~ 154, 156f
massenspezifische ~ 154, 156f

Schadstoff
~beladung 154ff
~massenkonzentration 130f, 154ff
~massenstrom 154, 156f
~produktionsrate 154, 156f

Schadstoffpartikel-Entstehungsanteil
heizwertspezifischer ~ 154, 156f
massenspezifischer ~ 154, 156f

Schlussbericht 15ff, 174

Schmelzwärme
spezifische ~ 58

Schutzinteressen 20f

Schutzziele
allgemeine ~ 20f
funktionale ~ 20f

Schwächungskoeffizient 156f

Schwelen 36, 231

Schwelbrandkurve 88f

Selbstentzündungstemperatur 56f

Sensitivitätsanalyse 169

Sicherheit 25f

Sicherheitsfaktor 153, 170

Sicherheitszuschlag 153, 170

Sichtweite 155, 156f

Siegfried 53

Simulationstechnik 239

Simulationsprogramm 240

SN
~ EN 1366-8 210f
~ EN 1366-9 210f
~ EN 1838 139
~ EN 1991-1-2 18, 96
~ EN 12101-1 201
~ EN 12101-2 201, 212
~ EN 12101-3 201, 212f
~ EN 12101-7 201

~ EN 12101-8 201
~ EN 12101-10 201
~ EN ISO 13943 228
Sommerfall 40, 202
Spearpoint 74ff
Stefan-Boltzmann-Gesetz 83, 140
stochastische Verfahren 169
Strömungsbeeinflussung 192ff
Strömungsmodelle
dynamische ~ 158, 160, 162
strukturierte Befragung 28f
Submodelle 60f, 121
Szenarium 25

T

Temperatur
~gradient 129, 140
~gradienten-Verlauf 138
~leitfähigkeit 58
~leitzahl 58
Temperaturzeitkurve
Einheits-~ 88f
nominelle ~ 88f
Thomas 68f, 73, 83
Toxizität 129, 132f, 140, 192
TRVB
~ A 126 94
~ S 125 19, 64, 68, 94f, 203
Turbulenzmodell
DES-~ 124f
DNS-~ 124f
k-ε–~ 124f
k-ω-SST-~ 124f
LES-~ 77, 124f
RANS-~ 124

U

Umgebungstemperatur 202
Unsicherheiten
Analysemethoden 168f
Quellen 168

V

Ventilationsbedingungen 39
Verbrennung
~ des Atemtraktes 136
~ der Atemwege 139
flammende ~ 46, 140, 157
stöchiometrische ~ 56, 137, 231
vollständige ~ 231
Verbrennungseffektivität 54ff
Verbrennungsmodell 124f, 231
Verbrennungsprozess 48
Verdünnung 192, 194
Verdünnungsgrad 192
Verhaltensszenarien 145ff
Vettori 51
VDI
~ 6019 Blatt 1 51f, 100f
~ 6019 Blatt 2 19, 64, 203
VdS
~ 2827 84f, 91
~ 3122 210
~ CEA 4020 99, 203
vfdb TB 04-01 87
VKF
~-Brandschutznorm 12, 20, 189f
~-Brandschutzvorschriften 11ff, 20, 23, 187, 189ff
~-BSA 1007-03 195
~-BSE 117-03 212f
~-BSN 1-03 12, 174, 189, 191
~-BSR 14-03 189
~-BSR 15-03 195
~-BSR 19-11 189
~-BSR 20-11 189
~-BSR 22-03 12f, 174, 190, 195ff, 204f
~-BSR 24-03 195
Vollbrand(phase) 36, 83, 87, 89, 231

W

Wahrscheinlichkeit 25
Wandmodell 128f
Wärme
~durchgangskoeffizient 58
~eindringzahl 58
~leitfähigkeitsfaktor 50
~leitfähigkeitskoeffizient 58
~übergangskoeffizient 58, 89
Wärmefreisetzungsrate 54f
spezifische ~ 54f
Wärmestrahlung 48, 126f, 134, 136, 140
spezifische ~ 83, 135, 138, 140
Wind
~kräfte 202
~rose 38, 40
Winterfall 40, 202

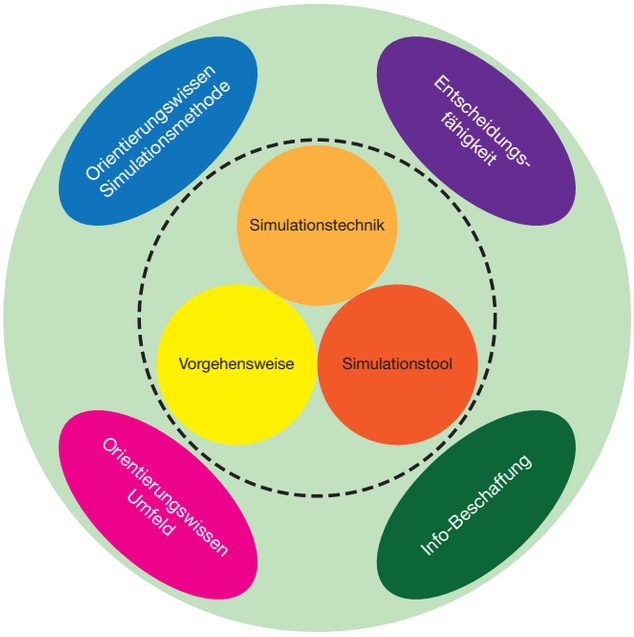
Z

Zeiträume
brandschutztechnisch relevante ~ 14, 18, 23
für die Intervention benötigte ~ 49
Zonenmodelle 61, 63, 65, 104f, 230
Zukoski 68f
Zuluftöffnungen 38, 62, 196f, 202, 204f
Zündquellen 40, 86f
Zündtemperatur 56f

Anhang: Simulationen und Simulationsprogramme

Die Simulation als komplexe Aufgabenstellung

Simulationen sind komplexe Aufgabenstellungen und verlangen breites, gut vernetztes Fach- und Methodenwissen. Dabei sind die folgenden Kompetenzfelder zu unterscheiden:



Kompetenzfelder

Zu den Kernkompetenzen beim Umgang mit Simulationen gehören (schwarzer Kreis)

- eine strukturierte Vorgehensweise,
- Gewandtheit im Umgang mit Simulationstools und
- eine gute Simulationstechnik.

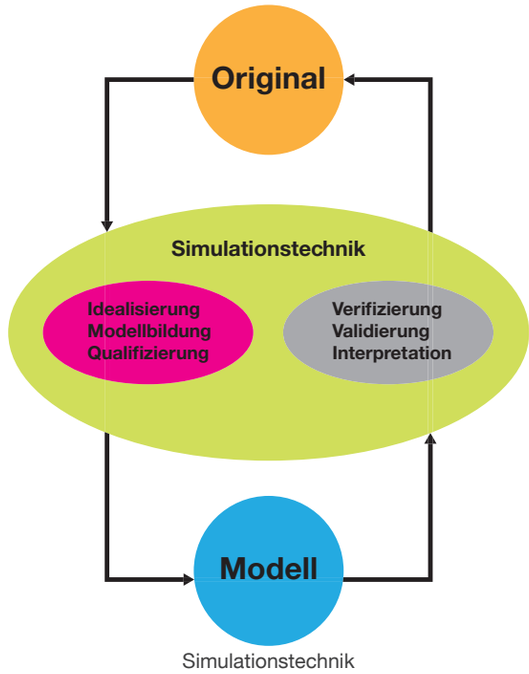
Simulationsaufgaben sind immer in ein mehr oder weniger komplexes Umfeld eingebettet. Sie verlangen von der Fachkraft oft mehr, als ihr spontanes Wissen hergibt. Deshalb müssen die Kernkompetenzen durch generalistische Fähigkeiten ergänzt werden (grüner Kreis). Dazu ist die Weitsicht erforderlich,

- Wissenslücken zu erkennen (Orientierungswissen Simulationsmethode und Umfeld),
- die Fähigkeit, diese Lücken soweit als nötig zu schliessen (Info-Beschaffung) und,
- trotz unvollständiger Grundlagen, sinnvolle Entscheide zu fällen (Entscheidungsfähigkeit).

Unter Simulationstechnik verstehen sich Fähigkeiten, die erforderlich sind,

- um von einem Original ein angemessenes Modell zu bilden und
- um aus diesem Modell zielgerichtet und zuverlässig Aussagen über das Original abzuleiten.

Mithilfe der Simulationstechnik wird also von einem Gebäude oder einer Anlage (Original) ein angemessenes Modell gebildet, mit dem in einem definierten Anwendungsbereich zielgerichtet und zuverlässig Aussagen über das Original abgeleitet werden können. Sie umfasst die folgenden vier Aufgabenbereiche: Modellbildung, Modellqualifizierung, Modellverifizierung, Modellvalidierung.



Simulationstechnik

Die Idealisierung legt fest, welche brandphysikalischen Effekte, wie beispielsweise

- die Systemgrenzen,
- die Brandszenarien,
- die Umwelteinflüsse,
- das Brandverhalten von Stoffen,
- die Geschwindigkeit der Brandausbreitung,

das Simulationsmodell berücksichtigen muss, damit die Ziele der Berechnung erreicht werden. Das Ergebnis der Idealisierung ist das physikalische Modell.

Bei der Modellbildung wird für die idealisierte Brandphysik ein mathematisches Modell aufgebaut. Die Modellbildung verlangt gute Kenntnisse der Simulationswerkzeuge und Kenntnisse der mathematischen Grundlagen.

Betreffend Modellqualifizierung, -verifizierung und -validierung sei auf Kapitel 8.3 verwiesen.

Bei der Interpretation müssen die Simulationsergebnisse in Bezug auf die Aufgabenstellung korrekt gedeutet werden.

Besondere Probleme bei der Simulation von Brandereignissen

In zahlreichen Disziplinen der Ingenieur- und Naturwissenschaften sind die numerischen Simulationen seit Längerem etabliert, wie beispielsweise in der Meteorologie und Klimatologie, in der Luft- und Raumfahrttechnik sowie in der Maschinenbau- und Elektrotechnik.

Für die sich im Brandschutzingenieurwesen stellenden Fragen sind, hinsichtlich der Anwendung von Simulationswerkzeugen, noch zahlreiche Lösungsansätze und Theorien zu finden, die unter anderem auf den folgenden Erschwernissen gründen:

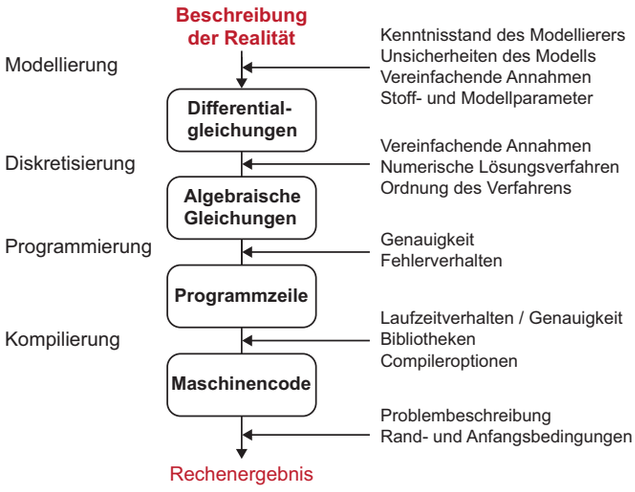
- Bei einem Brandereignis laufen zahlreiche, sich gegenseitig beeinflussende und örtlich stark an Einfluss variierende physikalisch-chemische Teilprozesse ab, wie Wärmeleitung, Wärmestrahlung, Konvektion, Gravitation, Diffusion, Oxidation etc.
- Die Modellierung von Verbrennungsvorgängen ist – abgesehen von wenigen speziellen Fällen – heute (noch) nicht möglich. Somit lässt sich in der Berechnung der eigentliche Quellterm nur stark vereinfacht berücksichtigen.
- Numerisch ist die Turbulenz nicht mit einer abgeschlossenen Theorie oder einem allgemeingültigen Ansatz darstellbar.
- Die zu berechnenden Teilprozesse besitzen sich um mehrere Grössenordnungen unterscheidende Zeit- und Ortsskalen (z.B. verlangt die Auflösung einer Flammenzone Gitterweiten ≤ 1 mm, die für die Grösse eines Strömungsgebietes verantwortlichen Gebäudeabmessungen liegen jedoch in der Grössenordnung von mehreren Metern).
- Die im Brandschutzingenieurwesen zu lösenden Probleme bestehen aus einer vielfältigen Kombination von Konfigurationen (Geometrie, Brennstoffe, Rand- und Anfangsbedingungen).

Somit zählt die Bildung von Modellen bzw. die Aufstellung einer geeigneten Kombination von Submodellen zur aussagekräftigen Beschreibung eines Brandereignisses zu den anspruchsvolleren Ingenieuraufgaben.

Die Entstehung von Simulationsprogrammen

Die folgenden vier Entwicklungsschritte führen zur Entstehung eines Simulationsprogramms:

- Bei der **Modellierung** werden die physikalischen Vorgänge mithilfe eines mathematischen Modells beschrieben, das in Form eines Differenzialgleichungssystems vorliegt. Im Zuge der Modellierung müssen Vereinfachungen, Anfangs- und Randbedingungen eingeführt werden.
- Damit das komplexe Differenzialgleichungssystem mit dem Computer lösbar wird, muss dieses in ein System algebraischer Gleichungen umgeformt werden. Im Zuge dieser **Diskretisierung** müssen auch die numerischen Lösungsalgorithmen festgelegt werden.
- Im Rahmen der **Programmierung** wird mithilfe einer Programmiersprache, wie z.B. Fortran, C oder C++, das diskretisierte Modell in vom Rechner lesbare Instruktionen umgesetzt.
- Die **Kompilierung** wandelt die in einer Hochsprache geschriebenen Programmzeilen in einen vom Prozessor lesbaren Maschinencode um, und zwar mit einer „Compiler“ genannten Software. [169], S. 146-148

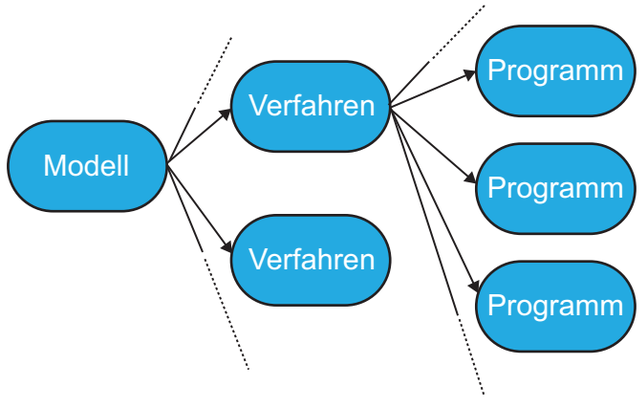


Entwicklungsschritte bei der Entstehung eines Simulationsprogramms [169], S. 146

Es ist zu beachten, dass je nach

- Diskretisierungsansatz (wie z.B. „finite Volumen“, „finite Differenzen“ oder „finite Elemente“),
- Lösungsalgorithmus für die Numerik oder
- Güte des Compilers

aus einem mathematisch-physikalischen Modell unterschiedliche Programmvarianten entstehen, die auch unterschiedliche Rechenergebnisse liefern.



Entwicklungsstufen eines Programms und Entstehung von Programmvarianten [169], S. 149

Während unter dem Begriff „Modell“ die abstrakte Abbildung der Realität mithilfe mathematischer Gleichungen verstanden wird, beschreibt das Verfahren die Konstruktionsvorschrift zur Abbildung des Modells auf einem Computer. Das Programm ist die mit einer Programmiersprache umgesetzte Konstruktionsvorschrift. Hierbei wird durch eingeführte Vereinfachungen, Näherungen sowie spezifische Anfangs- und Randbedingungen der Anwendungsbereich eines jeden Programms eingeschränkt. [124], S. 258-259

Das vorliegende Handbuch richtet sich vornehmlich an qualifizierte Fachleute von Ingenieur-, Planungs- und Beratungsunternehmen sowie von Behörden und Versicherungen. Es ist als Nachschlagewerk und Ratgeber konzipiert. Die folgenden Themen der leistungsorientierten Brandschutzplanung werden behandelt:

- Planungsprozess,
- Konkretisierung der von den schweizerischen Brandschutzvorschriften definierten Schutzziele mithilfe von funktionalen Schutzzielen und von Planungszielen,
- Bestimmung von Leistungskriterien,
- Entwicklung von Brand- und Evakuierungsszenarien,
- Festlegung der für die Dimensionierung massgebenden Szenarien,
- Typisierung und Auswahl von Modellen zur Bewertung von Brandschutzkonzepten,
- Durchführung von Qualitätssicherungsmassnahmen,
- Anfertigung von Dokumentationen,
- Anwendungsfelder für ingenieurwissenschaftliche Methoden nach dem Bauprodukterecht und nach den schweizerischen Brandschutzvorschriften,
- Planung, Bemessung und Realisierung von RWA.

Der Autor des Handbuches ist stellvertretender Leiter des Brandschutz-Inspektorats der Basellandschaftlichen Gebäudeversicherung und besitzt, als diplomierter Ingenieur der Maschinentechnik, langjährige Berufserfahrung auf den Gebieten der numerischen Simulationen und des vorbeugenden Brandschutzes.

Herausgeberin:

***B**asellandschaftliche **G**ebäude**V**ersicherung*

ISBN 978-3-906819-00-6