

VEREIN
DEUTSCHER
INGENIEURE

Ingenieurverfahren zur Bemessung der
Rauchableitung aus Gebäuden
Brandverläufe, Überprüfung der Wirksamkeit

Engineering methods for the dimensioning
of systems for the removal of smoke
from buildings

Fire curves, verification of effectiveness

VDI 6019

Blatt 1 / Part 1

Ausz. deutsch/englisch
Issue German/English

Die deutsche Version dieser Richtlinie ist verbindlich.

The German version of this guideline shall be taken as authoritative. No guarantee can be given with respect to the English translation.

Inhalt	Seite	Contents	Page
Vorbemerkung.	3	Preliminary note	3
1 Geltungsbereich und Zweck	3	1 Scope and objective	3
1.1 Schutzziele und Bewertung der Gefährdungspotenziale	4	1.1 Protection goals and hazard assessment	4
1.2 Konzepte zur Rauchableitung	5	1.2 Smoke control concepts	5
1.3 Grundlagen zur Bemessung	5	1.3 Fundamentals of dimensioning	5
2 Begriffe und Definitionen	7	2 Terms and definitions	7
3 Brandverlaufskurven	8	3 Fire curves	8
3.1 Beschreibung des Verfahrens	8	3.1 Description of the method	8
3.1.1 Allgemeines.	8	3.1.1 General	8
3.1.2 Anwendungsgrenzen	9	3.1.2 Application limits	9
3.2 Brandverläufe und Brandphasen	9	3.2 Fire development and fire stages.	9
3.2.1 Allgemeines.	9	3.2.1 General	9
3.2.2 Brandverläufe von niedrig- energetischen Bränden	10	3.2.2 Fire curves for low-energy fires	10
3.2.3 Brandverläufe von hoch- energetischen Bränden	11	3.2.3 Fire curves for high-energy fires	11
3.3 Berechnung der Wärmefreisetzungsrate und Brandfläche	11	3.3 Calculation of the heat release rate and the area on fire	11
3.4 Brandphasen.	13	3.4 Fire stages	13
3.4.1 Brandentstehungsphase (Phase 1)	13	3.4.1 Initial stage (stage 1)	13
3.4.2 Fortentwickelte Brandphase (Phase 2)	13	3.4.2 Developing fire (stage 2)	13
3.4.3 Konstante Brandphase (Phase 3)	14	3.4.3 Stage of continuous fire (stage 3)	14
3.4.4 Kontrollierte Brandphase (Phase 4)	14	3.4.4 Fire under control (stage 4)	14
3.4.5 Brandbekämpfung durch Feuerwehr (Phase 5).	15	3.4.5 Firefighting by the fire brigade (stage 5)	15

VDI-Gesellschaft Technische Gebäudeausrüstung

VDI-Handbuch Technische Gebäudeausrüstung, Band 2: Raumluftechnik

3.5	Bestimmung des Auslösezeitpunktes von selbsttätigen Wasserlöschanlagen.	15
3.5.1	Auslösezeitpunkt von Sprinkleranlagen	15
3.5.2	Bestimmung des Auslösezeitpunktes von Löschanlagen mit Wärmemaximalmeldern	25
3.5.3	Auslösezeitpunkt von sonstigen selbsttätigen Wasserlöschanlagen	27
3.6	Beschreibung der einzelnen Brandphasen	27
3.7	Bestimmung der konvektiven Wärmefreisetzungsrates	27
3.8	Brandverlaufskurven aus Brandversuchen und Brandsimulationsberechnungen	27
3.8.1	Wärmefreisetzungsrates aus Brandversuch – Sofa	28
3.8.2	Brandverlaufskurven aus CFD Brandsimulationsberechnungen – Sitzgruppe im freien Raum	29
3.8.3	Wärmefreisetzungsrates aus Brandversuch – Drucker	29
3.8.4	Wärmefreisetzungsrates aus Brandversuchen – Pkw-Brände	29
4	Überprüfung der Wirksamkeit von Gesamtsystemen zur Rauchableitung	32
4.1	Allgemeines	32
4.2	Verwendung von erwärmter Luft als Brandsimulationsquelle	34
4.2.1	Empfehlungen zur Wahl der Parameter für die Versuchsdurchführung, insbesondere zur Simulation der Brandentstehungsphase	35
4.2.2	Quantitative Überprüfungen	36
4.3	Verwendung von Brandwannen als Brandsimulationsquellen	41
4.3.1	Anwendungsbereich, Aufbau und Eigenschaften	41
4.3.2	Festlegung der Quellenanordnung	42
4.3.3	Sicherheitsvorkehrungen	42
5	Beispiele	43
5.1	Bestimmung der Brandverlaufskurven für ein gesprinklertes Ladenlokal	43
5.2	Quantitative Bewertung der Rauchgasausbreitung	46
	Schrifttum	49
	Anhang Umrechnungsgleichungen	50
A1	Gleichungen zur Bestimmung der Temperatur- und Geschwindigkeitsentwicklung unter der Decke	50
A2	Gleichung zur Bestimmung der Temperatur im Auslöseelement des Sprinklers	52

3.5	Determination of the activation time of automatic fire-extinguishing water systems	15
3.5.1	Activation time of sprinkler systems	15
3.5.2	Determination of the activation time of fire-extinguishing systems using maximum temperature detectors	25
3.5.3	Activation times of other automatic fire-extinguishing water systems	27
3.6	Characterisation of the individual fire stages	27
3.7	Determination of the convective heat release rate	27
3.8	Fire curves obtained from fire tests and fire simulation calculations	27
3.8.1	Heat release rate from fire test – Loveseat	28
3.8.2	Fire curves obtained from CFD calculations of fire simulations – Living-room suite in an infinite room	29
3.8.3	Heat release rate from fire test – Printer	29
3.8.4	Heat release rates from fire tests – Passenger cars	29
4	Verification of the effectiveness of entire systems for smoke control	32
4.1	General	32
4.2	Use of heated air as a fire simulation source	34
4.2.1	Recommendations concerning the choice of parameters for test performance, particularly for simulating the initial stage	35
4.2.2	Quantitative verification	36
4.3	Use of burning trays as fire simulation sources	41
4.3.1	Range of application, set-up and characteristics	41
4.3.2	Specification of source arrangement	42
4.3.3	Safety precautions	42
5	Examples	43
5.1	Determination of the fire curves for a sprinkler-equipped shop	43
5.2	Quantitative assessment of smoke-gas spread	46
	Bibliography	49
	Annex Conversion equations	51
A1	Equations for determining the developments of temperature and velocity below the ceiling	51
A2	Equation for determining the temperature in the responsive element of the sprinkler	52

Vorbemerkung

Bei der Erstellung brandschutztechnischer Nachweise für komplexe Bauvorhaben werden zunehmend die Möglichkeiten rechnerischer Ingenieurverfahren genutzt. Hierbei wird zur Bemessung u. a. auf Brandsverlaufskurven Bezug genommen. Die vorliegende Richtlinie beschreibt deren Systematik zur Modellierung und die Grundlagen der mathematischen Formulierungen. Die zeitliche Entwicklung der Wärmefreisetzungsrate eines Brandes kann damit ebenso beschrieben werden wie deren zugeordnete Rauchfreisetzungsrate. In Abhängigkeit von brandlastspezifischen Risiken können diese Werte mit und ohne Wirkung von geeigneten Wasserlöschanlagen quantifiziert werden. Die Ergebnisse verschiedener rechnerischer Ingenieurverfahren bei brandschutztechnischen Nachweisen werden damit untereinander vergleichbar.

Allen ehrenamtlichen Mitarbeitern an dieser Richtlinie sei auf diesem Wege gedankt.

Alle Rechte vorbehalten, auch das des Nachdrucks, der Wiedergabe (Fotokopie, Mikrokopie), der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, auszugsweise oder vollständig. Die Nutzung dieser VDI-Richtlinie als konkrete Arbeitsunterlage ist unter Wahrung des Urheberrechtes z. B. durch Kopieren auf speziellem Kopierpapier des VDI möglich. Auskünfte dazu, auch z. B. zur Nutzung im Wege der Datenverarbeitung, erteilt die Abteilung VDI-Richtlinien im VDI.

1 Geltungsbereich und Zweck

Diese Richtlinie gilt für besonders zu bemessende Anlagen zur Rauchableitung unter Berücksichtigung charakteristischer Brandverlaufskurven. Sie zeigt Anwendungsmöglichkeiten, Grenzen und Anforderungen an die Ingenieurmethoden zur Dimensionierung auf (VDI 6019 Blatt 2) und gibt Hinweise zur Überprüfung der Wirksamkeit.

Nicht behandelt sind Anlagen zur Sicherheitsdruckbelüftung und Spülung sowie ähnliche Systeme, die der Rauchfreihaltung von notwendigen Fluren und Treppenträumen dienen können.

Die Anwendung dieser Richtlinie ist nicht beschränkt auf Gebäude; sie ist u. a. auch anwendbar für unterirdische Verkehrsanlagen (z. B. Tunnel) und Fahrzeuge (z. B. Schiffe). Das in Abschnitt 3 aufgeführte Bemessungsverfahren zur Bestimmung von Brandverlaufskurven kann auch für andere brandschutztechnische Nachweise (z. B. thermische Analysen von Bauteilen) herangezogen werden.

Preliminary note

When verifying the compliance of complex building projects with fire-protection regulations, engineering-grade calculation methods are increasingly used. These methods use fire curves and other assumptions for dimensioning purposes. The present guideline describes the systematic approach underlying these curves as well as the fundamentals of their mathematical formulation. The mathematics used allow to describe the development over time of the heat released from a fire as well as the associated smoke release rate. Depending on the risks specific to the fire load, these values can be described quantitatively, taking into account or ignoring the effect of sprinkler activation. Engineering-grade calculation methods for the purpose of verifying compliance with fire-protection regulations thus become comparable.

We wish to take this opportunity to thank all the honorary contributors to this guideline.

All rights are reserved, including those relating to reproduction and onward transmission (Photo and micro copying), storage on data processing equipment and translation in part or in full. The use of this VDI guideline as a specific work document is permitted, provided that the conditions of the copyright are adhered to, e.g. copying on special VDI reprographic paper. Information on these aspects, including for example usage in data processing, is available from the VDI guidelines department of the VDI.

1 Scope and objective

This guideline applies to smoke control systems in buildings of special type and use (special-purpose buildings), taking into account characteristic fire curves. It points out the potential applications and limitations of, as well as requirements to be met by, engineering-grade calculation methods for dimensioning (VDI 6019 Part 2, to be published) and provides guidance in verifying effectiveness.

This guideline does not deal with safety pressurisation and flushing installations or similar systems which may also serve to secure escape routes (necessary corridors and staircases) against smoke.

In addition to buildings, this guideline can also be applied to, e.g., subterranean traffic systems (such as tunnels) and vehicles (such as vessels). The dimensioning method for the determination of fire curves, as given in Section 3, can also be used for other verifications of compliance with fire-protection regulations (e.g. for thermal analyses of building elements).

Werden u. a. von der DIN 18232 abweichende Brandverläufe betrachtet, liegen komplexe Gebäudegeometrien (z. B. mit in einen Atriumsbereich hineinragenden offenen Galeriebereichen) vor oder sind besondere Störgrößen zu berücksichtigen, sind zur Dimensionierung der Anlagen zur Rauchableitung die in VDI 6019 Blatt 2 aufgezeigten Ingenieurmethoden anzuwenden.

1.1 Schutzziele und Bewertung der Gefährdungspotenziale

Der Rauch- und Wärmeabzug in Gebäuden stellt einen wichtigen Bestandteil des Brandschutzes in Gebäuden besonderer Art oder Nutzung dar (Sonderbauten).

Einrichtungen zur Rauchableitung dienen dem Einhalten wesentlicher Schutzziele:

- Voraussetzungen schaffen, die eine Eigenrettung von Personen ermöglichen
- Unterstützung der Maßnahmen der Feuerwehr (u. a. Fremdrettung von Personen, Behinderung der Brandausbreitung, Brandbekämpfung)
- Schadensbegrenzung an Sachgütern, Einrichtungen und Gebäudeteilen.

Ergänzend zu diesen Schutzzielen dient der Rauch- und Wärmeabzug auch dem Schutz des Gebäudes und seiner Betriebssicherheit.

Die Bewertung der Brandgefahren und der Rauchausbreitung hängt entscheidend vom Brandverlauf ab. Daher sind zur Beurteilung im Wesentlichen die *Phase des Entstehungsbrandes*, die *Phase des fortentwickelten Brandes* und die daran anschließende *Brandphase* von großer Bedeutung.

In der Phase des Entstehungsbrandes besteht in der Regel nur eine geringe Beeinträchtigung des Tragverhaltens der Konstruktion; allerdings können hier bereits erhebliche Gefährdungen von Personen durch das Freisetzen von Rauchgasen auftreten. Dies insbesondere deshalb, weil Rauchgase durchaus erhebliche Anteile an toxischen Stoffen und Reizstoffen beinhalten und auch eine Einschränkung der Sichtweite hervorrufen können. Deshalb müssen bereits frühzeitig Maßnahmen zur Rauchableitung greifen.

Die Phase des Vollbrandes spielt zur Beurteilung der Rauchfreihaltung im brandbeaufschlagten Raum selbst in der Regel nur eine untergeordnetere Rolle.

Rettungswege einschließlich der zur Rettung und Brandbekämpfung benötigten Verkehrswege und -flächen im Gebäude müssen in einer definierten Höhe und Zeit raucharm bleiben, wobei dies als gegeben vorausgesetzt wird, wenn die raucharme Schicht über eine Dauer von mindestens 30 Minuten:

Where fire curves other than those given in DIN 18232 are considered, where the building geometry is complicated (including, e.g., open galleries protruding into an atrium), or where special interfering quantities have to be taken into consideration, the engineering methods given in VDI 6019 Part 2 shall be used for dimensioning smoke removal systems.

1.1 Protection goals and hazard assessment

The exhaust of smoke and heat is an important part of fire protection in buildings of special type and use (special-purpose buildings).

Smoke exhaust installation serve for complying with essential protection goals:

- Creating conditions which allow personal escape
- Supporting measures taken by the fire brigade (such as rescuing persons, impeding fire spread, firefighting)
- Limiting the damage to property, installations and parts of the building

In addition to these protection goals, the removal of smoke and heat also serves to protect the building and its operational reliability.

The assessment of fire hazards and of smoke spread decisively depends on the development of the fire. It is, therefore, mainly the stages of *initial fire*, *developing fire* and *fully developed fire* that are relevant to the assessment.

The initial stage will, as a rule, affect the load bearing performance of the construction to a minor degree only; however, considerable danger to persons may arise from smoke gases being released at this stage already. This is due in particular to the fact that smoke gases carry considerable contents of toxic substances and irritants and can, in addition, seriously impair view. Smoke exhaust measures must, therefore, come into effect at early stages.

As a rule, the stage of fully developed fire is of lesser importance for the assessment of the effectiveness of smoke exhaust from the room on fire.

Over a defined range of heights and time, escape routes including passages and areas required for rescuing and firefighting activities may only carry small amounts of smoke; this is assumed if, over a period of no less than 30 minutes, the smokeless layer

1. eine Mindesthöhe von 2,5 m hat ($h \geq 2,5$; gemessen ab oberster für den Personenaufenthalt zugänglicher Ebene),
2. eine mittlere Raumtemperatur (Lufttemperatur inklusive Strahlungseinfluss) in der raucharmen Schicht von $< 70^\circ\text{C}$ aufweist und
3. nur geringste und unbedenkliche Konzentrationen sichtbehindernder und toxischer Stoffe sowie Reizstoffe beinhaltet.

Anmerkung: Weitere Kriterien können darüber hinaus maßgebend sein. Siehe hierzu z.B. VDI 6019 Blatt 2.

1.2 Konzepte zur Rauchableitung

Ein Gesamtsystem zur Rauchableitung muss entsprechend der Zweckbestimmung und unter Wahrung der für das Objekt festgelegten Schutzziele folgende Aufgaben wahrnehmen:

- Frühzeitige Branddetektion und Aktivierung des Systems
- Abführung der Rauchgasströme
- Begrenzung der Rauchausbreitung (z.B. durch Rauchschürzen)
- Wirksamkeit unabhängig von äußeren Störgrößen (z.B. Wind) und inneren Störgrößen (z.B. Raumlufttechnische Anlagen)
- Weiterschaltung des Alarms (optional)

Zu unterscheiden ist zwischen Rauch- und Wärmeabzugsanlagen mit *natürlicher* (NRA) und/oder *maschineller* (MRA) Rauchableitung.

1.3 Grundlagen zur Bemessung

Bei einem Brand werden Wärme und Verbrennungsprodukte (Feststoffpartikel, flüssige und gasförmige Komponenten) freigesetzt (Quellterm). Im Flammenbereich wird Luft eingesaugt und durch Konvektion bewegt. Dies erzeugt eine nach oben gerichtete Thermikströmung, die im Raum einen Auftriebsstrahl bildet. Auf dem Strömungsweg nach oben vermindert sich die Strömungsgeschwindigkeit dadurch, dass Umgebungsluft aus dem Raum angesaugt und dem Auftriebsstrahl beigemischt wird. Damit vergrößert der Strahl mit wachsender Lauflänge seine Masse und sein Volumen. Basis hierfür ist der Impulsaustausch am Strahlrand. Dieses Gemisch aus Luft und Verbrennungsprodukten wird im Sinne dieser Richtlinie als *Rauchgas* bezeichnet.

Die aus dem unteren Raumbereich entnommene Verbrennungsluft und die auf dem Strömungsweg durch Induktion dem Auftriebsstrahl beigemischte Luft werden durch nachströmende Raumluft ersetzt. Dies hat zwangsläufig zur Folge, dass in geschlossenen Räumen ohne Rauchableitung Rückströmungen in den Aufenthaltsbereich stattfinden müssen. Gleiches

1. has a height of 2,5 m or more ($h \geq 2,5$; to be measured from the top level that can be accessed and occupied by persons),
2. remains at an average temperature (air-temperature included jet influence) in the smokeless layer of $< 70^\circ\text{C}$, and
3. minimal and carries harmless concentrations of view-impairing and toxic substances as well as irritants.

Note: Further criteria may be decisive in addition; see, for example, VDI 6019 Part 2.

1.2 Smoke control concepts

In accordance with the purpose, and ensuring the protection goals specified for the object in question, an entire system for smoke control shall fulfil the following tasks:

- Early fire detection and activation of the system
- Control of smoke-gas flows
- Confining of smoke spread (using, e.g., smoke curtains)
- Functioning irrespective of external interfering quantities (such as wind) and internal interfering quantities (such as ventilating and air-conditioning systems)
- Relaying of the alarm (optional)

A distinction is to be made between smoke and heat exhaust systems with *natural* and/or *powered (mechanical)* exhaust of smoke.

1.3 Fundamentals of dimensioning

A fire causes the release (source term) of heat and combustion products (solid particles, liquid and gaseous components). The flame region draws in air which is moved by convection. This results in a thermal upward jet in the room. On its way up, the jet dissipates its flow energy by taking in ambient air from the room, which is blended into the thermal jet. As a matter of consequence, the mass and volume of the jet increase with increasing distance travelled. This effect is driven by the exchange of momentum in the boundary region of the jet. The resulting mixture of air and combustion products will be called *smoke gas* for the purposes of this guideline.

The combustion air removed from the lower regions of the room and the air blended, by induction, into the thermal jet on its way up are replaced by air flowing into the room. It is a necessary consequence of this fact that a backflow into occupied areas must ensue in closed rooms without smoke exhaust. The same holds true for rooms from which smoke is exhausted but

gilt für Räume, die zwar eine Rauchableitung aber keine Nachströmöffnungen haben. Der zeitliche Ablauf der Rückströmung ist im Wesentlichen abhängig von den geometrischen Randbedingungen und der Wärmefreisetzungsrate.

Um die Rauchfreihaltung der Rettungswege durch die Aufrechterhaltung einer raucharmen Schicht zu erzielen, muss das Rückströmen von Rauchgasen aus dem Deckenbereich verhindert werden. Dies ist im Wesentlichen dadurch zu erreichen, dass Rauchgas im Deckenbereich des Raumes ab- und nicht kontaminierte Luft bodennah zugeführt wird.

Die Dimensionierung der erforderlichen Luftströme zum Erreichen des definierten Schutzzieles muss dabei entsprechend der Massenbilanz erfolgen; die abgeführten Rauchgasmassen müssen durch nicht kontaminierte Luftmassen (Zuluft) ersetzt werden.

Die Anordnung, Größe und Lage von Nachströmöffnungen im Raum bestimmen maßgeblich die Qualität der Rauchfreihaltung. So entstehen z.B. Probleme bei der Anordnung der Nachströmöffnungen in größerer Höhe über dem Fußboden. Liegt die Nachströmöffnung im Bereich der Rauchgasschicht, wird durch diese Zuluft ein Teil des Rauchgases in den bodennahen Bereich zurückgeführt. Zu hohe Nachströmgeschwindigkeiten, z.B. verursacht durch zu kleine Nachströmflächen, können zu Störungen des Plumes und zu Rauchgasausspülungen in den Aufenthaltsbereich führen. Diese Gefahr besteht insbesondere in der Brandentstehungsphase, wenn die Rauchgastemperaturen nur wenig über der Raumlufttemperatur liegen. Nachströmöffnungen, die z.B. sowohl auf der Luv- als auch auf der Leeseite eines vom Wind angeströmten Gebäudes liegen, können störende Querströmungen im Raum hervorrufen.

where no openings exist for air inlet. The development over time of the backflow essentially depends on the geometrical boundary conditions and the heat release rate.

Smoke control of escape routes by means of maintaining a smokeless layer is only possible if the flow of smoke gases back down from the ceiling is prevented. In essence, this can be achieved by extracting smoke gas near the ceiling of the room while supplying non-contaminated air close to the floor.

The air volume flows required in order to achieve the specified protection goal must be dimensioned on the basis of the mass balance; the masses of smoke gas removed must be replaced by masses of non-contaminated air (supply air).

The positioning, size and installation place of openings for air inlet in the room exert a substantial influence on the quality of smoke control. Problems will arise if, e.g., openings for air inlet are arranged at too great a height above the floor. If openings for air inlet lie at the same height as the smoke-gas layer, the supply air will push some of the smoke gas back down into the region near the floor. Excessive air inlet velocities caused by, e.g. insufficient surface areas of the openings for air inlet, may disturb the plume and flush out smoke gas into the occupied area. This risk exists in particular during the initial stage of a fire when smoke-gas temperatures are only slightly higher than the air temperature in the room. Openings for air inlet lying, e.g., on the sides of a building facing, and away from, the wind may cause interfering transverse flows in the room.

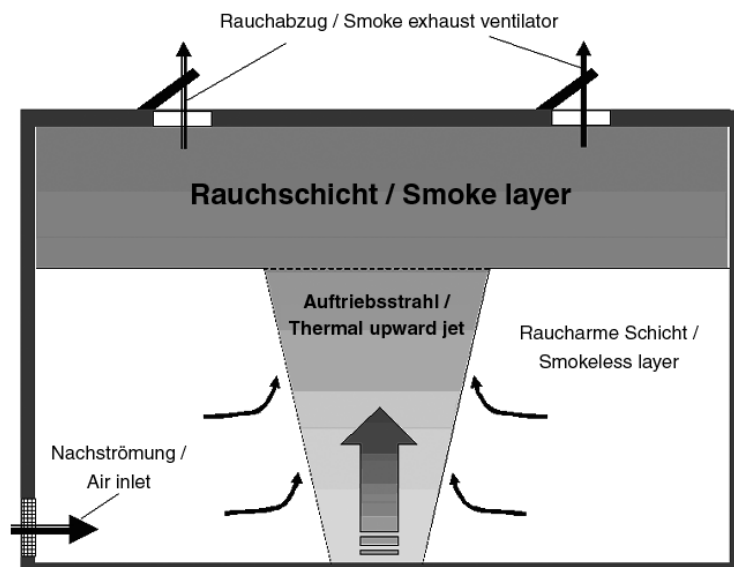


Bild 1. Schematische Darstellung der Rauchabzugsanlage

Figure 1. Schematic of smoke-control system

2 Begriffe und Definitionen

Aerodynamisch wirksame Rauchabzugsfläche (A_W)

Die aerodynamisch wirksame Rauchabzugsfläche A_W ist das mathematische Produkt aus geometrischer Öffnungsfläche A_g des →NRA und dem →Durchflussbeiwert c_{vw} mit oder c_{v0} ohne Berücksichtigung des Seitenwindeinflusses.

Durchflussbeiwert (c_v)

Der Durchflussbeiwert c_{v0} (ohne Seitenwindeinfluss) bzw. c_{vw} (mit Seitenwindeinfluss) ist ein z.B. nach EN 12101-2 Anhang B im Windkanal bestimmter Faktor, mit dem bei →NRA aus der geometrischen Eintrittsfläche die →aerodynamisch wirksame Rauchabzugsfläche bestimmt wird.

Geometrische Öffnungsfläche (A_g)

Anströmfläche in der Ebene der Wand- bzw. Deckenöffnung.

Maschinelle Rauchabzüge (MRA)

Maschinelle Rauchabzüge bewirken die Rauchableitung mit Hilfe von Ventilatoren mit annähernd konstantem Volumenstrom. Ihre Wirkweise ist u.a. abhängig von der Leistungsfähigkeit der Ventilatoren, dem Kanalsystem, der Lage und Anzahl der Zuluft- und Absaugöffnungen, der Gebäudegeometrie, der Art der Auslösung und Größe des →Rauchabschnitts.

Natürliche Rauchabzüge (NRA)

Natürliche Rauchabzüge wirken über den thermischen Auftrieb der Rauchgase. Ihre Wirkweise ist u.a. abhängig von der →aerodynamisch wirksamen Rauchabzugsfläche, der Zuführung von Zuluft, der Anordnung der Öffnungen, der Gebäudegeometrie, dem Zeitpunkt und der Art der Auslösung und der Größe des →Rauchabschnitts.

Plume

Plume (engl.) bezeichnet den Auftriebsstrahl über der Brandfläche.

Rauchabschnitt (A_R)

Bereich in einem Raum, begrenzt durch →Rauchschürzen oder Bauteile unterhalb der Decke, die im Brandfall die horizontale Ausbreitung der Rauchgase begrenzen.

2 Terms and definitions

Aerodynamic free area, A_W

The aerodynamic free area for smoke exhaust, A_W , is the numerical product of the geometrical surface area of the opening, A_g , of the →natural smoke exhaust unit and the →flow coefficient, taking into account (c_{vw}) or ignoring (c_{v0}) the effect of outside-wind.

Coefficient of discharge, c_v

The flow coefficient, c_{v0} (ignoring the effect of crosswind), or c_{vw} (taking into account the effect of crosswind), is a factor determined, e.g. according to EN 12101-2, Annex B, in a wind tunnel, which allows to determine the →effective aerodynamical cross section for smoke removal for →natural-draught smoke removal units from the →geometrical surface area of the opening.

Geometrical area, A_g

Free cross section in the plane of the wall or ceiling.

Mechanical smoke exhaust ventilator

Mechanical smoke exhaust ventilator exhaust smoke by means of fans with an approximately constant volume flow. Their functioning depends, among other things, on the performance of the fans, the ducting, the positions and numbers of air inlet and exhaust openings, the geometry of the building, the type of activation and the size of the →smoke reservoir.

Natural smoke exhaust ventilator

Natural smoke exhaust ventilator rely on thermal buoyancy of the smoke gases. Their functioning depends, among other things, on the →effective aerodynamical cross section for smoke exhaust, the supply of air inlet, the positioning of the openings, the geometry of the building, the time and type of activation and the size of the →smoke reservoir.

Plume

Denotes the thermal upward jet above the area on fire.

Smoke zone, A_R

The smoke zone is that zone in a room – delimited by →smoke curtains or building elements below the ceiling – which is confining the horizontal spread of smoke gases in the event of a fire.

Rauchschrürze

Flexible (z.B. gespanntes Glasfasergewebe), bewegliche (z.B. abrollbare Systeme) oder fest eingebaute (z.B. rauchdicht geschlossene Binder) von der Decke mindestens in Dicke der bemessenen Rauchschrürze in den Raum geführte Konstruktionen.

Sie sollen die horizontale Ausbreitung des Rauches begrenzen (technische Anforderungen sind z.B. der EN 12101-1 zu entnehmen).

Rauch- und Wärmeabzugsanlage (RWA)

Rauch- und Wärmeabzugsanlagen fassen Komponenten (z.B. →MRA, →NRA, Zuluftöffnungen, →Rauchschrürzen, deren Energie- und Steuerungssysteme und Energieversorgung) zusammen, die gemeinsam zur Rauchableitung benötigt werden.

3 Brandverlaufskurven

3.1 Beschreibung des Verfahrens

3.1.1 Allgemeines

Die Bemessung von Anlagen zur Rauchableitung erfolgt nach dieser Richtlinie auf der Basis von Brand-szenarien. Dabei werden zeitabhängige Brandverlaufskurven ermittelt, deren Festlegung grundsätzlich nach unterschiedlichen Verfahren erfolgen kann. In dieser Richtlinie wird eine Methode zur Festlegung dieser Brandverlaufskurven beschrieben. Auf dieser Grundlage werden u.a. die freigesetzten Rauchgas-massenströme bestimmt. Darauf aufbauend erfolgt die Bemessung des Entrauchungssystems mit der gewählten Ingenieurmethode (VDI 6019 Blatt 2) unter Berücksichtigung der jeweiligen Anwendungsgrenzen.

Einen wesentlichen Bestandteil von Brandszenarien stellen die Brandverlaufskurven dar. Neben der qualitativen Beschreibung von unterschiedlichen Brandphasen ist die quantitative Vorgabe der maßgebenden brandtechnologischen Kenngrößen in Bezug auf die zeitliche Entwicklung der Wärmefreisetzungsrate und der Brandfläche erforderlich. Die Festlegung dieser Kennlinien kann nach Angaben aus dieser Richtlinie erfolgen; es besteht jedoch auch die Möglichkeit, andere Brandverlaufskurven heranzuziehen z.B. auf der Basis von:

- repräsentativen Brandversuchen (siehe auch Abschnitt 5)
- Verbrennungsmodellen (z.B. CFD-Module)
- Brandausbreitungsmodellen von Zonenmodellen
- anderen Regelwerken
- konkreten, z.B. bauaufsichtlichen Vorgaben

Smoke curtain

Flexible (e.g. stretched glass fibre), movable (e.g. unrolling systems) or fixed (e.g. smoke-tight binders) structures extending from the ceiling into the room at least to the lower confine of the dimensioned smoke layer.

They are intended to confine the horizontal spread of smoke (technical requirements can be found in, e.g., EN 12101-1).

Smoke and heat control system

Smoke and heat control systems subsume components (such as →mechanical smoke exhaust ventilator, →natural smoke exhaust ventilator, openings for air inlet, →smoke curtains, including their energy and control systems) which are together needed for smoke exhaust.

3 Fire curves

3.1 Description of the method

3.1.1 General

For the purposes of this guideline, smoke control systems are dimensioned on the basis of fire scenarios. These are based on fire curves over time which may basically be specified using various methods. This guideline presents one method for specifying these fire curves. This is the basis for the determination of, e.g., the smoke-gas mass flows released. The dimensioning of the smoke control system, using the selected engineering method (see VDI 6019 Part 2) and taking into consideration the respective application limits, is based on this procedure.

Fire curves are an essential component of fire scenarios. In addition to a qualitative description of the distinct fire stages, quantitative specifications of the relevant fire-technical characteristics with respect to the developments over time of the heat release rate and the area on fire are required. The specification of these characteristic curves can rely on information given in this guideline; it is, however, also possible to use other fire curves based on, e.g.,

- representative fire tests (see also Section 5)
- combustion models (e.g. CFD modules)
- fire spread models as part of zone models
- other rules
- specific stipulations set up, e.g. by the building inspection

3.1.2 Anwendungsgrenzen

Betrachtet werden horizontale Brandflächen von Feststoffbränden, wobei für den Bemessungsfall die Brandfläche kleiner als die Brandraumfläche sein muss. Darüber hinaus sind Rechenansätze implementiert, mit denen der Einfluss von selbsttätigen Löschanlagen auf den Brandverlauf berechnet werden kann.

Dieses Verfahren ist nicht dazu geeignet, Flüssigkeitsbrände und Brände, bei denen die vertikale Brandausbreitung das Brandgeschehen maßgeblich bestimmt (z.B. Regalbrände), rechnerisch zu ermitteln. Es gilt weiterhin zu berücksichtigen, dass mit dem hier beschriebenen Verfahren weder eine Flashover-Situation noch ein unterventilierter Brand in einer sauerstoffreduzierten Umgebung abgeschätzt werden kann. Für diese Fälle sind zur weiteren Festlegung der Brandverlaufskurven andere Nachweisverfahren heranzuziehen, z.B. Brandsimulationsrechnungen auf der Basis von geeigneten Zonenmodellen oder CFD-basierten Brandsimulationsmodellen.

3.2 Brandverläufe und Brandphasen

3.2.1 Allgemeines

Der zeitliche Ablauf eines natürlichen Brandes ist gekennzeichnet durch verschiedene Entwicklungsstufen. Das Brandgeschehen kann die einzelnen Stufen Schwelbrand, Brandentstehungsphase, fortentwickelter Brand, Vollbrand und abklingender Brand durchlaufen. Der Brandverlauf wird im Rahmen der ingenieurtechnischen Bemessung approximiert und vereinfachend durch einzelne Brandphasen dargestellt.

Die zeitliche Entwicklung der Wärmefreisetzungsrate und der Brandfläche ist abhängig von der Brandlastbelegung, der horizontalen mittleren Brandausbreitungsgeschwindigkeit, den Ventilationsbedingungen, dem Auslösezeitpunkt einer gegebenenfalls vorhandenen selbsttätigen Löschanlage und dem Einleiten von Brandbekämpfungsmaßnahmen durch die Feuerwehr. Zur weiteren Beurteilung werden folgende Brandphasen herangezogen:

- **Phase 1:** Brandentstehung mit niedriger Wärmefreisetzungsrate
- **Phase 2:** Fortentwickelter Brand mit quadratischer Zunahme der Wärmefreisetzungsrate und Brandfläche
- **Phase 3:** Stetiger Brand mit konstanter Wärmefreisetzungsrate und Brandfläche
- **Phase 4:** Kontrollierter Brand bei aktivierter selbsttätiger Löschanlage
- **Phase 5:** Brandbekämpfung durch die Feuerwehr

3.1.2 Application limits

This guideline considers horizontal areas on fire where solids are burning; for the purpose of dimensioning, the area on fire must be less than the area of the room on fire. Also, mathematical approaches have been implemented, which allow to calculate the effect of automatic fire-extinguishing systems on the development of the fire.

This method is not suitable for calculating fires sustained by burning liquids and fires which are decisively influenced by vertical spreading of the fire (such as burning shelves). Furthermore, it must be noted that the method described in this guideline does not allow estimates for flashover situations or under-ventilated fires in oxygen-reduced environments. Other methods for the verification of compliance, such as fire simulation calculations based on appropriate zone models or CFD-based fire simulation models, must be applied in such cases for specifying the respective fire curves.

3.2 Fire development and fire stages

3.2.1 General

The development over time of a natural fire is characterised by several stages. A fire can go through the distinct stages of smouldering fire, initial fire, developing fire, fully developed fire and dying fire. The development of the fire is approximated in the context of the engineering methods for dimensioning and is represented in terms of distinct fire stages for the sake of simplification.

The development over time of the heat release rate and the area on fire depends on the distribution of fire load, the mean horizontal fire propagation speed, the ventilating conditions, the time at which any existing automatic fire-extinguishing system is activated and the time at which the fire brigade starts fighting the fire. The following fire stages are used for evaluation below:

- **Stage 1:** Initial fire at low heat release rate
- **Stage 2:** Developing fire, with heat release rate and area on fire increasing as time squared
- **Stage 3:** Continuous fire, at constant heat release rate and area on fire
- **Stage 4:** Fire under control, automatic fire-extinguishing system activated
- **Stage 5:** Firefighting by fire brigade

Um die räumliche Verteilung der Rauchgasmassenströme bei unterschiedlichen Randbedingungen näher bestimmen zu können, sind die beiden folgenden Brandverläufe zu untersuchen.

- *Niedrigenergetische Brände*: Brandverläufe mit geringer Wärmefreisetzungsrate
- *Hochenergetische Brände*: Brandverläufe mit hoher Wärmefreisetzungsrate

Niedrigenergetischen und *hochenergetischen* Bränden werden unterschiedliche Brandphasen zugeordnet.

3.2.2 Brandverläufe von niedrigenergetischen Bränden

Niedrigenergetische Brände sind gekennzeichnet durch Brandverläufe mit geringer Wärmefreisetzungsrate (30 kW bis 300 kW) und kleiner Brandfläche. Solche Bemessungsbrände werden u.a. angesetzt, um den Einfluss spezieller raumklimatischer Verhältnisse im brandbeaufschlagten Raum bewerten zu können. Für diesen Fall ist die Wirksamkeit des geplanten Entrauchungssystems einschließlich der automatischen Brandmeldeeinrichtungen zu untersuchen.

Der Brandverlauf eines niedrigenergetischen Brandes bleibt beschränkt auf die Brandentstehungsphase (Phase 1), wird gegebenenfalls gedämpft durch eine selbsttätige Löschanlage (z.B. Sprühwasser-Löschanlagen mit Rauchauslösung, keine Auslösung der Sprinkleranlage) und endet zum Zeitpunkt der Einleitung löschwirksamer Maßnahmen durch die Feuerwehr. Bei dieser Bemessung sind somit die Phase 1, Phase 4 und Phase 5 nach Abschnitt 3.4 zu berücksichtigen. Die beiden möglichen qualitativen Brandverläufe sind in Bild 2 dargestellt.

The following types of fire development must be examined in order to allow a more detailed determination of the spatial distribution of the smoke-gas mass flows under different boundary conditions:

- *Low-energy fires*: fires that develop at a low heat release rate
- *High-energy fires*: fires that develop at a high heat release rate

Different fire stages are allocated to *low-energy* and *high-energy* fires.

3.2.2 Fire curves for low-energy fires

Low-energy fires are characterised by fire development at a low heat release rate (30 kW to 300 kW) and a small area on fire. For dimensioning purposes, such types of fires are assumed, among other things, in order to allow assessing the influence of particular room-climatic conditions in the room on fire. In such cases, the effectiveness of the planned smoke removal system including the automatic fire detection and alarm systems must be investigated.

The development of a low-energy fire remains limited to the initial stage (stage 1), may be attenuated by an automatic fire-extinguishing system (such as a water spray system activated by smoke detectors, no activation of the sprinkler system) and ends as the fire brigade takes up its efficient firefighting activities. This means that dimensioning for this type of fire needs to take into consideration stage 1, stage 4 and stage 5 as per Section 3.4. The two possible qualitative fire curves are shown in Figure 2.

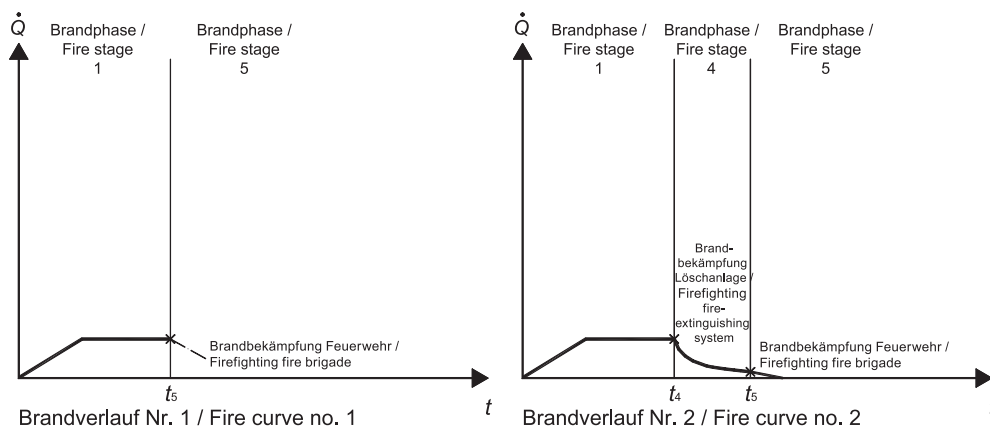


Bild 2: Darstellung der verschiedenen Brandverläufe ($\dot{Q}(t)$) und Brandphasen für niedrigenergetische Brände

Figure 2. Illustration of the different fire curves ($\dot{Q}(t)$) and fire stages for low-energy fires

3.2.3 Brandverläufe von hochenergetischen Bränden

Die maximale erforderliche Leistung von Entrauchungsanlagen wird in der Regel auf der Basis hochenergetischer Brände bestimmt.

Die Betrachtung der Brandverläufe von hochenergetischen Bränden beginnt generell mit der fortentwickelten Brandphase (Phase 2). Abhängig von den jeweiligen Randbedingungen können bis zur Brandbekämpfung durch die Feuerwehr zwischenzeitlich die stetige Brandphase (Phase 3) und die kontrollierte Brandphase (Phase 4) durchlaufen werden. In die Bemessung gehen dementsprechend die Phase 2 bis Phase 5 nach Abschnitt 3.4 ein. Die möglichen qualitativen Brandverläufe sind in Bild 3 dargestellt.

3.3 Berechnung der Wärmefreisetzungsrate und Brandfläche

In Abhängigkeit vom zu bewertenden Brandrisiko ist mit tabellierten Kenngrößen (siehe Tabelle 1 und Tabelle 2) die zeitliche Entwicklung der Wärme-

3.2.3 Fire curves for high-energy fires

As a rule, the maximum necessary performance of smoke removal systems is determined on the basis of high-energy fires.

The investigation of the fire curves of high-energy fires generally starts at the stage of developing fire (stage 2). Depending on the boundary conditions in question, intermediate stages until the onset of fire-fighting by the fire brigade may be the stages of continuous fire (stage 3) and of fire under control (stage 4). Accordingly, dimensioning has to take into account stage 2 through stage 5 as per Section 3.4. The possible qualitative fire curves are shown in Figure 3.

3.3 Calculation of the heat release rate and the area on fire

Depending on the fire risk to be assessed, the development over time of the heat release rate and the area on fire shall be determined separately for each possi-

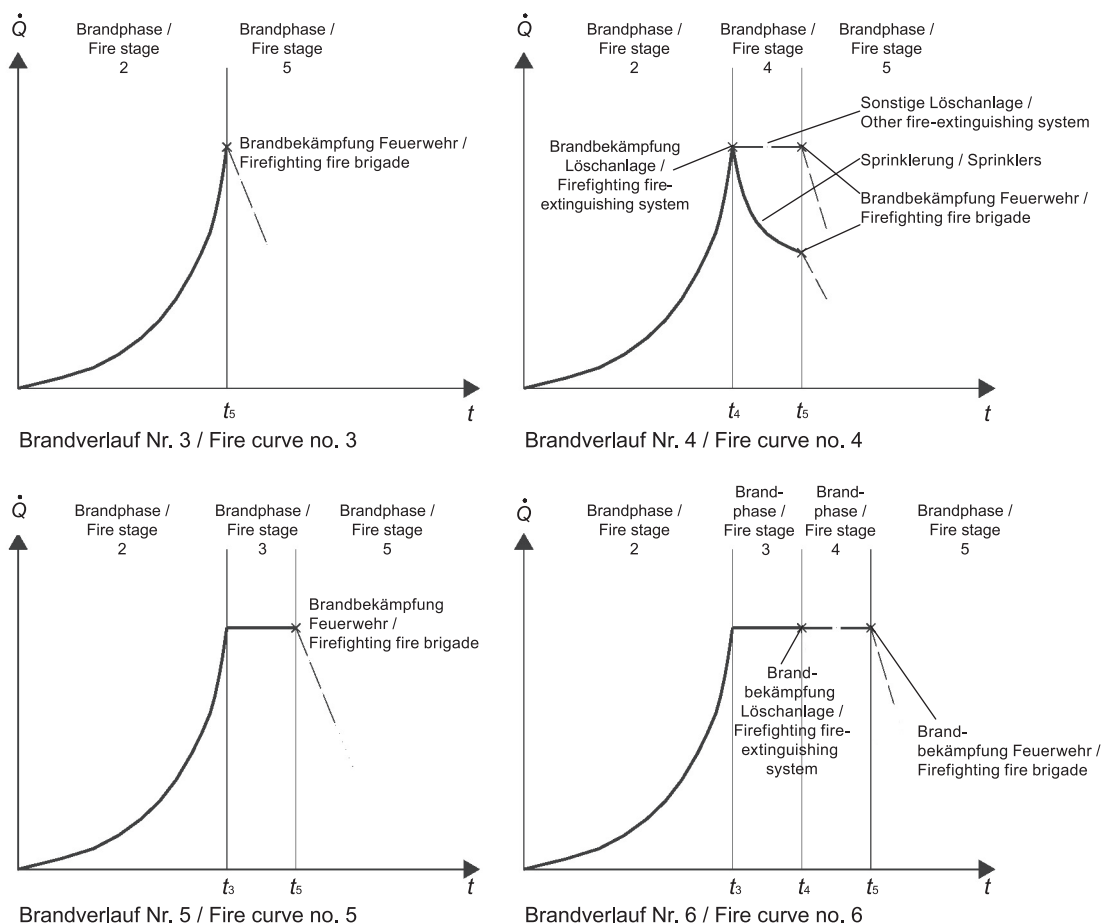


Bild 3. Darstellung der verschiedenen Brandverläufe ($\dot{Q}(t)$) und Brandphasen für hochenergetische Brände

Figure 3. Illustration of the different fire curves ($\dot{Q}(t)$) and fire stages for high-energy fires

freisetzungsrates und der Brandfläche für jede mögliche Brandphase einzeln zu ermitteln. Die Variation der einzelnen Brandphasen erlaubt es, in Abhängigkeit von den jeweiligen Eckwerten, unterschiedliche Teilbrandverläufe vorzugeben, die dann im Rahmen der weiteren Bemessung zu untersuchen sind.

Tabelle 1. Brandintensitätskoeffizient
(Parameter α nach VdS 2827)

Geschwindigkeit der Brandentwicklung	Brandintensitätskoeffizient α in kW/s ²
Langsam	0,0029
Mittel	0,012
Schnell	0,047
Sehr schnell	0,188

ble fire stage, using tabulated characteristics (see Table 1 and Table 2). Varying the individual fire stages allows to specify different partial fire curves, depending on the relevant basic values, which must then be investigated in the course of further dimensioning.

Table 1. Fire intensity coefficient
(parameter α in accordance with VdS 2827)

Rate of fire development	Fire intensity coefficient α in kW/s ²
Slow	0,0029
Medium	0,012
Fast	0,047
Very fast	0,188

Tabelle 2. Beispiele maximaler spezifischer Wärmefreisetzungsraten und Geschwindigkeiten der Brandentwicklung

Brandlast/Nutzung	Maximale spezifische Wärmefreisetzungsrate in kW/m ²	Geschwindigkeit der Brandentwicklung
Büros	300 ^{*)}	mittel ^{*)}
Hotelzimmer	250 ^{*)}	mittel ^{*)}
Verkaufsfläche	500 ^{*)}	schnell ^{*)}
Ausstellung, Theater, Kinosaal, Bühne	500	schnell
Wohnung	500 ^{*)}	mittel ^{*)}
Museum	300	langsam
Brennender Sattelschlepper	400 ^{**)}	schnell
Holzpaletten (1,2 m × 1,2 m × 0,14 m); Feuchte: 6 % bis 12 %, gestapelt/Blocklagerung, Höhe: 0,5 m	1250 ^{*)}	mittel bis schnell
Gefüllte Postsäcke, Lagerhöhe: 1,5 m	400 ^{*)}	schnell

^{*)} Quelle: VdS 2827

^{**)} Quelle: abgeleitet aus VdS 2827

Table 2. Examples of maximum heat release rates per unit area and rates of fire development

Fire load/use	Maximum heat release rate per unit area in kW/m ²	Rate of fire development
Offices	300 ^{*)}	medium ^{*)}
Hotel rooms	250 ^{*)}	medium ^{*)}
Sales areas	500 ^{*)}	fast ^{*)}
Exhibitions, theatres, cinemas, stages	500	fast
Residence	500 ^{*)}	medium ^{*)}
Museum	300	slow
Burning semi-trailer	400 ^{**)}	fast
Wooden pallets (1,2 m × 1,2 m × 0,14 m); humidity: 6 % to 12 %, stacked/block storage, height: 0,5 m	1250 ^{*)}	medium up to fast
Postbags, storage height 1,5 m	400 ^{*)}	fast

^{*)} Source: VdS 2827

^{**)} Source: derived from VdS 2827

Folgende Brandparameter gehen in die Bemessung ein:

- maximale spezifische Wärmefreisetzungsrate $\dot{q}_f$ (in kW/m²)
- horizontale mittlere Brandausbreitungsgeschwindigkeit v (in m/s)
- Brandintensitätskoeffizient α (in kW/s²)

3.4 Brandphasen

In dieser Richtlinie werden die in den folgenden Abschnitten aufgeführten Parameter zur Quantifizierung einzelner Brandphasen zu Grunde gelegt.

3.4.1 Brandentstehungsphase (Phase 1)

Sowohl für natürliche als auch mechanische Rauch- und Wärmeabzugsanlagen wird eine Wärmefreisetzungsrate angesetzt, die innerhalb der ersten 300 s auf einen Wert von ca. 100 kW linear ansteigt und im weiteren Verlauf konstant bleibt. Sie endet zum Zeitpunkt t_4 gemäß Abschnitt 3.5 bzw. t_5 nach Abschnitt 3.4.5. Die Brandfläche beträgt zu Beginn $A = 0,40 \text{ m}^2$. Sie wird vereinfachend als konstant innerhalb der Brandentstehungsphase festgelegt.

3.4.2 Fortentwickelte Brandphase (Phase 2)

Die fortentwickelte Brandphase ist gekennzeichnet durch die quadratische Zunahme von Wärmefreisetzungsrate und Brandfläche. Sie wird wie folgt berechnet:

$$\dot{Q}(\tau_2) = \dot{q}_f \cdot A(\tau_2) \quad (1)$$

$$A(\tau_2) = (v \cdot \tau_2)^2 \quad (2)$$

$$v = \sqrt{\frac{\alpha}{\dot{q}_f}} \quad (3)$$

Dabei ist

- $\dot{Q}$ Gesamt-Wärmefreisetzungsrate in kW
- $\dot{q}_f$ maximale spezifische Wärmefreisetzungsrate in kW/m²
- A Brandfläche in m²
- v horizontale mittlere Brandausbreitungsgeschwindigkeit in m/s
- α Brandintensitätskoeffizient in kW/s²
- τ_2 Zeitvariable (in s) in der Brandphase 2:
 $\tau_2 = t$ und $0 \leq t_i$ mit $i = 3, 4, 5$ und t als globale Zeitvariable

Die einzelnen brandtechnologischen Parameter können Tabelle 1 und Tabelle 2 entnommen werden; sie gelten für brandlastgesteuerte Verbrennung mit ausreichender Luftzufuhr.

The following fire parameters influence the dimensioning:

- maximum heat release rate per unit area, $\dot{q}_f$ (in kW/m²)
- mean horizontal fire propagation speed, v (in m/s)
- fire intensity coefficient, α (in kW/s²)

3.4 Fire stages

For the purposes of this guideline, the parameters listed in subsequent sections are used for a quantitative description of distinct fire stages.

3.4.1 Initial stage (stage 1)

A heat release rate rising linearly over the first 300 s to remain constant at a value of such as 100 kW is assumed for natural as well as powered smoke and heat control systems. It ends at the time t_4 as per Section 3.5, or at t_5 as per Section 3.4.5. The area on fire is at start $A = 0,40 \text{ m}^2$. For the sake of simplification, it is specified to be constant during the initial stage.

3.4.2 Developing fire (stage 2)

The developing fire is characterised by the heat release rate and the area on fire increasing as the square of time. It is calculated as follows:

$$\dot{Q}(\tau_2) = \dot{q}_f \cdot A(\tau_2) \quad (1)$$

$$A(\tau_2) = (v \cdot \tau_2)^2 \quad (2)$$

$$v = \sqrt{\frac{\alpha}{\dot{q}_f}} \quad (3)$$

where

- $\dot{Q}$ total heat release rate, in kW
- $\dot{q}_f$ maximum heat release rate per unit area, in kW/m²
- A area on fire, in m²
- v mean horizontal fire propagation speed, in m/s
- α fire intensity coefficient, in kW/s²
- τ_2 variable of time, in s, during stage 2:
 $\tau_2 = t$ and $0 \leq t_i$ where $i = 3, 4, 5$, and t being the global variable of time

The individual fire-technical parameters can be obtained from Table 1 and Table 2; these values apply to combustion controlled by the fire load, with air being available in sufficient supply.

Sofern andere objektspezifische Werte vorliegen, können diese optional herangezogen werden.

Where other, object-specific values are available, these may be used as optionally.

3.4.3 Konstante Brandphase (Phase 3)

Wenn die gesamte Fläche eines lokal begrenzten Brandes am Brandgeschehen beteiligt ist (z.B. Palette mit ausreichendem Seitenabstand zu anderen Brandlasten), tritt die konstante Brandphase (Phase 3) ein. Wärmefreisetzungsrate und Brandfläche bleiben dabei konstant auf dem Endwert der vorherigen Phase 2:

$$\dot{Q}(\tau_3) = \dot{Q}(t_3) = \text{const.} \quad (4)$$

$$A(\tau_3) = A(t_3) = \text{const.} \quad (5)$$

Dabei ist

t_3 Zeitpunkt vor Beginn der Phase 3 in s

τ_3 Zeitvariable (in s) in der Brandphase 3:

$\tau_3 = t - t_3$ und $t_3 < \tau_3 \leq t_i$ mit $i = 4, 5$ und t als globale Zeitvariable

3.4.3 Stage of continuous fire (stage 3)

As soon as the entire area of a locally confined fire is involved in the fire (as is the case, e.g., in a pallet whose sides are at sufficient distance to other fire loads), the stage of continuous fire (stage 3) begins. The heat release rate and the area on fire remain constant, having the values they had when the previous stage (stage 2) ended:

$$\dot{Q}(\tau_3) = \dot{Q}(t_3) = \text{const.} \quad (4)$$

$$A(\tau_3) = A(t_3) = \text{const.} \quad (5)$$

where

t_3 time before the onset of stage 3, in s

τ_3 time variable, in s, during stage 3:

$\tau_3 = t - t_3$ and $t_3 < \tau_3 \leq t_i$ where $i = 4, 5$, and t being the global variable of time

3.4.4 Kontrollierte Brandphase (Phase 4)

Wird eine selbsttätige Wasserlöschanlage aktiviert, so kann deren branddämpfende Wirkung den weiteren Verlauf der Wärmefreisetzungsrate beeinflussen. Nach der Auslösung von Sprinkleranlagen kann von einer Abminderung der Wärmefreisetzungsrate ausgegangen werden, sofern nicht Abschattungseffekte eine Branddämpfung durch die Sprinklerung verhindern. Falls keine umfassenden Untersuchungen bezüglich des Löschverhaltens von anderen selbsttätigen Wasserlöschanlagen (z.B. Sprühwasser-Löschanlagen) bekannt sind, wird die Wärmefreisetzungsrate und die Brandfläche ab dem Auslösezeitpunkt als konstant angesehen.

Wärmefreisetzungsrate und Brandfläche werden wie folgt rechnerisch bestimmt:

Sprinkleranlage

$$\dot{Q}(\tau_4) = \dot{Q}(t_4) \cdot e^{-0,0023 \cdot \tau_4} \quad (6)$$

$$A(\tau_4) = A(t_4) = \text{const.} \quad (7)$$

Sonstige selbsttätige Wasserlöschanlage

$$\dot{Q}(\tau_4) = \dot{Q}(t_4) = \text{const.} \quad (8)$$

$$A(\tau_4) = A(t_4) = \text{const.} \quad (9)$$

Dabei ist

t_4 Zeitpunkt vor Beginn der Phase 4 in s

τ_4 Zeitvariable (in s) in der Brandphase 4:

$\tau_4 = t - t_4$ und $t_4 < \tau_4 \leq t_5$ mit t als globale Zeitvariable

3.4.4 Fire under control (stage 4)

When an automatic fire-extinguishing water system is activated, its fire-suppressing effect may affect the further development of the heat release rate. Unless shielding effects prevent the sprinkler system from suppressing the fire, it may be assumed that the heat release rate will be reduced after activation of the sprinkler system. Where no comprehensive investigations into the extinguishing performance of other automatic fire-extinguishing systems such as water spray systems or similar systems with water are known, the heat release rate and the area on fire are assumed to be constant from the time of activation onwards.

The heat release rate and the area on fire are calculated as follows:

Sprinkler system

$$\dot{Q}(\tau_4) = \dot{Q}(t_4) \cdot e^{-0,0023 \cdot \tau_4} \quad (6)$$

$$A(\tau_4) = A(t_4) = \text{const.} \quad (7)$$

Other fire-extinguishing water system

$$\dot{Q}(\tau_4) = \dot{Q}(t_4) = \text{const.} \quad (8)$$

$$A(\tau_4) = A(t_4) = \text{const.} \quad (9)$$

where

t_4 time before the onset of stage 4, in s

τ_4 time variable, in s, during stage 4:

$\tau_4 = t - t_4$ and $t_4 < \tau_4 \leq t_5$, t being the global variable of time

Es muss sichergestellt sein, dass die in der Bemessung berücksichtigte selbsttätige Wasserlöschanlage nach den jeweils gültigen Regelwerken ausgelegt und entsprechend betrieben wird.

3.4.5 Brandbekämpfung durch Feuerwehr (Phase 5)

Der Zeitpunkt bis zum Beginn der manuellen Brandbekämpfung ergibt sich aus dem Zeitintervall von der Brandentstehung bis zur Brandmeldung zzgl. der Interventionszeit der Feuerwehr. Es können folgende Bemessungsgrößen nach Tabelle 3 und Tabelle 4 herangezogen werden:

Der Zeitpunkt bis zur Einleitung der manuellen Brandbekämpfung berechnet sich zu

$$t_5 = t_a + t_b \quad (10)$$

3.5 Bestimmung des Auslösezeitpunktes von selbsttätigen Wasserlöschanlagen

3.5.1 Auslösezeitpunkt von Sprinkleranlagen

Der Auslösezeitpunkt von Sprinklern in der fortentwickelten Brandphase kann anhand Tabelle 5 bis Tabelle 8 bestimmt werden. Die angegebenen Zahlenwerte gehen als Bemessungsgröße t_4 in die weitere Berechnung ein.

It must be ensured that the automatic fire-extinguishing water system taken into consideration in dimensioning has been designed in accordance with the relevant valid rules and is operated accordingly.

3.4.5 Firefighting by the fire brigade (stage 5)

The time up to the beginning of manual firefighting results from the time elapsing between the outbreak of fire and the fire alarm plus the fire brigade's intervention time. The following dimensioning quantities from Table 3 and Table 4 can be used:

The time until manual firefighting begins is calculated as follows:

$$t_5 = t_a + t_b \quad (10)$$

3.5 Determination of the activation time of automatic fire-extinguishing water systems

3.5.1 Activation time of sprinkler systems

The activation time of sprinkler systems during the stage of developing fire can be determined using Table 5 through Table 8. The numerical values given there enter the subsequent calculations as dimensioning quantity t_4 .

Tabelle 3. Zeiten t_a bis zur Brandmeldung

	Brandmeldung	Zeit
a1	Automatische Brandmeldung durch Brandmeldeanlage nach DIN VDE 0833 mit automatischen Brandmeldern der Kenngröße Rauch	$t_{a1} = 120 \text{ s}$
a2	Automatische Brandmeldung durch Auslösung der Sprinkleranlage	$t_{a2} = t_4$ gemäß Abschnitt 3.5.1
a3	Brandmeldung durch Auslösung der Sprinkleranlage ohne direkte Weiterschaltung zur Feuerwehr	$t_{a3} = t_{a2} + 300 \text{ s}$
a4	Automatische Brandmeldung durch Brandmeldeanlage nach DIN VDE 0833 mit Wärmemaximalmeldern	t_{a4} gemäß Abschnitt 3.5.2
a5	Sonstige Brandmeldung (z.B. Telefon)	$t_{a5} = 600 \text{ s}$

Table 3. Times until fire alarm, t_a

	Fire alarm	Time
a1	Automatic fire alarm by fire detection and alarm system in accordance with DIN VDE 0833, activated by automatic smoke detectors	$t_{a1} = 120 \text{ s}$
a2	Automatic fire alarm by activation of sprinkler system	$t_{a2} = t_4$ as per Section 3.5.1
a3	Fire alarm by activation of sprinkler system without direct relaying of fire alarm to the fire brigade	$t_{a3} = t_{a2} + 300 \text{ s}$
a4	Automatic fire alarm by fire detection and alarm system in accordance with DIN VDE 0833, activated by maximum temperature detectors	t_{a4} as per Section 3.5.2
a5	Other fire alarm (such as phone call)	$t_{a5} = 600 \text{ s}$

Tabelle 4. Interventionszeiten t_b der Feuerwehr

	Art der Verhältnisse	Zeit
b1	Günstige Verhältnisse (Vorhandensein einer Werkfeuerwehr)	$t_{b1} = 480 \text{ s}$
b2	Normale Verhältnisse (z.B. Berufsfeuerwehr vorhanden/Einsatzstelle übersichtlich)	$t_{b2} = 780 \text{ s}$
b3	Ungünstige Verhältnisse (z.B. Freiwillige Feuerwehr/Einsatzstelle übersichtlich; Berufsfeuerwehr vorhanden/Einsatzstelle unübersichtlich)	$t_{b3} = 1080 \text{ s}$
b4	Besonders ungünstige Verhältnisse (z.B. Freiwillige Feuerwehr vorhanden/Einsatzstelle besonders unübersichtlich)	$t_{b4} = 1380 \text{ s}$

Anmerkungen:

Die Werte in Tabelle 4 beinhalten eine Vorlaufzeit von 180 s zur Vorbereitung der Löschmaßnahmen nach dem Eintreffen an der Einsatzstelle. Abhängig von den Gegebenheiten an der Einsatzstelle sind eventuell längere Interventionszeiten zu Grunde zu legen.

Diese Werte sind Anhaltswerte für die Bemessung von Rauch- und Wärmeabzugsanlagen mit Ingenieurmethoden. Sie unterscheiden sich von den Eingreifzeiten, die für eine Menschenrettung bei einem kritischen Wohnungsbrand gemäß Schutzzieldefinition (AGBF-Bund) erforderlich sind.

Table 4. Fire brigade's intervention times, t_b

	Conditions	Time
b1	Favourable conditions (existence of a factory fire brigade)	$t_{b1} = 480 \text{ s}$
b2	Normal conditions (such as the existence of a professional fire brigade/easy-to-survey fire ground)	$t_{b2} = 780 \text{ s}$
b3	Unfavourable conditions (such as the existence of an auxiliary fire brigade/easy-to-survey fire ground or existence of a professional fire brigade/ hard-to-survey fire ground)	$t_{b3} = 1080 \text{ s}$
b4	Particularly unfavourable conditions (such as the existence of an auxiliary fire brigade/particularly hard-to-survey fire ground)	$t_{b4} = 1380 \text{ s}$

Notes:

The times in Table 4 include a time of 180 s for preparing firefighting measures after the fire brigade has arrived at the site of fire. Depending on the conditions encountered at the site, longer intervention times may have to be assumed.

This values are approximate values for the dimensioning of smoke and heat control systems using engineering methods. They differ from the intervention times required for rescuing persons in the event of a critical fire in a residence, as per definition of the protection goal (AGBF-Bund).

Bei der Anwendung dieser Tabellen sind folgende geometrischen Randbedingungen und Sprinklerkennwerte zu berücksichtigen:

- Sprinkler müssen deckennah angebracht werden (max. Abstand 10 cm)
- maximaler vertikaler Abstand zwischen Brandfläche und Decke ($h_{\max}$ siehe Bild 4)
- Nennauslösetemperatur (ϑ_e)
- Trägheitsindex (RTI) bzw. Ansprech-Klasse nach EN 12259-1

Es wird vereinfachend davon ausgegangen, dass die Rauchgase vom Aufprallpunkt des Plumes an die Decke radial abströmen können und dieser Vorgang nicht durch angrenzende Bauteile gestört wird. Die tabellierten Auslösezeiten finden nur Anwendung für ebene Decken.

The following geometrical boundary conditions and sprinkler characteristics are to be taken into consideration when applying the tables:

- sprinkler heads must be set near te ceiling (max. distances 10 cm)
- maximum vertical distance between area on fire and ceiling ($h_{\max}$ see Figure 4)
- nominal activation temperature (ϑ_e)
- response time index (RTI) or response class as per EN 12259-1

For the sake of simplification, it will be assumed that the smoke gases can flow away radially from the point of impact of the plume on the ceiling, and that no adjoining building elements interfere with this process. The tabulated activation times are to be applied to plane ceilings only.

Tabelle 5. Sprinklerauslösezeiten t_4 (in s) für $\alpha = 0,0029 \text{ kW/s}^2$

Brandintensitätskoeffizient $\alpha = 0,0029 \text{ kW/s}^2$							
Ansprech-Klasse			Schnell	Spezial		Standard A	
Trägheitsindex in $(\text{s} \cdot \text{m})^{1/2}$			$RTI = 27$	$RTI = 50$	$RTI = 80$	$RTI = 120$	$RTI = 160$
Höhe: 3,0 m	Nennauslösetemperatur in °C	57	505	520	535	555	570
		68	590	605	615	635	655
		79	670	680	695	715	730
		93	770	780	790	810	825
		141	–	–	–	–	–
		182	–	–	–	–	–
Höhe: 4,0 m		57	570	580	600	615	630
		68	675	685	700	715	735
		79	775	785	795	815	830
		93	895	905	915	930	950
		141	–	–	–	–	–
		182	–	–	–	–	–
Höhe: 6,0 m		57	650	660	670	690	705
		68	775	785	800	815	830
		79	905	915	925	940	955
		93	1080	1090	1100	1115	1130
		141	–	–	–	–	–
		182	–	–	–	–	–
Höhe: 8,0 m		57	755	760	775	790	800
		68	895	900	910	925	940
		79	1025	1030	1045	1055	1070
		93	1180	1190	1200	1210	1225
		141	–	–	–	–	–
		182	–	–	–	–	–
Höhe: 10,0 m		57	890	895	905	920	935
		68	1055	1065	1075	1085	1100
		79	1215	1220	1230	1245	1255
		93	1400	1410	1420	1430	1440
		141	–	–	–	–	–
		182	–	–	–	–	–

Zwischenwerte dürfen linear interpoliert werden.

Table 5. Sprinkler activation times, t_4 (in s), for $\alpha = 0,0029 \text{ kW/s}^2$

Fire intensity coefficient $\alpha = 0,0029 \text{ kW/s}^2$							
Response class			Fast	Special		Standard A	
Response time index, in $(\text{s} \cdot \text{m})^{1/2}$			$RTI = 27$	$RTI = 50$	$RTI = 80$	$RTI = 120$	$RTI = 160$
Height: 3,0 m	Nominal activation temperature, in °C	57	505	520	535	555	570
		68	590	605	615	635	655
		79	670	680	695	715	730
		93	770	780	790	810	825
		141	–	–	–	–	–
		182	–	–	–	–	–
Height: 4,0 m		57	570	580	600	615	630
		68	675	685	700	715	735
		79	775	785	795	815	830
		93	895	905	915	930	950
		141	–	–	–	–	–
		182	–	–	–	–	–
Height: 6,0 m		57	650	660	670	690	705
		68	775	785	800	815	830
		79	905	915	925	940	955
		93	1080	1090	1100	1115	1130
		141	–	–	–	–	–
		182	–	–	–	–	–
Height: 8,0 m		57	755	760	775	790	800
		68	895	900	910	925	940
		79	1025	1030	1045	1055	1070
		93	1180	1190	1200	1210	1225
		141	–	–	–	–	–
		182	–	–	–	–	–
Height: 10,0 m		57	890	895	905	920	935
		68	1055	1065	1075	1085	1100
		79	1215	1220	1230	1245	1255
		93	1400	1410	1420	1430	1440
		141	–	–	–	–	–
		182	–	–	–	–	–

Linear interpolation is allowed for intermediate values.

Tabelle 6. Sprinklerauslösezeiten t_4 (in s) für $\alpha = 0,012 \text{ kW/s}^2$

Brandintensitätskoeffizient $\alpha = 0,012 \text{ kW/s}^2$							
Ansprech-Klasse			Schnell	Spezial		Standard A	
Trägheitsindex in $(\text{s} \cdot \text{m})^{1/2}$			$RTI = 27$	$RTI = 50$	$RTI = 80$	$RTI = 120$	$RTI = 160$
Höhe: 3,0 m	Nennauslösetemperatur in °C	57	225	240	255	270	285
		68	265	275	290	310	325
		79	300	310	325	340	360
		93	340	350	365	380	400
		141	465	475	490	505	525
		182	565	570	585	300	620
Höhe: 4,0 m		57	275	285	300	315	330
		68	330	340	350	390	385
		79	380	385	400	415	430
		93	440	445	460	475	490
		141	640	645	655	670	685
		182	780	785	790	800	815
Höhe: 6,0 m		57	320	330	345	360	375
		68	390	400	410	425	440
		79	450	460	470	485	500
		93	530	540	550	560	575
		141	820	830	850	865	885
		182	995	1010	1030	1040	1060
Höhe: 8,0 m		57	385	395	405	420	435
		68	455	465	475	490	500
		79	520	530	540	550	565
		93	595	605	615	630	640
		141	835	845	850	865	875
		182	1020	1025	1035	1045	1055
Höhe: 10,0 m		57	455	465	475	485	500
		68	535	545	555	565	580
		79	615	620	630	645	655
		93	705	715	725	735	745
		141	990	1000	1005	1020	1030
		182	1210	1220	1225	1235	1245

Zwischenwerte dürfen linear interpoliert werden.

Table 6. Sprinkler activation times, t_4 (in s), for $\alpha = 0,012 \text{ kW/s}^2$

Fire intensity coefficient $\alpha = 0,012 \text{ kW/s}^2$							
Response class			Fast	Special		Standard A	
Response time index, in $(\text{s} \cdot \text{m})^{1/2}$			$RTI = 27$	$RTI = 50$	$RTI = 80$	$RTI = 120$	$RTI = 160$
Height: 3,0 m	Nominal activation temperature, in °C	57	225	240	255	270	285
		68	265	275	290	310	325
		79	300	310	325	340	360
		93	340	350	365	380	400
		141	465	475	490	505	525
		182	565	570	585	300	620
Height: 4,0 m		57	275	285	300	315	330
		68	330	340	350	390	385
		79	380	385	400	415	430
		93	440	445	460	475	490
		141	640	645	655	670	685
		182	780	785	790	800	815
Height: 6,0 m		57	320	330	345	360	375
		68	390	400	410	425	440
		79	450	460	470	485	500
		93	530	540	550	560	575
		141	820	830	850	865	885
		182	995	1010	1030	1040	1060
Height: 8,0 m		57	385	395	405	420	435
		68	455	465	475	490	500
		79	520	530	540	550	565
		93	595	605	615	630	640
		141	835	845	850	865	875
		182	1020	1025	1035	1045	1055
Height: 10,0 m		57	455	465	475	485	500
		68	535	545	555	565	580
		79	615	620	630	645	655
		93	705	715	725	735	745
		141	990	1000	1005	1020	1030
		182	1210	1220	1225	1235	1245

Linear interpolation is allowed for intermediate values.

Tabelle 7. Sprinklerauslösezeiten t_4 (in s) für $\alpha = 0,047 \text{ kW/s}^2$

Brandintensitätskoeffizient $\alpha = 0,047 \text{ kW/s}^2$							
Ansprech-Klasse		Schnell	Spezial			Standard A	
Trägheitsindex in $(\text{s} \cdot \text{m})^{1/2}$		$RTI = 27$	$RTI = 50$	$RTI = 80$	$RTI = 120$	$RTI = 160$	
Höhe: 3,0 m	Nennauslösetemperatur in °C	57	125	140	150	165	175
		68	145	155	170	185	195
		79	165	175	185	200	215
		93	185	195	205	220	235
		141	245	255	270	285	300
		182	295	305	315	335	350
Höhe: 4,0 m		57	145	155	165	180	190
		68	165	175	185	200	215
		79	185	195	205	220	235
		93	210	220	230	245	360
		141	285	290	305	320	330
		182	340	350	360	375	390
Höhe: 6,0 m		57	175	185	195	300	220
		68	205	210	225	235	250
		79	230	240	250	265	275
		93	260	270	280	295	305
		141	355	365	375	390	400
		182	430	440	450	460	475
Höhe: 8,0 m		57	210	220	230	240	255
		68	245	250	260	275	285
		79	275	285	295	305	320
		93	315	320	330	345	255
		141	435	440	450	450	475
		182	525	535	540	555	565
Höhe: 10,0 m		57	245	250	260	275	285
		68	285	295	300	315	325
		79	325	330	340	355	365
		93	370	380	385	400	410
		141	515	520	530	540	550
		182	625	630	640	650	660

Zwischenwerte dürfen linear interpoliert werden.

Table 7. Sprinkler activation times, t_4 (in s), for $\alpha = 0,047 \text{ kW/s}^2$

Fire intensity coefficient $\alpha = 0,047 \text{ kW/s}^2$							
Response class			Fast	Special		Standard A	
Response time index, in $(\text{s} \cdot \text{m})^{1/2}$			$RTI = 27$	$RTI = 50$	$RTI = 80$	$RTI = 120$	$RTI = 160$
Height: 3,0 m	Nominal activation temperature, in °C	57	125	140	150	165	175
		68	145	155	170	185	195
		79	165	175	185	200	215
		93	185	195	205	220	235
		141	245	255	270	285	300
		182	295	305	315	335	350
Height: 4,0 m		57	145	155	165	180	190
		68	165	175	185	200	215
		79	185	195	205	220	235
		93	210	220	230	245	360
		141	285	290	305	320	330
		182	340	350	360	375	390
Height: 6,0 m		57	175	185	195	300	220
		68	205	210	225	235	250
		79	230	240	250	265	275
		93	260	270	280	295	305
		141	355	365	375	390	400
		182	430	440	450	460	475
Height: 8,0 m		57	210	220	230	240	255
		68	245	250	260	275	285
		79	275	285	295	305	320
		93	315	320	330	345	255
		141	435	440	450	450	475
		182	525	535	540	555	565
Height: 10,0 m		57	245	250	260	275	285
		68	285	295	300	315	325
		79	325	330	340	355	365
		93	370	380	385	400	410
		141	515	520	530	540	550
		182	625	630	640	650	660

Linear interpolation is allowed for intermediate values.

Tabelle 8. Sprinklerauslösezeiten t_4 (in s) für $\alpha = 0,188 \text{ kW/s}^2$

Brandintensitätskoeffizient $\alpha = 0,188 \text{ kW/s}^2$							
Ansprech-Klasse		Schnell	Spezial			Standard A	
Trägheitsindex in $(\text{s} \cdot \text{m})^{1/2}$		$RTI = 27$	$RTI = 50$	$RTI = 80$	$RTI = 120$	$RTI = 160$	
Höhe: 3,0 m	Nennauslösetemperatur in °C	57	120	120	120	120	120
		68	120	120	120	120	120
		79	120	120	120	120	130
		93	120	120	120	135	145
		141	135	145	155	165	180
		182	155	165	180	190	205
Höhe: 4,0 m		57	120	120	120	120	120
		68	120	120	120	120	130
		79	120	120	120	135	145
		93	120	125	135	145	155
		141	150	160	170	185	195
		182	180	190	200	210	225
Höhe: 6,0 m		57	120	120	120	125	135
		68	120	120	130	140	150
		79	125	135	145	155	165
		93	140	150	160	170	180
		141	190	195	205	220	230
		182	225	235	240	255	265
Höhe: 8,0 m		57	120	125	135	145	155
		68	135	140	150	160	170
		79	150	155	165	175	185
		93	170	175	185	195	205
		141	230	235	245	255	265
		182	275	280	290	300	310
Höhe: 10,0 m		57	135	140	150	160	170
		68	155	160	170	180	190
		79	175	180	190	200	210
		93	195	205	210	225	235
		141	270	275	285	295	305
		182	325	330	335	345	355

Zwischenwerte dürfen linear interpoliert werden.

Table 8. Sprinkler activation times, t_4 (in s), for $\alpha = 0,188 \text{ kW/s}^2$

Fire intensity coefficient $\alpha = 0,188 \text{ kW/s}^2$							
Response class			Fast	Special		Standard A	
Response time index, in $(\text{s} \cdot \text{m})^{1/2}$			$RTI = 27$	$RTI = 50$	$RTI = 80$	$RTI = 120$	$RTI = 160$
Height: 3,0 m	Nominal activation temperature, in °C	57	120	120	120	120	120
		68	120	120	120	120	120
		79	120	120	120	120	130
		93	120	120	120	135	145
		141	135	145	155	165	180
		182	155	165	180	190	205
Height: 4,0 m		57	120	120	120	120	120
		68	120	120	120	120	130
		79	120	120	120	135	145
		93	120	125	135	145	155
		141	150	160	170	185	195
		182	180	190	200	210	225
Height: 6,0 m		57	120	120	120	125	135
		68	120	120	130	140	150
		79	125	135	145	155	165
		93	140	150	160	170	180
		141	190	195	205	220	230
		182	225	235	240	255	265
Height: 8,0 m		57	120	125	135	145	155
		68	135	140	150	160	170
		79	150	155	165	175	185
		93	170	175	185	195	205
		141	230	235	245	255	265
		182	275	280	290	300	310
Height: 10,0 m		57	135	140	150	160	170
		68	155	160	170	180	190
		79	175	180	190	200	210
		93	195	205	210	225	235
		141	270	275	285	295	305
		182	325	330	335	345	355

Linear interpolation is allowed for intermediate values.

Der vorgegebene horizontale Abstand zwischen Plumeachse und Sprinklerkopf $r_{\max} = 3,25$ m (siehe Bild 4) stellt den Regelfall für die Bemessung dar. Dieser angesetzte Abstand berücksichtigt den ungünstigsten Wert, der sich bei einem Sprinkler-Rastermaß von 4,60 m nach VdS CEA 4001 ergibt.

Bei der Bemessung der Brandverlaufskurven gilt es zu berücksichtigen, dass der Auslösezeitpunkt des Sprinklers auf einen theoretischen Wert von frühestens 120 s festgesetzt wird. In der Praxis sind abhängig von der Brandentwicklung durchaus frühere Auslösezeitpunkte möglich. Tabelle 5 bis Tabelle 8 gelten für einen maximalen vertikalen Abstand zwischen Decke und Sprühteller des Sprinklers von maximal 10 cm.

Anmerkung 1: Die charakteristischen Sprinklerkennwerte sind möglichst so zu wählen, dass eine Auslösung spätestens nach 900 s erfolgt. Die grau hinterlegten Felder kennzeichnen Sprinklerauslösezeiten größer als 900 s und sollten nur in Einzelfällen herangezogen werden. Für die Bestimmung der Brandverlaufskurven im Sinne dieser Richtlinie wird demnach bei Auslösezeitpunkten > 900 s konservativ von einer theoretischen Nichtauslösung des Sprinklers und damit von einer ungeminderten Freisetzung der Rauchgasmassenströme ausgegangen.

Anmerkung 2: Die in Tabelle 5 bis Tabelle 8 angegebenen Auslösezeiten wurden auf der Basis von CFD-Berechnungen mit dem Brandsimulationsmodell FDS [2] und mit Hilfe von empirischen Gleichungen nach [4] und [5] unter Anwendung eines Wärmeleitfaktors $C = 0,7 \sqrt{(\text{m/s})}$ nach EN 12259-1 ermittelt.

Die Umrechnungsgleichungen nach [4] und [5] sind im Anhang aufgeführt (Gleichung (A1) bis Gleichung (A8)).

3.5.2 Bestimmung des Auslösezeitpunktes von Löschanlagen mit Wärmemaximalmeldern

Bei automatischen Löschanlagen, die über Wärmemaximalmelder aktiviert werden, kann das zeitliche Ansprechverhalten der Melder unter Anwendung der Gleichungen (11) bis (16) rechnerisch abgeschätzt werden. Dabei wird die Temperaturentwicklung der

The specified horizontal distance between the axis of the plume and the sprinkler head, $r_{\max} = 3,25$ m, (see Figure 4) is the regular case for dimensioning purposes. This assumption for the distance takes into consideration the most unfavourable value resulting from a grid spacing of 4,60 m between sprinklers, as specified in VdS CEA 4001.

When determining the fire curves, take into account that the activation time of the sprinkler head is specified to be a theoretical earliest time of 120 s. Earlier activation times may well be achieved in practice, depending on the development of the fire. Table 5 through Table 8 are valid for a maximum vertical distance between the ceiling and the sprinkler spray disk of max. 10 cm.

Note 1: If possible, the sprinkler characteristics shall be so selected as to ensure activation after 900 s at the latest. The table cells which are shaded grey mark sprinkler activation times in excess of 900 s, which should only be used in special cases. When determining the fire curves as specified in this guideline, the conservative assumption is made that, in theory, the sprinkler is not activated at all and the smoke-gas mass flows are released without restriction if activation times exceed 900 s.

Note 2: The activation times listed in Table 5 through Table 8 were determined on the basis of CFD calculations using the fire simulation model FDS [2] and empirical equations given in [4] and [5] assuming a conductivity factor $C = 0,7 \sqrt{(\text{m/s})}$ as specified in EN 12259-1.

The conversion equations taken from [4] and [5] are given in the annex (Equation (A1) through Equation (A8)).

3.5.2 Determination of the activation time of fire-extinguishing systems using maximum temperature detectors

For automatic fire-extinguishing systems activated by maximum temperature detectors, the temporal response of the detectors can be estimated by calculations using Equation (11) through Equation (16). This is achieved by determining the development

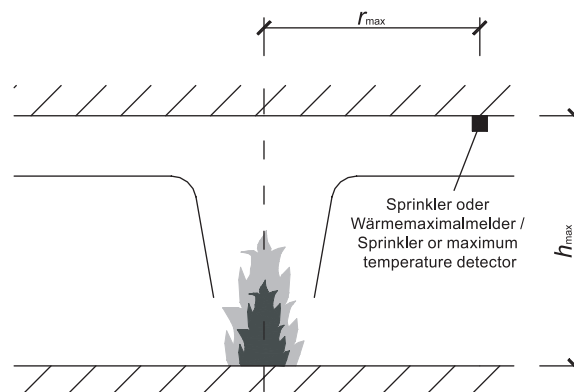


Bild 4. Darstellung der Größen $r_{\max}$ und $h_{\max}$

Figure 4. Illustration of the quantities $r_{\max}$ and $h_{\max}$

Rauchgase am Melder bestimmt und mit der maximalen statischen Ansprechtemperatur nach EN 54-7 des gewählten Meldertyps verglichen (siehe Gleichung 11). Grundsätzlich gilt es zu berücksichtigen, dass die Melder deckennah angeordnet sein müssen.

Für die fortentwickelte Brandphase (Phase 2) ist der Nachweis nach Gleichung (11) unter Anwendung der Gleichungen (12) bis (16) [4] zu führen. Bei der rechnerischen Nachweisführung ist in der Regel iterativ vorzugehen.

$$\text{Nachweis: } \vartheta_{\text{Rauch}} \geq \vartheta_{\text{WM}} \quad (11)$$

$$\vartheta_{\text{Rauch}} = \Delta T_2^* \cdot \left[K^{0,6} (T_\infty / g) \alpha^{0,6} h_{\text{max}}^{-0,6} \right] + T_\infty - 273 \quad (12)$$

mit

$$\Delta T_2^* = \begin{cases} 0 & t_2^* \leq t_f^* \\ \left(\frac{t_2^* - t_f^*}{0,188 + 0,313 r_{\text{max}} / h_{\text{max}}} \right)^{1,333} & t_2^* > t_f^* \end{cases} \quad (13)$$

$$t_2^* = \tau_2 / (K^{-0,2} \alpha^{-0,2} h_{\text{max}}^{0,8}) \quad (14)$$

$$t_f^* = 0,954 (1 + r_{\text{max}} / h_{\text{max}}) \quad (15)$$

$$K = g / (c_p T_\infty \rho_\infty) \quad (16)$$

Dabei ist

ϑ_{WM} maximale statische Ansprechtemperatur des gewählten Wärmemaximalmelders in °C

ϑ_{Rauch} Rauchgastemperatur am Melder in °C

T_∞ Umgebungstemperatur in K

ΔT_2^* dimensionslose Rauchgastemperatur (Hilfsvariable)

t_2^* dimensionslose Zeit (Hilfsvariable)

t_f^* Hilfsvariable, die die Zeitverzögerung der aufsteigenden Rauchgase zwischen Brandfläche und der zu untersuchenden Stelle berücksichtigt

τ_2 Zeitvariable in der Brandphase 2 in s

K Hilfskoeffizient in $\text{m}^4 / (\text{kJ} \cdot \text{s}^2)$

ρ_∞ Dichte der Luft bei Umgebungstemperatur in kg/m^3

c_p spezifische Wärmekapazität in $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$

g Erdbeschleunigung in m/s^2

α Brandintensitätskoeffizient in kW/s^2

over time of the temperature of the smoke gases at the detector and comparing this temperature to the maximum static response temperature of the selected type of detector as specified in EN 54-7 (see Equation (11)). As a matter of principle, it must be observed that the detectors are to be placed close to the ceiling.

For the developing-fire stage (stage 2), the proof shall follow Equation (11) using Equation (12) through Equation (16) [4]. As a rule, proof by way of calculation must be iterative.

$$\text{Proof: } \vartheta_{\text{Rauch}} \geq \vartheta_{\text{WM}} \quad (11)$$

$$\vartheta_{\text{Rauch}} = \Delta T_2^* \cdot \left[K^{0,6} (T_\infty / g) \alpha^{0,6} h_{\text{max}}^{-0,6} \right] + T_\infty - 273 \quad (12)$$

where

$$\Delta T_2^* = \begin{cases} 0 & t_2^* \leq t_f^* \\ \left(\frac{t_2^* - t_f^*}{0,188 + 0,313 r_{\text{max}} / h_{\text{max}}} \right)^{1,333} & t_2^* > t_f^* \end{cases} \quad (13)$$

$$t_2^* = \tau_2 / (K^{-0,2} \alpha^{-0,2} h_{\text{max}}^{0,8}) \quad (14)$$

$$t_f^* = 0,954 (1 + r_{\text{max}} / h_{\text{max}}) \quad (15)$$

$$K = g / (c_p T_\infty \rho_\infty) \quad (16)$$

where

ϑ_{WM} maximum static response temperature of the maximum temperature detector selected, in °C

ϑ_{Rauch} temperature of the smoke gases at the detector, in °C

T_∞ ambient temperature, in K

ΔT_2^* dimensionless smoke-gas temperature (auxiliary variable)

t_2^* dimensionless time (auxiliary variable)

t_f^* auxiliary variable taking into account the time it takes for the smoke gases to rise from the area on fire to the point under investigation

τ_2 time variable for stage 2, in s

K auxiliary coefficient, in $\text{m}^4 / (\text{kJ} \cdot \text{s}^2)$

ρ_∞ density of the air at ambient temperature, in kg/m^3

c_p specific heat, in $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$

g gravitational acceleration, in m/s^2

α fire intensity coefficient, in kW/s^2

$h_{\max}$ maximaler vertikaler Abstand zwischen Brandfläche und Decke (siehe Bild 4) in m

$r_{\max}$ maximaler horizontaler Abstand zwischen Plume-Achse und Wärmemaximalmelder (siehe Bild 4) in m

$h_{\max}$ maximum vertical distance between area on fire and the ceiling (see Figure 4), in m

$r_{\max}$ maximum horizontal distance between the plume axis and the maximum temperature detector (see Figure 4), in m

3.5.3 Auslösezeitpunkt von sonstigen selbsttätigen Wasserlöschanlagen

Der Auslösezeitpunkt von selbsttätigen Wasserlöschanlagen, die über Rauchmelder, Thermodifferentialmelder oder Flammenmelder aktiviert werden, ist abhängig von deren Auslöseverhalten und der zeitlichen Rauchgasverteilung. Der Auslösezeitpunkt ist abzuschätzen oder durch geeignete Ingenieurverfahren zu bestimmen.

Bei dem Szenario mit niedrigerenergetischem Brand ist davon auszugehen, dass eine eingebaute Sprinkleranlage nicht auslöst. Es wird darauf hingewiesen, dass dieses Szenario deshalb meist angesetzt wird, um die Wirksamkeit des Entrauchungssystems einschließlich der automatischen Auslöseinrichtungen zu überprüfen.

3.5.3 Activation times of other automatic fire-extinguishing water systems

The activation time of fire-extinguishing water systems activated by smoke detectors, rate-of-rise temperature detectors or flame detectors depends on the response characteristics of these detectors and on the distribution of smoke gases over time. The activation time shall be estimated or determined using appropriate engineering methods.

For the scenario of a low-energy fire, it must be assumed that any sprinkler system installed is not activated. Note that, as a matter of consequence, this scenario is often used in order to verify the effectiveness of the smoke removal system including the automatic fire detection and alarm equipment.

3.6 Beschreibung der einzelnen Brandphasen

In Tabelle 9 sind sämtliche Brandphasen dieser Richtlinie einschließlich der jeweiligen Berechnungsgrundlagen für die Wärmefreisetzungsrate und die Brandfläche zusammengefasst.

3.6 Characterisation of the individual fire stages

Table 9 summarises all fire stages specified in this guideline, including the pertinent bases for calculation of the heat release rate and the area on fire.

3.7 Bestimmung der konvektiven Wärmefreisetzungsrate

Bei der Berechnung der Wärmefreisetzungsrate wird angenommen, dass 30 % durch Strahlung abgegeben und 70 % konvektiv in die Heißgasschicht eingetragen werden. Die konvektive Wärmefreisetzungsrate berechnet sich demnach zu:

$$\dot{Q}_{\text{konv}}(t) = \dot{Q}(t) \cdot 0,7 \quad (17)$$

Dabei ist

$\dot{Q}_{\text{konv}}$ konvektive Wärmefreisetzungsrate in kW
 $\dot{Q}$ Gesamt-Wärmefreisetzungsrate in kW

3.7 Determination of the convective heat release rate

In calculations of the heat release rate, the assumption is made that 30 % are released by means of radiation while 70 % are transferred into the layer of hot gases by means of convection. Therefore, the convective heat release rate is calculated as:

$$\dot{Q}_{\text{konv}}(t) = \dot{Q}(t) \cdot 0,7 \quad (17)$$

where

$\dot{Q}_{\text{konv}}$ convective heat release rate, in kW
 $\dot{Q}$ total heat release rate, in kW

3.8 Brandverlaufskurven aus Brandversuchen und Brandsimulationsberechnungen

Die in den folgenden Abschnitten aufgeführten Brandverlaufskurven sind objektspezifische Werte, die mit Hilfe von Brandsimulationsmodellen berechnet bzw. in Realbrandversuchen ermittelt wurden. Die in den einzelnen Bildern dargestellten approximierte Wärmefreisetzungsrate können alternativ für die Bemessung von Rauch- und Wärmeabzugsanlagen herangezogen werden, sofern sie für das vorliegende Brandrisiko geeignet sind.

3.8 Fire curves obtained from fire tests and fire simulation calculations

The fire curves shown in subsequent sections are object-specific values calculated using fire simulation models or determined in real-scale tests. The approximated heat release rates shown in the individual figures may, alternatively, be used for dimensioning heat and smoke control systems provided they are suitable for the fire risk at hand.

Tabelle 9. Beschreibung der einzelnen Brandphasen

Brandphase	Wärmefreisetzungsrate	Brandfläche	Zeitintervall
Phase 1: Brandentstehungsphase	$\dot{Q}(\tau_1) = 0,333 \cdot \tau_1$ $\dot{Q}(\tau_1) = 100 \text{ kW}$	$A(\tau_1) = 0,40 \text{ m}^2$ $A(\tau_1) = 0,40 \text{ m}^2$	$0 \leq \tau_1 \leq 300 \text{ s}$ $300 \text{ s} < \tau_1 \leq \tau_i$ $i = 4, 5$ $\tau_1 = t$
Phase 2: Fortentwickelter Brand	$\dot{Q}(\tau_2) = \dot{q}_f \cdot (A(\tau_2))$	$A(\tau_2) = (v \cdot \tau_2)^2$	$0 < \tau_2 \leq t_i$ $i = 3, 4, 5$ $\tau_2 = t$
Phase 3: Konstante Brandphase	$\dot{Q}(\tau_3) = \dot{Q}(t_3) = \text{const.}$	$A(\tau_3) = A(t_3) = \text{const.}$	$t_3 < \tau_3 \leq t_i$ $i = 4, 5$ $\tau_3 = t - t_3$
Phase 4a: Kontrollierter Brand durch Sprinklerauslösung	$\dot{Q}(\tau_4) = \dot{Q}(t_4) \cdot e^{-0,0023 \cdot (\tau_4)}$	$A(\tau_4) = A(t_4) = \text{const.}$	$t_4 < \tau_4 \leq t_5$ $\tau_4 = t - t_4$
Phase 4b: Kontrollierter Brand durch Aktivierung einer anderen automatischen Löschanlage	$\dot{Q}(\tau_3) = \dot{Q}(t_3) = \text{const.}$	$A(\tau_4) = A(t_4) = \text{const.}$	$t_4 < \tau_4 \leq t_5$ $\tau_4 = t - t_4$
Phase 5: Abklingender Brand durch manuelle Brandbekämpfung	–	–	t_5

Table 9. Characterisation of the individual fire stages

Fire stage	Heat release rate	Area on fire	Time interval
Stage 1: Initial fire	$\dot{Q}(\tau_1) = 0,333 \cdot \tau_1$ $\dot{Q}(\tau_1) = 100 \text{ kW}$	$A(\tau_1) = 0,40 \text{ m}^2$ $A(\tau_1) = 0,40 \text{ m}^2$	$0 \leq \tau_1 \leq 300 \text{ s}$ $300 \text{ s} < \tau_1 \leq \tau_i$ $i = 4, 5$ $\tau_1 = t$
Stage 2: Developing fire	$\dot{Q}(\tau_2) = \dot{q}_f \cdot (A(\tau_2))$	$A(\tau_2) = (v \cdot \tau_2)^2$	$0 < \tau_2 \leq t_i$ $i = 3, 4, 5$ $\tau_2 = t$
Stage 3: Continuous fire	$\dot{Q}(\tau_3) = \dot{Q}(t_3) = \text{const.}$	$A(\tau_3) = A(t_3) = \text{const.}$	$t_3 < \tau_3 \leq t_i$ $i = 4, 5$ $\tau_3 = t - t_3$
Stage 4a: Fire under control due to sprinkler activation	$\dot{Q}(\tau_4) = \dot{Q}(t_4) \cdot e^{-0,0023 \cdot (\tau_4)}$	$A(\tau_4) = A(t_4) = \text{const.}$	$t_4 < \tau_4 \leq t_5$ $\tau_4 = t - t_4$
Stage 4b: Fire under control due to activation of a different automatic fire-extinguish- ing system	$\dot{Q}(\tau_3) = \dot{Q}(t_3) = \text{const.}$	$A(\tau_4) = A(t_4) = \text{const.}$	$t_4 < \tau_4 \leq t_5$ $\tau_4 = t - t_4$
Stage 5: Dying fire due to manual firefighting activities	–	–	t_5

3.8.1 Wärmefreisetzungsrate aus Brandversuch – Sofa

Die in Bild 5 dargestellte Wärmefreisetzungsrate wurde mit Hilfe eines Brandversuches an einem Sofa (engl.: loveseat) bestimmt. Die maximale Gesamt-Wärmefreisetzungsrate lag bei rund 3 MW; die maximale Brandfläche betrug etwa 2 m². Daraus ergab sich eine maximale spezifische Wärmefreisetzungsrate von rund $\dot{q}_f = 1500 \text{ kW/m}^2$ und eine mittlere Brandausbreitungsgeschwindigkeit von $v = 3,9 \text{ mm/s}$ bis zum Zeitpunkt $t = 360 \text{ s}$.

3.8.1 Heat release rate from fire test – Loveseat

The heat release rate depicted in Figure 5 was determined by performing a fire test on a loveseat. The maximum total heat release rate amounted to approximately 3 MW; the maximum area on fire was about 2 m². As a result, the heat release rate per unit area was approximately $\dot{q}_f = 1500 \text{ kW/m}^2$ and the mean fire propagation speed was $v = 3,9 \text{ mm/s}$ up to the time $t = 360 \text{ s}$.

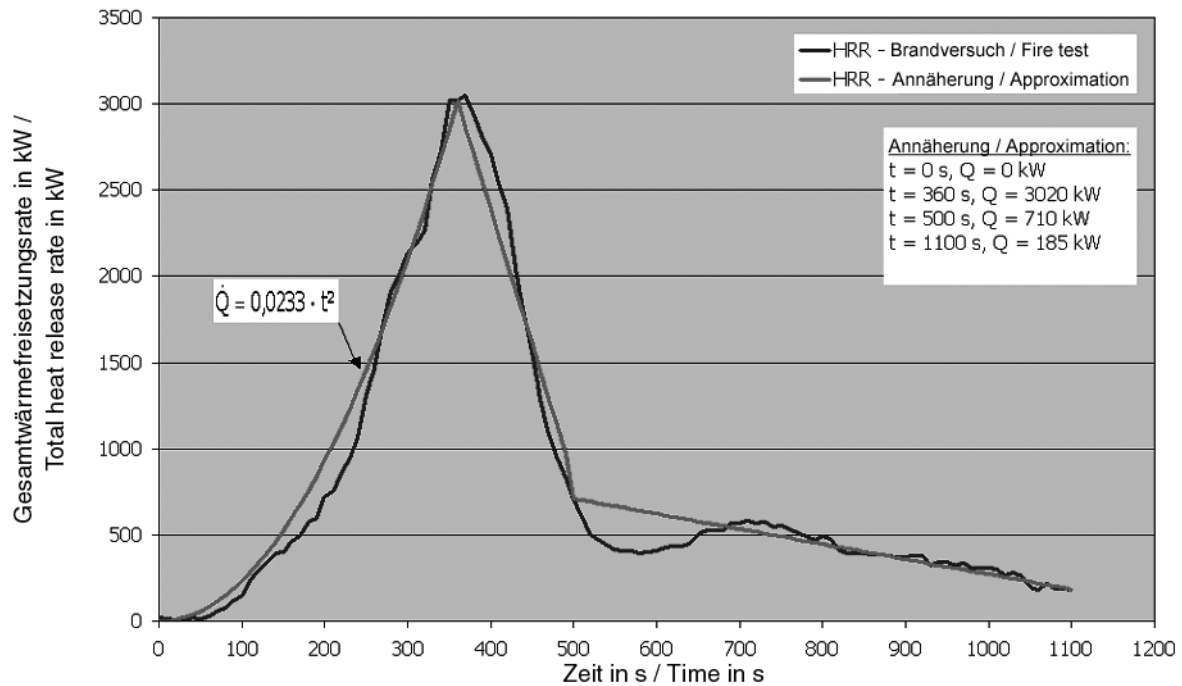


Bild 5. Gesamt-Wärmefreisetzungsrate – Sofa mit flexiblem PU-Schaum ohne Flammschutzmittel [7]

Figure 5. Total heat release rate (HRR) – Loveseat with flexible PU foam without fire-retarding agent

3.8.2 Brandverlaufskurven aus CFD Brandsimulationsberechnungen – Sitzgruppe im freien Raum

Für die in Bild 6 abgebildete Sitzgruppe wurde die Wärmefreisetzungsrate unter Anwendung eines CFD-basierten Brandsimulationsmodells berechnet. Die maximale Gesamt-Wärmefreisetzungsrate erreichte einen Wert von rund 11,4 MW; die maximale Brandfläche betrug 8,1 m².

3.8.2 Fire curves obtained from CFD calculations of fire simulations – Living-room suite in an infinite room

Applying a CFD-based fire simulation model, the heat release rate was calculated for the living-room suite shown in Figure 6. The maximum total heat release rate reached a value of approximately 11,4 MW; the maximum area on fire was 8,1 m².

3.8.3 Wärmefreisetzungsrate aus Brandversuch – Drucker

Die in Bild 9 dargestellte Wärmefreisetzungsrate eines Druckers wurde mit Hilfe eines Brandversuches ermittelt. Die maximale Gesamt-Wärmefreisetzungsrate des Druckers lag bei rund 55 kW; die maximale brandbeaufschlagte Brandfläche betrug etwa 0,1 m². Daraus ergab sich eine maximale spezifische Wärmefreisetzungsrate von $\dot{q}_f = 550 \text{ kW/m}^2$.

3.8.3 Heat release rate from fire test – Printer

The heat release rate of a printer as shown in Figure 9 was determined by performing a fire test. The maximum total heat release rate of the printer amounted to approximately 55 kW; the maximum area on fire was about 0,1 m². The resulting heat release rate per unit area was $\dot{q}_f = 550 \text{ kW/m}^2$.

3.8.4 Wärmefreisetzungsrate aus Brandversuchen – Pkw-Brände

Die in Bild 10 aufgeführten Wärmefreisetzungsraten kennzeichnen das Brandverhalten unterschiedlicher Personenkraftwagen. In Abhängigkeit vom Fahrzeugtyp und den in das Brandgeschehen involvierten Personenkraftwagen ergeben sich unterschiedliche Brandverlaufskurven.

3.8.4 Heat release rates from fire tests – Passenger cars

The heat release rates shown in Figure 10 characterise the behaviour of various passenger cars on fire. Depending on the type of vehicle and the passenger cars involved in the fire, varying fire curves result.

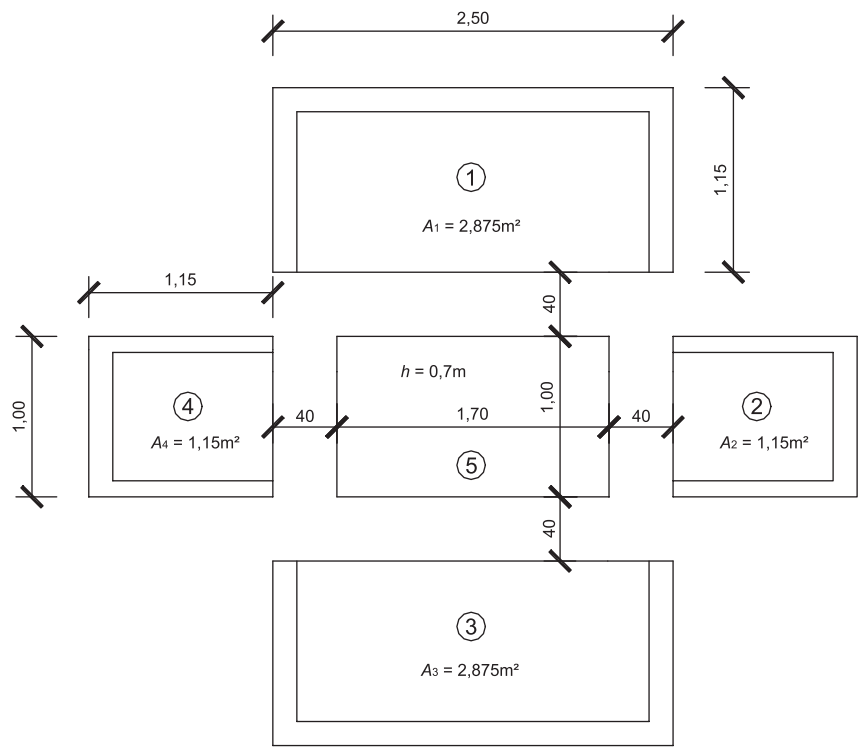


Bild 6. Sitzgruppe im freien Raum (z.B. in einem großem Atrium)

Figure 6. Living-room suite in an infinite room (e.g. in a large atrium)

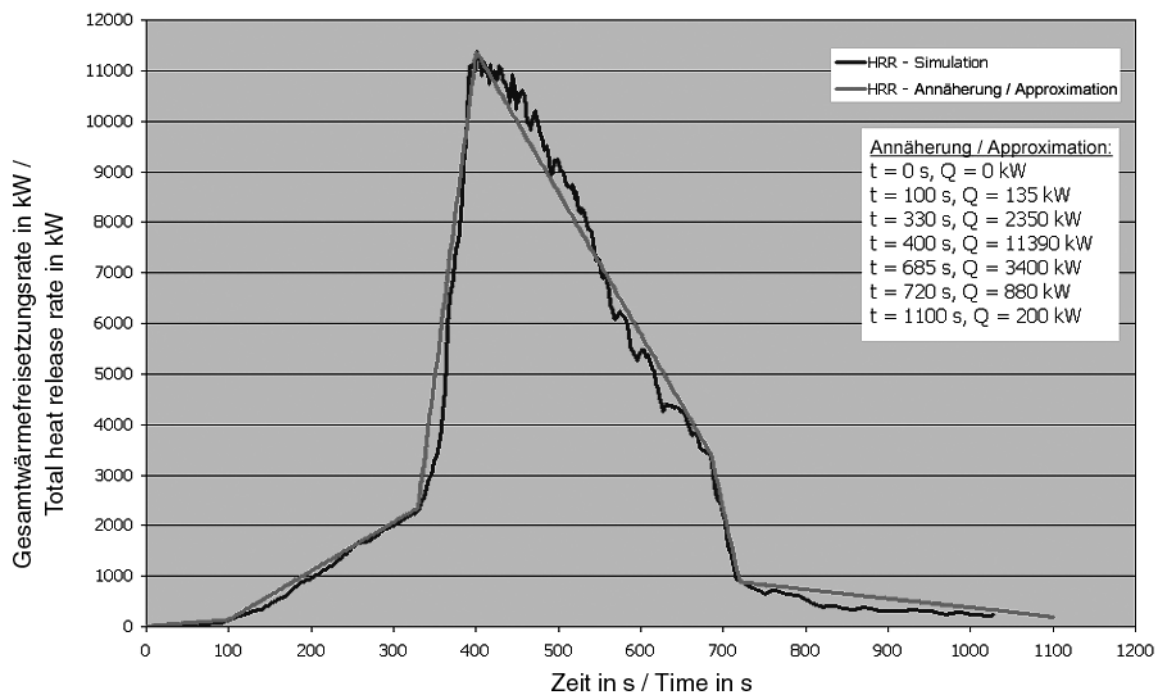


Bild 7. Gesamt-Wärmefreisetzungsrate – Sitzgruppe

Figure 7. Total heat release rate (HRR) – Living-room suite

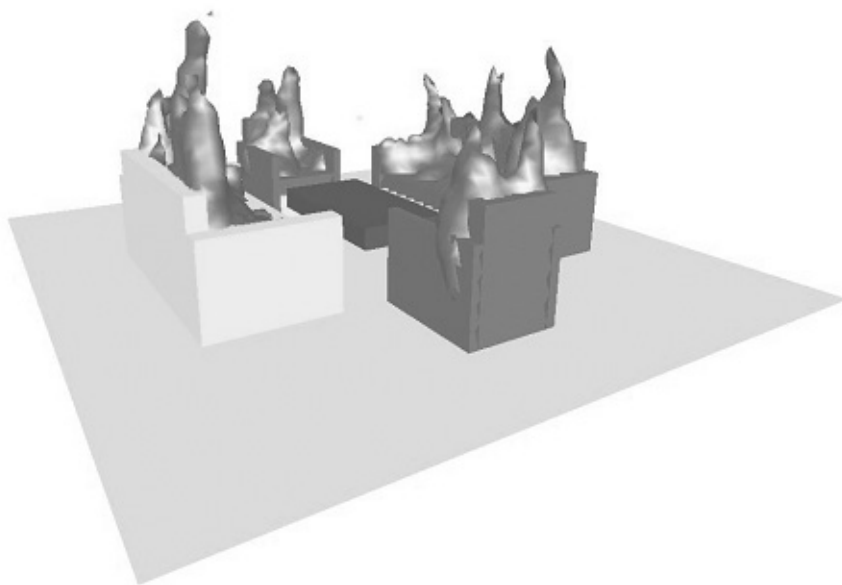


Bild 8. Computerdarstellung Vollbrand – Sitzgruppe im freien Raum – zum Zeitpunkt $t = 415$ s [8]

Folgende Stoffwerte lagen der Berechnung zu Grunde:

Sofa: Wärmefreisetzungsrate aus Brandversuch für Sofa (mit $\dot{Q}_{\max} = 3,4$ MW nach 390 s)
 Sofa: Polyurethan/Polsterung:
 Zündtemperatur = 280 °C,
 Verdampfungswärme = 1,8 kJ/g,
 theoretischer Heizwert = 30 kJ/g
 Tisch: Holz, keine Zündung
 Verwendete Software: FDS (Fire Dynamics Simulator) Ver. 3.1,
 Smokeview (visualization software), National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, USA

Figure 8. Computer visualisation of fully developed fire – living-room suite in an infinite room – at time $t = 415$ s [8]

The calculation was based on the following material characteristics:

Loveseat: Heat release rate from fire test on loveseat (where $\dot{Q}_{\max} = 3,4$ MW after 390 s)
 Loveseats: Polyurethane/upholstery:
 Ignition temperature = 280 °C,
 heat of evaporation 1,8 kJ/g,
 theoretical calorific value = 30 kJ/g
 Table: Wood, no ignition
 Software used: FDS (Fire Dynamics Simulator), version 3.1,
 Smokeview (visualisation software), National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, USA

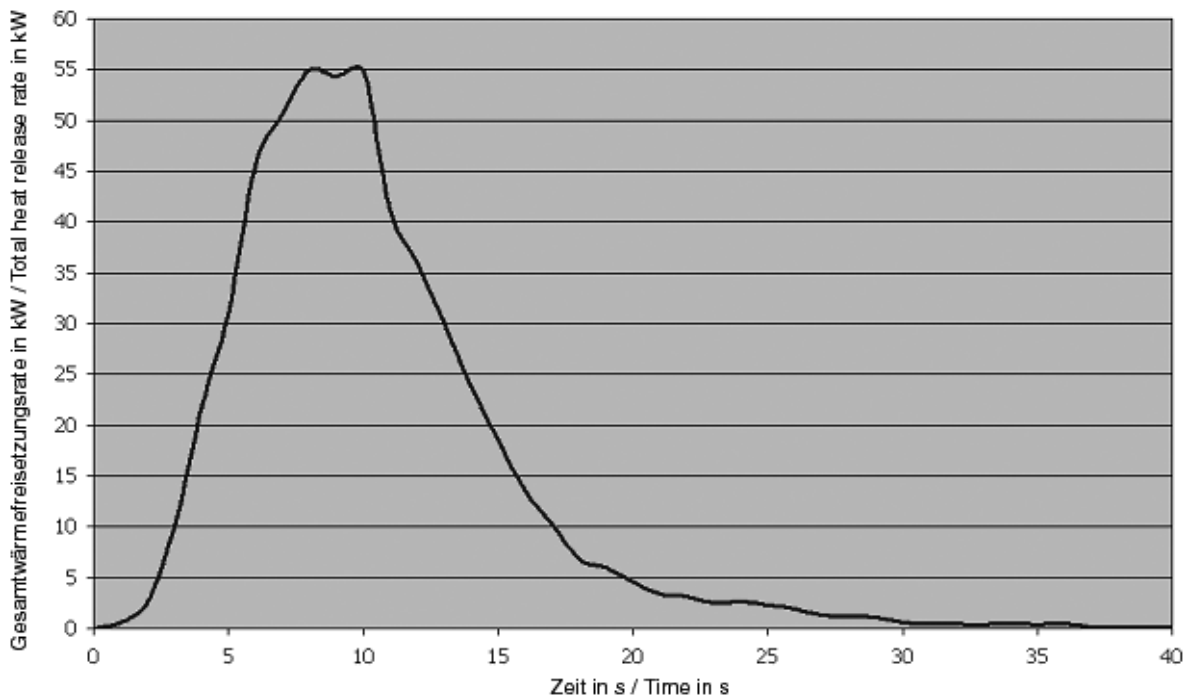


Bild 9. Gesamt-Wärmefreisetzungsrate – Drucker [8]

Figure 9. Total heat release rate (HRR) – Printer [8]

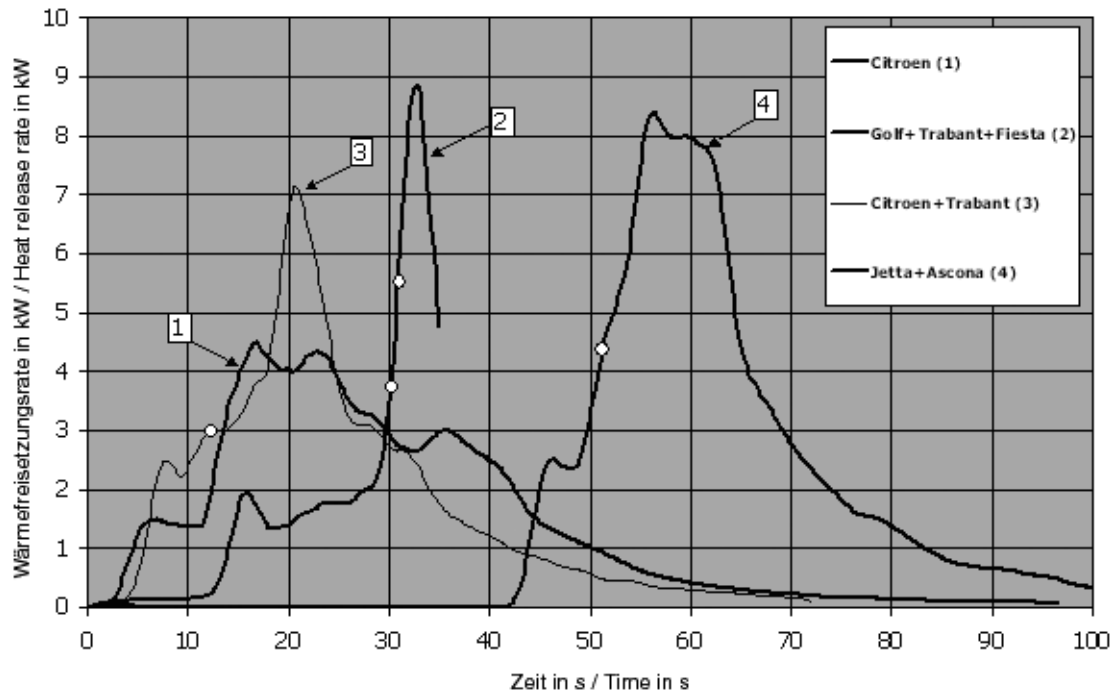


Bild 10. Gesamt-Wärmefreisetzungsrate von unterschiedlichen Pkw-Bränden [9]

Figure 10. Total heat release rates of various passenger cars on fire) [9]

4 Überprüfung der Wirksamkeit von Gesamtsystemen zur Rauchableitung

4.1 Allgemeines

Gesamtsysteme zur Rauchableitung können nach Fertigstellung einer Funktionsüberprüfung unterzogen werden. Da eine praktische Überprüfung der Wirksamkeit des Entrauchungssystems unter realistischen Brandbedingungen im Allgemeinen ausscheidet, können nur modellhafte Versuche verwendet werden, um realitätsnahe Ergebnisse zu erhalten.

Zur praktischen Überprüfung der Rauchgasströmung und des Rauchabzuges in Gebäuden können erwärmte Luft oder auch offene Poolbrände mit flüssigen Brennstoffen in Brandwannen eingesetzt werden. Zur Visualisierung der Rauchgasströmung werden der Auftriebsströmung meist Aerosole aus Nebelfluoriden oberhalb der Flammenzone beigemischt.

Die Anordnung und Dimensionierung der Brandsimulationsquelle(n) ist so vorzunehmen, dass eine hinreichende Annäherung an den Realbrandfall bei gleichzeitigem Schutz von anwesenden Personen und untersuchtem Objekt vor unzulässigen Versuchseinwirkungen erreicht wird.

Zulässige Oberflächentemperaturen während eines Brandversuchs werden insbesondere durch die im Gebäude vorhandenen Materialien und Einrichtungen (z.B. Sprinkler) bestimmt. Die Wärmeleistung ist dementsprechend zu begrenzen.

4 Verification of the effectiveness of entire systems for smoke control

4.1 General

Entire systems for smoke control may be subjected to a functional test after completion. A practical real-scale test for the effectiveness of a smoke control system is not usually an option. Only model tests can therefore be used to obtain near-realistic results.

A practical verification of the smoke-gas flow and the smoke exhaust in buildings can be achieved using either heated air or open pool fires of liquid fuels in trays. The smoke-gas flow is mostly visualised by adding aerosols of fog fluids to the thermal upward jet above the flame zone.

The fire simulation source(s) shall be so positioned and dimensioned that a real fire is sufficiently approximated while ensuring that any persons present and the object under investigation are protected from inadmissible effects of the test.

The surface temperatures permissible during a fire test are in particular determined by the materials and equipment (such as sprinklers) existing in the building. The heat output must be limited accordingly.

Zu beachtende Randbedingungen

Zur Durchführung derartiger Simulationsversuche sind folgende Randbedingungen einzuhalten:

- Der Aerosolnebel darf nicht zu nah über der Heizquelle oder Brandwanne zugeführt werden, um ein Zersetzen des Nebels zu verhindern. Zur Anwendung kommen sollten nur Nebelfluidе, die als „langanhaltende“ Fluide erhältlich sind. Fluide, die sich rasch auflösen, können das Ergebnis verfälschen.
- Alle notwendigen Einrichtungen zur Entrauchungsanlage, z.B. NRA bzw. MRA, Zuluftöffnungen, Rauchschürzen, Meldesysteme, Ersatzstromanlagen, Brandfrüherkennung, Türsteuerungen etc., müssen dem endgültigen Gebrauchszustand entsprechend funktionsbereit sein und sind in die Überprüfung mit einzubeziehen.
- Nachströmöffnungen müssen wie geplant (Anordnung, Einzel- und Gesamtfläche) vorhanden sein und entsprechend dem Entrauchungskonzept betätigt werden.
- Details im Raum, die die Strömung beeinflussen, müssen vorhanden sein oder sind strömungstechnisch ähnlich nachzubilden (z.B. Einrichtungen, Sonnenschutz).
- Raumluftechnische Anlagen müssen vorhanden und entsprechend dem Entrauchungskonzept betrieben sein.
- Die Raumluftemperaturen zum Versuchszeitpunkt sollten den Raumluftemperaturen zum Zeitpunkt der Nutzung entsprechen.
- Die Gebäudehülle muss vollständig vorhanden und funktionsfähig sein.
- Zur Quantifizierung der Rauchgasausbreitung können dem Plume geeignete Messgase (Tracergase) beigemischt werden. Tracergase (z.B. N_2O , SF_6) dienen der örtlichen Konzentrationsbestimmung im Raum.

Anforderungen an die Dokumentation

Es ist eine umfassende Dokumentation aufzustellen, die folgende Angaben enthalten muss:

- detaillierte Angaben über die Einhaltung der zuvor genannten Randbedingungen
- Beschreibung der verwendeten Brandsimulationsquelle und der Nebelfluidzugabe
- Anordnung der Brandorte
- Lage des virtuellen Ursprungs der Versuchseinrichtung und Höhenkoordinate zu Beginn des Ähnlichkeitsbereiches des Brandszenarios
- Beschreibung der außenklimatischen Verhältnisse (Außenlufttemperatur/Windverhältnisse)

Boundary conditions to be observed

Where such simulation tests are to be conducted, the following boundary conditions shall be observed:

- The aerosol fog must not be added at too short a distance above the heat source or burning tray in order to avoid decomposition of the fog. Only such fog fluids should be used as are available as “long-lasting” fluids. Fluids which decompose easily may lead to false results.
- All equipment required for the smoke control system such as natural or powered smoke exhaust system, air inlets, smoke curtains, alarm systems, emergency power supply systems, early fire detection systems, door controls, etc., shall be functional as specified for the final operational condition and must be included in the verification.
- Openings for air inlet must be as specified (positioning, individual and total areas) and shall be operated as required by the smoke control concept.
- Any details in the room, which affect the flow (such as fixtures and fittings, sunshades), must either be present or shall be modelled in accordance with the similarity laws of fluid mechanics.
- Ventilating and air-conditioning systems shall be present and must be functional as required by the smoke control concept.
- Room air temperatures at the time of the test should equal the room air temperatures during use.
- The building envelope shall be complete and functional.
- The smoke-gas spread can be investigated quantitatively by mixing tracer gases (such as N_2O , SF_6) into the plume. Tracer gases serve to determine local concentrations in the room.

Requirements to be met by the documentation

A comprehensive documentation shall be drafted, containing the following information:

- detailed information on the observance of the boundary conditions listed above
- description of the fire simulation source in use and the fog fluid added
- positions of seats of fire
- position of the virtual origin of the test set-up and height coordinate at the start of the similarity range of the fire scenario
- description of outdoor climatic conditions (outdoor air temperature/wind conditions)

- Beschreibung der Funktionskette
- Foto oder videotechnische Dokumentation der Rauchsichtgrenze
- gegebenenfalls Messprotokolle/Diagramme
- Festhalten des zeitlichen Verlaufes der Versuchsdurchführung
- Beschreibung sonstiger Randbedingungen
- Bewertung der Versuchsergebnisse

4.2 Verwendung von erwärmter Luft als Brandsimulationsquelle

Bei der Verwendung von erwärmter Luft als Brandsimulationsquelle wird ein aufgeheizter Luftstrom, dem zur Visualisierung ein Aerosol beigemischt wird, verwendet. Die Ausbreitung dieses Prüfrauchgases erfolgt im Gebäude ähnlich der Ausbreitung von realem Rauchgas. Die Feststellung der Grenzen zwischen aerosolhaltiger (Rauchsicht) und aerosolarmer Luft (raucharme Schicht) erfolgt visuell.

Mit dieser Methode können sowohl niedrig- als auch hochenergetische Brände simuliert werden. Bei der Nachbildung hochenergetischer Brände sind die Übertragungsfunktionen aus der Ähnlichkeitslehre der Strömungsmechanik anzuwenden.

Folgende Randbedingungen sind zu beachten:

- Der Auftriebstrahl muss sich ähnlich einem durch Konvektion entstehenden Luftstrahl verhalten, das heißt, er muss voll ausgebildet turbulent und nicht durch zusätzlichen Strömungsimpuls beeinflusst sein. Auch ist darauf zu achten, dass die Turbulenzstruktur im Strahl nicht beeinflusst wird.
- In der Brandentstehungsphase kann der Fall eintreten, dass die Rauchgase allein durch den thermischen Auftrieb nicht oder nur teilweise bis zur Decke aufsteigen. Dies ist immer dann der Fall, wenn die im oberen Hallenteil vorhandene Luftschicht höhere Temperaturen aufweist als der Auftriebstrahl.

Liegt zum Zeitpunkt der Funktionsüberprüfung eine Temperaturschichtung (wie sie z.B. in Atrien mit großem Oberlichtanteil oder Eissporthallen vorkommen) vor, kann der Fall eintreten, dass das Rauchgas nicht die obere Raumbegrenzung erreicht.

In Folge der mit der Höhe ansteigenden Umgebungstemperatur verringern sich die Auftriebskräfte des Auftriebstrahles. Dies kann dazu führen, dass die Auftriebskraft vollständig egalisiert wird. Der Thermikstrom zerfällt dann und verteilt sich mit der vorhandenen Raumluftströmung.

Die Höhenkoordinate z , ab der die Temperaturdifferenz zwischen Auftriebstrahl und Umgebung aufge-

- description of functional chain
- photographic or video documentation of the smoke-layer boundary
- any measurement reports/diagrams
- record of the time history of the test
- description of further boundary conditions
- evaluation of test results

4.2 Use of heated air as a fire simulation source

When heated air is used as a fire simulation source, an aerosol is added to the heated airflow for visualisation purposes. The spreading of this test smoke gas in the building is similar to the spreading of real smoke gas. The boundaries between aerosol-carrying air (smoke layer) and air that carries little aerosol (smokeless layer) are established visually.

This method allows to simulate both low-energy and high-energy fires. When high-energy fires are simulated, the transfer functions from fluid-mechanical similarity laws must be applied.

The following boundary conditions shall be observed:

- The behaviour of the upward jet must be similar to that of a convection-driven air jet, i.e. its turbulence must be fully evolved, and it must remain unaffected by additional flow momentum. Also, care must be taken that the turbulence structure in the jet will not be influenced.
- During the initial stage, smoke gases may not be driven sufficiently by thermal buoyancy to rise completely to the ceiling, or to rise at all. This will always be the case if the temperature of the air layer in the upper part of the space is higher than that of the thermal jet.

The smoke gas may not reach the upper boundary of the room if temperature layers exist at the time of the functional test (as is the case, e.g., in atria with a large proportion of skylights or in ice-skating halls).

As ambient temperatures increase with increasing height, the buoyant forces driving the thermal jet decrease. This may lead to a complete balancing of the buoyant force. The thermal jet then decomposes, blending with the airflow pattern prevailing in the room.

The height coordinate, z , at which the temperature difference between the thermal jet and the envi-

hoben ist, wird auch Equilibriumshöhe z_E genannt. Dies lässt sich mit nachstehender Gleichung (18) abschätzen.

Bei annähernd linearem Temperaturanstieg über die Höhe lässt sich z_E nach folgender Beziehung abschätzen:

$$z_E = 0,74 \cdot \dot{Q}_{\text{konv}}^{0,25} \cdot \left(\frac{\Delta T}{\Delta z} \right)^{-0,375} \quad (18)$$

Dabei ist

z_E Equilibriumshöhe in m

$\dot{Q}_{\text{konv}}$ konvektive Wärmefreisetzungsrate in kW

Δz Höhendifferenz zwischen Brandfläche und Unterkante Decke (Aufstiegshöhe) in m

ΔT Temperaturdifferenz zwischen boden- und deckennahen Bereich in K

Anforderung an die Brandsimulationseinrichtung

- Der Luftstrom muss einstellbar und messbar sein.
- Die Brennerleistung muss einstellbar und messbar sein.
- Der Gesamtvolumenstrom des Aerosolnebels, der zur Visualisierung der Plume beigemischt wird, sollte im Bereich zwischen 250 m³/h und 350 m³/h liegen. Dies ist in der Regel nur mit mehreren Nebelgeneratoren zu realisieren. Die einzelnen Volumenströme (Gemisch aus Aerosol und Luft) werden jeweils in einem Rohr gemessen.
- Der Strahlimpuls am Luftaustritt muss durch entsprechende Maßnahmen abgebaut werden, sodass sich ein möglichst freier Auftriebstrahl einstellen kann.
- Die Lage des virtuellen Ursprungs sollte bekannt sein.

4.2.1 Empfehlungen zur Wahl der Parameter für die Versuchsdurchführung, insbesondere zur Simulation der Brandentstehungsphase

Um eine gewisse Bandbreite bei den Versuchen darstellen zu können, werden drei verschiedene Versuchsreihen empfohlen, von denen **mindestens eine auszuwählen ist**.

• Versuchsreihe 1

konvektive Wärmefreisetzungsrate	50 kW
Konvektionsstrom	0,5 m ³ /s
mittlere Ausströmtemperatur aus der Versuchseinrichtung	83 °C

• Versuchsreihe 2

konvektive Wärmefreisetzungsrate	100 kW
Konvektionsstrom	1 m ³ /s
mittlere Ausströmtemperatur aus der Versuchseinrichtung	83 °C

ronment is neutralised, is called the equilibrium height, z_E . An estimate for this height may be found using Equation (18) below.

If the temperature rises approximately linearly with increasing height, z_E can be estimated as follows:

$$z_E = 0,74 \cdot \dot{Q}_{\text{konv}}^{0,25} \cdot \left(\frac{\Delta T}{\Delta z} \right)^{-0,375} \quad (18)$$

where

z_E equilibrium height, in m

$\dot{Q}_{\text{konv}}$ convective heat release rate, in kW

Δz difference in height between the area on fire and the lower border of the ceiling (climb), in m

ΔT temperature difference between the regions close to the floor and close to the ceiling, in K

Requirements to be met by a fire simulation set-up

- The airflow shall be adjustable and measurable.
- The burner output shall be adjustable and measurable.
- The total air volume flow of the aerosol fog added to the plume for visualisation purposes should lie in the range between 250 m³/h and 350 m³/h. As a rule, this will require the use of several fog generators. The individual volume flows (mixture of aerosol and air) are measured each in a tube each.
- The flow momentum at the jet outlet must be reduced by appropriate means, allowing as free as possible an upward jet to evolve.
- The position of the virtual origin should be known.

4.2.1 Recommendations concerning the choice of parameters for test performance, particularly for simulating the initial stage

Three different series of tests, **at least one of which must be selected**, are recommended in order to allow representing a certain bandwidth.

• Series 1

convective heat release rate	50 kW
convective air volume flow	0,5 m ³ /s
mean temperature at outlet of test set-up	83 °C

• Series 2

convective heat release rate	100 kW
convective air volume flow	1 m ³ /s
mean temperature at outlet of test set-up	83 °C

• Versuchsreihe 3

konvektive Wärmefreisetzungsrate	150 kW
Konvektionsstrom	1,5 m ³ /s
mittlere Ausströmtemperatur aus der Versuchseinrichtung	83 °C

Die Versuchsdauer sollte mindestens den Zeitraum bis zur manuellen Brandbekämpfung durch die Feuerwehr (t_5) gemäß der maßgebenden Brandverlaufskurve umfassen, mindestens jedoch zehn Minuten.

Erkenntnisse, die aus qualitativen Versuchen u.a. gewonnen werden können:

- Qualitative Beurteilung der Rauchgasströmung im Gebäude (Durch die Kenntnisse nachgewiesener funktionaler Zusammenhänge lassen sich Veränderungen gegenüber dem zu erwartenden Brandverlauf abschätzen.)
- Erkennen verrauchter (Rauchschicht) und nicht verrauchter (raucharme Schicht) Bereiche im Gebäude
- Qualitative Beurteilung der Wirkungsweise des Entrauchungssystems
- Vergleiche mit vorausgerechneten Kenngrößen des Entrauchungssystems
- Abschätzen der zeitlichen Abläufe der Rauchgas-schichtung

Nicht bewertbar sind aus diesen qualitativen Versuchen u.a.:

- Temperaturverteilung im Raum
- Oberflächentemperaturen an Bauteilen
- Stoffkonzentrationen
- Beurteilungen zur Sichtweitenbeschränkung
- Auslösezeitpunkte von automatischen Löschanlagen
- Auslösezeitpunkte von Wärmemeldern
- äußere Windeinflüsse

4.2.2 Quantitative Überprüfungen

Werden solche Funktionstests auch zur quantitativen Überprüfung der Wirksamkeit von Rauchabzugsanlagen – z.B. zur Beurteilung bei ausgebildeten Bränden – verwendet, sind entsprechende Umrechnungen auf Grund von Übertragungsfunktionen aus der Ähnlichkeitslehre der Strömungsmechanik vorzunehmen.

Zu vergleichen ist der Rauchgasmassenstrom am Beginn des Ähnlichkeitsbereiches im Auftriebstrahl und der von der Brandsimulationseinrichtung eingetragene Luftmassenstrom.

• Series 3

convective heat release rate	150 kW
convective air volume flow	1,5 m ³ /s
mean temperature at outlet of test set-up	83 °C

The duration of the test should at least include the time up to manual firefighting by the fire brigade (t_5) as obtained from the relevant fire curve; the minimum duration, however, is ten minutes.

Among other things, the following information can be obtained from qualitative tests:

- Qualitative evaluation of the smoke-gas flow in the building (The knowledge of proven functional relationships allows to estimate deviations from the expected fire development.)
- Identification of smoke-filled (smoke layer) and smokeless (smokeless layer) regions in the building
- Qualitative evaluation of the effect of the smoke control system
- Comparison with predicted (calculated) characteristics of the smoke control system
- Estimation of the development over time of the smoke-layer formation

Among other things, the following cannot be derived from these qualitative tests:

- Temperature distribution in the room
- Surface temperatures of building elements
- Contaminant concentrations
- Evaluations of limited visibility
- Activation times of automatic fire-extinguishing systems
- Activation times of heat detectors
- Extraneous influences of wind

4.2.2 Quantitative verification

Where such functional tests are also used for quantitative verification of the effectiveness of smoke control systems – e.g. for evaluation of fully developed fires – appropriate conversions must be made on the basis of transfer functions from fluid-mechanical similarity laws.

Compare the smoke-gas mass flow in the thermal jet at the beginning of the similarity range to the air mass flow induced by the fire simulation set-up.

Der Luftmassenstrom am Ende des Strahlformierungsbereiches berechnet sich entsprechend der Gleichung von *Thomas* und *Hinkley*:

$$\dot{m}_{PI}(z) = 0,19 \cdot \sqrt{4 \cdot A \cdot \pi} \cdot z^{1,5} \quad (19)$$

mit $z = l_F$

Dabei beträgt die Höhe des Strahlformierungsbereiches

$$l_F = 2 \cdot \sqrt{A} \quad (20)$$

Dabei ist

$\dot{m}_{PI}(z)$ Rauchgasmassenstrom (Plume) in kg/s

A Brandfläche in m^2

l_F Länge des Strahlformierungsbereiches in m

Bei Differenzen in der Höhe zwischen dem Beginn des Ähnlichkeitsbereiches $z \neq l_F$ und der Höhe des Raucheintrages z im Versuch ist die Umrechnung nach Gleichung (21) und Gleichung (22) vorzunehmen.

$$\dot{m}_0(z) = \dot{m}_0(l_F) \cdot \left(\frac{l_F - z_{0,0}}{z - z_{0,0}} \right)^{-1,667} \quad (21)$$

$$z_{0,0} = -1,02 \cdot D + 0,083 \cdot \dot{Q}_0^{0,4} \quad (22)$$

Dabei ist

$z_{0,0}$ virtueller Ursprung in m

D Branddurchmesser in m, $D = \sqrt{4 \cdot A / \pi}$

$\dot{Q}_0$ Gesamt-Wärmefreisetzungsrate in kW

Aus der Ähnlichkeitsmechanik ergibt sich, dass ähnliche Strömungsprozesse dann vorhanden sind, wenn die Ähnlichkeitskenngrößen Archimedes (Ar) und Euler (Eu) im Modell (Index M) und dem der Bemessung zu Grunde gelegten Brandverlauf (Index O) gleich groß sind. Inhaltliche Erläuterungen finden sich in VDI 6019 Blatt 2.

$$Ar = \frac{g \cdot l \cdot \Delta T}{T_\infty \cdot w^2} \quad (23)$$

$$Eu = \frac{\Delta p}{\rho \cdot w^2} \quad (24)$$

Dabei ist

g Erdbeschleunigung in m/s^2

l charakteristische Länge in m

T_∞ Umgebungstemperatur in K

ΔT Temperaturdifferenz in K

w Strömungsgeschwindigkeit in m/s,

Δp Druckdifferenz in Pa

ρ Gasdichte in kg/m^3

The air mass flow at the end of the jet-forming region is calculated using the equation of *Thomas* and *Hinkley*:

$$\dot{m}_{PI}(z) = 0,19 \cdot \sqrt{4 \cdot A \cdot \pi} \cdot z^{1,5} \quad (19)$$

where $z = l_F$

the height of the jet-forming region being

$$l_F = 2 \cdot \sqrt{A} \quad (20)$$

where

$\dot{m}_{PI}(z)$ smoke-gas mass flow (plume), in kg/s

A area on fire, in m^2

l_F length of jet-forming region, in m

In case of differences between the beginning of the similarity range, $z \neq l_F$, and the height, z , at which the smoke is added in the test, the conversion shall be made in accordance with Equation (21) and Equation (22).

$$\dot{m}_0(z) = \dot{m}_0(l_F) \cdot \left(\frac{l_F - z_{0,0}}{z - z_{0,0}} \right)^{-1,667} \quad (21)$$

$$z_{0,0} = -1,02 \cdot D + 0,083 \cdot \dot{Q}_0^{0,4} \quad (22)$$

where

$z_{0,0}$ virtual origin, in m

D fire diameter, in m, $D = \sqrt{4 \cdot A / \pi}$

$\dot{Q}_0$ total heat release rate, in kW

It follows from similarity mechanics that the flow processes are similar if the similarity quantities Archimedes (Ar) and Euler (Eu) are identical for the model (subscript M) and the fire development used as a basis for dimensioning (subscript O). Explanations will be found in VDI 6019 Part 2.

$$Ar = \frac{g \cdot l \cdot \Delta T}{T_\infty \cdot w^2} \quad (23)$$

$$Eu = \frac{\Delta p}{\rho \cdot w^2} \quad (24)$$

where

g gravitational acceleration, in m/s^2

l characteristic length, in m

T_∞ ambient temperature, in K

ΔT temperature difference, in K

w flow velocity, in m/s

Δp pressure difference, in Pa

ρ gas density, in kg/m^3

Ausgedrückt in Ähnlichkeitsfaktoren z.B.

$$f_{\Delta T} = \frac{\Delta T_M}{\Delta T_0} \quad (25)$$

$$\frac{f_g \cdot f_l \cdot f_{\Delta g}}{f_{T_\infty} \cdot f_w^2} = 1 \quad (26)$$

$$\frac{f_{\Delta p}}{f_p \cdot f_w^2} = 1 \quad (27)$$

Werden die Versuche im Originalraum durchgeführt, so wird $f_l = 1$.

Da auch f_g und $f_{T_\infty} = 1$ sind, folgt:

$$f_{\Delta g} = f_w^2 \quad (28)$$

Wenn $f_l = 1$ ist, wird $Eu = \text{const.}$

Aus $f_{\dot{V}} = f_w \cdot f_l^2$ folgt:

$$f_{\dot{V}} = f_w \quad (29)$$

Aus der Beziehungsgleichung für den Wärmestrom ergibt sich

$$f_{\dot{Q}} = f_{\dot{V}} \cdot f_\rho \cdot f_{\Delta g} \quad (30)$$

Wird in Gleichung (31) $\rho = \rho_\infty$ eingesetzt, wird $f_\rho = 1$ und aus Gleichung (31) ergibt sich

$$f_{\dot{Q}} = f_w \cdot f_{\Delta g} \quad (31)$$

Unter Berücksichtigung einer vorgegebenen Wärmefreisetzungsrates entstehen für f_w und $f_{\Delta g}$ zwei Beziehungsgleichungen:

$$f_{\dot{Q}} = f_w \cdot f_{\Delta g} \quad (32)$$

$$f_w^2 = f_{\Delta g} \quad (33)$$

Mit diesen Umrechnungsfaktoren lassen sich die erforderlichen Volumenströme und Temperaturen an der Austrittsstelle der Brandsimulationseinrichtung sowie die Volumenströme bei maschinellen Rauchabzügen und die Zeitabläufe bestimmen. Die Anwendung obiger Kennwerte wird in Beispielen verdeutlicht, die im Anhang dieser Richtlinie enthalten sind.

4.2.2.1 Quantitative Überprüfung mit realen Wärmefreisetzungsrates

In den Fällen, in denen reale Brandgeschehen von der Brandentstehung bis zu hohen Wärmefreisetzungen zur Überprüfung der Wirksamkeit von Gesamtsystemen zur Rauchableitung erwünscht sind, können Systeme gemäß Bild 12 eingesetzt werden.

Expressed in terms of similarity factors, e.g.,

$$f_{\Delta T} = \frac{\Delta T_M}{\Delta T_0} \quad (25)$$

$$\frac{f_g \cdot f_l \cdot f_{\Delta g}}{f_{T_\infty} \cdot f_w^2} = 1 \quad (26)$$

$$\frac{f_{\Delta p}}{f_p \cdot f_w^2} = 1 \quad (27)$$

$f_l = 1$ if the tests are performed in the original room.

From the fact that $f_g = 1$ and $f_{T_\infty} = 1$ it follows that

$$f_{\Delta g} = f_w^2 \quad (28)$$

If $f_l = 1$, $Eu = \text{const.}$

From $f_{\dot{V}} = f_w \cdot f_l^2$ it follows that

$$f_{\dot{V}} = f_w \quad (29)$$

From the functional relation for the heat flow results

$$f_{\dot{Q}} = f_{\dot{V}} \cdot f_\rho \cdot f_{\Delta g} \quad (30)$$

Inserting $\rho = \rho_\infty$ in Equation (31) will lead to $f_\rho = 1$, and it will result from Equation (31) that

$$f_{\dot{Q}} = f_w \cdot f_{\Delta g} \quad (31)$$

Taking into account a previously specified heat release rate, two functional relationships result for f_w and $f_{\Delta g}$:

$$f_{\dot{Q}} = f_w \cdot f_{\Delta g} \quad (32)$$

$$f_w^2 = f_{\Delta g} \quad (33)$$

These conversion factors allow to determine the required volume flows and temperatures at the outlet of the fire simulation set-up as well as the volume flows for powered smoke exhaust systems and the time histories. The application of the above characteristics is explained by means of examples given in the annex of this guideline.

4.2.2.1 Quantitative verification with real heat release rates

In those cases where real fire scenarios from initial fire up to high heat release rates are desirable for verifying the effectiveness of entire systems for smoke exhaust, systems as shown in Figure 12 can be used.

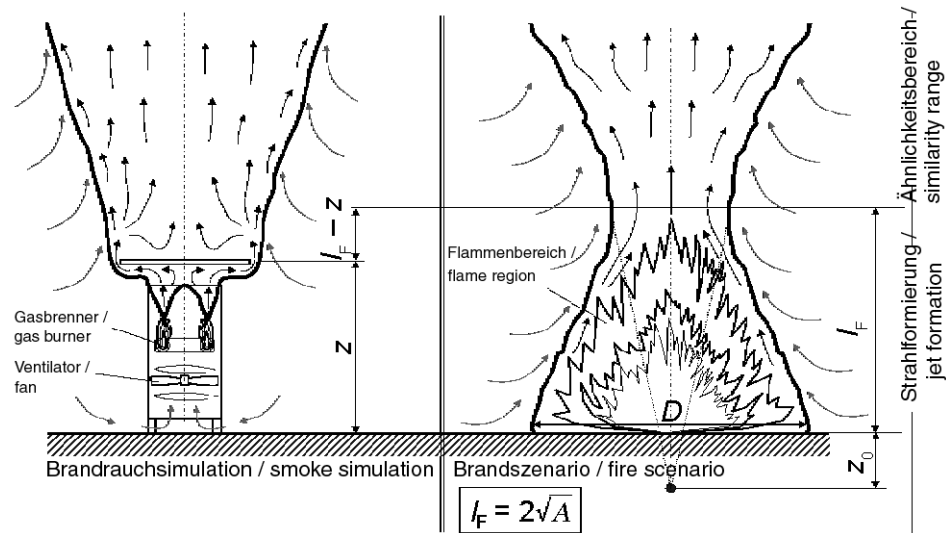


Bild 11. Brandrauchsimulation/Brandszenario

Figure 11. Smoke simulation/fire scenario

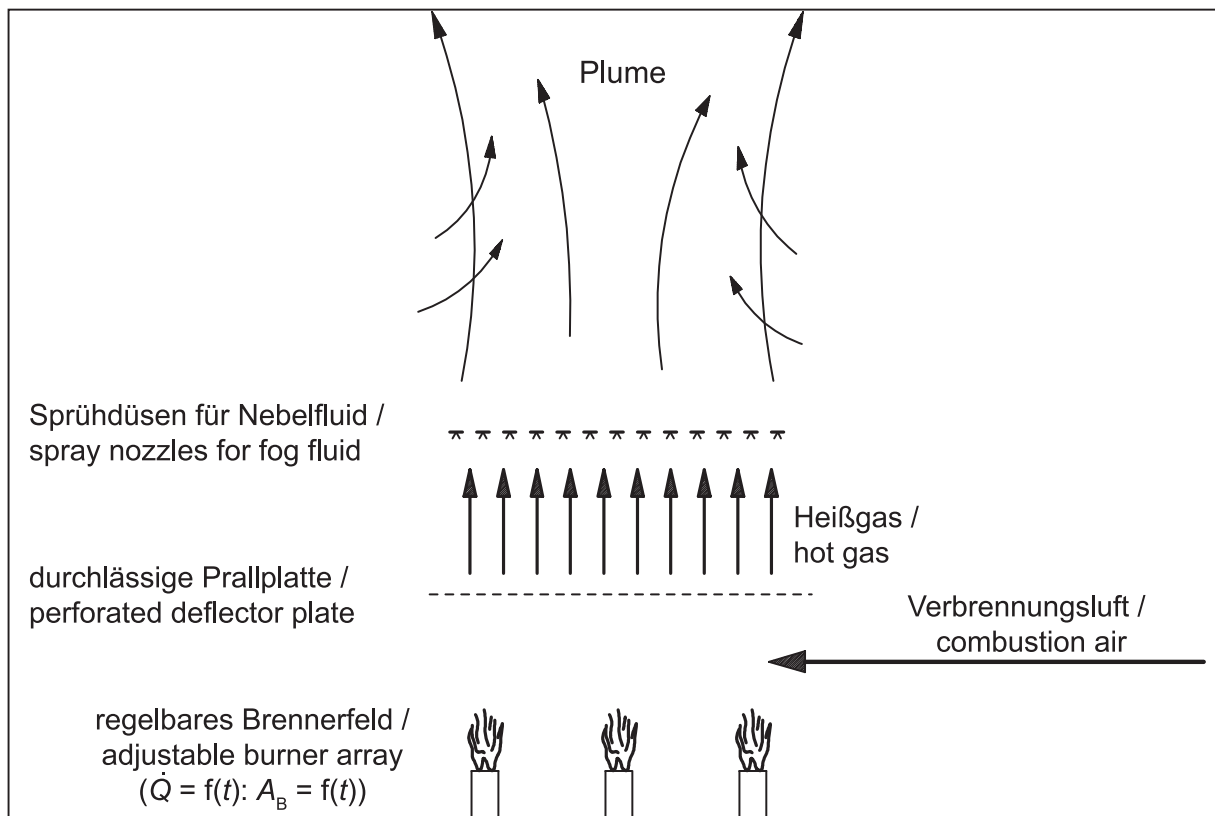


Bild 12. Brennerfeld mit Prallplatte und seitlichen Abströmflächen (Brandsimulation)

Figure 12. Burner array with deflector plate for lateral distribution (fire simulation)

Zur Anwendung gelangen eine größere Anzahl von Flüssigkeitsbrennern, die in einem regelmäßigen Abstand voneinander angeordnet sind. Bild 13 zeigt eine mögliche Brenneranordnung zur Simulation einer Wärmefreisetzungsrate entsprechend einem vorgegebenen $\dot{Q}(t)$ -Verlauf.

Several regularly spaced liquid-fuel burners are used. Figure 13 shows one possible burner arrangement for simulating a heat release rate specified by a given $\dot{Q}(t)$ curve.

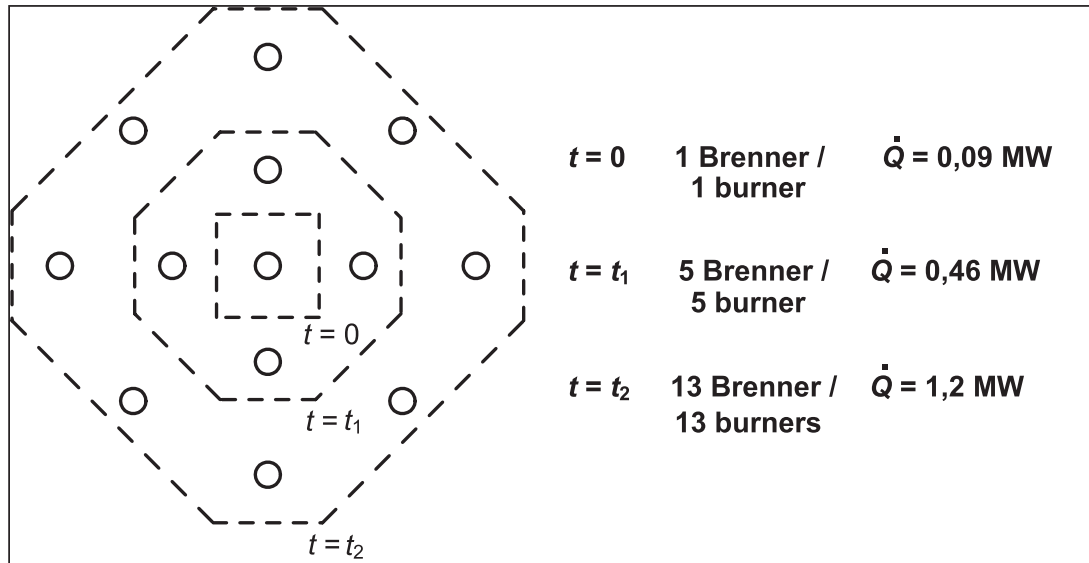


Bild 13. Brenneranordnung zur Simulation einer Wärmefreisetzungsrate entsprechend dem $\dot{Q}(t)$ -Verlauf eines realen Brandes

Figure 13. Burner arrangement for simulating a heat release rate corresponding to the $\dot{Q}(t)$ curve of a real fire

Der ohne Regelung der einzelnen Brenner erreichte zeitliche Verlauf ergibt eine Stufenfunktion. Durch zusätzliches Regeln der einzelnen Brenner kann auch eine nahezu stufenlose Funktion eines $\dot{Q}(t)$ -Verlaufes nachgebildet werden.

Um das Durchschlagen der Brennerflammen in größere Höhen zu vermeiden und eine auf die Brandfläche bezogene gleichmäßige Wärmefreisetzungsrate sicherzustellen, ist über dem Brennfeld eine Prallplatte mit seitlichen Abströmflächen eingesetzt (Bild 12).

Achtung: Für verschiedene Simulationseinrichtungen besteht Patentschutz.

Zur Sichtbarmachung wird dem Plume ein Nebelfluid beigemischt; die Beimischung muss in größerer Höhe über dem Brandherd erfolgen, um ein Verdampfen des Nebelfluids zu verhindern.

Dieses Verfahren, das sowohl die Simulation einer erhöhten Wärmefreisetzungsrate als auch eine Vergrößerung der Brandfläche mit der Zeit zulässt, ist insbesondere dort einsetzbar, wo hohe Wärmefreisetzungsrate keine Beschädigungen der Einrichtungen hervorrufen (z.B. Messehallen, Straßentunnel, Warnanlagen etc.).

In dem Beispiel in Bild 13 ist die Wärmefreisetzungsrate bis zu 1,2 MW gezeigt.

Aus derartigen Untersuchungen lassen sich auch über eine reine Funktionsprüfung hinaus Temperaturverteilungen im Raum sowie Oberflächentemperaturen an Bauteilen bestimmen.

The time curve achieved without adjusting the individual burners yields a step function. By additional adjustment of the individual burners, it is possible to simulate an almost stepless function of a $\dot{Q}(t)$ curve.

In order to prevent the burner flames from spreading to greater heights and to ensure uniformity of the heat release rate over the area on fire, a deflector plate for lateral distribution is installed above the burner array (Figure 12).

Attention: For different simulation mechanisms patent protection exists.

A fog fluid is added to the plume for visualisation purposes; it shall be released at a greater height above the seat of fire in order to avoid evaporation of the fog fluid.

This method, which allows the simulation of increased heat release rates as well as an increase of the area on fire over time, can particularly be used where high heat release rates will not cause damage to the interior (such as in trade-fair halls, road tunnels, alarm systems, etc.).

The example in Figure 13 shows the heat release rate up to 1,2 MW.

Beyond mere functional tests, such investigations also allow to determine temperature distributions in the room as well as surface temperatures of building elements.

4.3 Verwendung von Brandwannen als Brand-simulationsquellen

4.3.1 Anwendungsbereich, Aufbau und Eigenschaften

Die Verwendung von Brandwannen als Brandsimulationsquellen ermöglicht im Rauchversuch die Freisetzung einer relativ hohen, zeitlich konstanten Wärmeleistung je Wärmequelle und eignet sich insbesondere zur Überprüfung des Rauchabzugs in hohen Gebäuden sowie in Fällen, in denen die auftriebsbedingte Eigendynamik der Rauchausbreitung eine kritische Größe für die Wirksamkeit des Rauchabzugs darstellt.

Zur qualitativen Beurteilung der Rauchgasströmung und Rauchsichtung im Untersuchungsobjekt wird die Heißgasströmung durch Zugabe von Nebel visualisiert. Zur quantitativen Beurteilung ist die Messung der örtlichen Temperaturverteilung im Gebäude geeignet, die durch die Messung von Gaskonzentrationen (z.B. der Kohlendioxidkonzentration) sinnvoll ergänzt werden kann.

Anmerkung: Eine quantitative Beurteilung des Entrauchungssystems ist hierbei nur für die untersuchte Wärmefreisetzungsrate direkt möglich. Für andere Bewertungen ist, unter Berücksichtigung der Ähnlichkeitsgesetze, eine Umrechnung nach Abschnitt 4.2.2 durchzuführen.

Als Brandsimulationsquellen mit definierter Brandfläche eignen sich Brandwannen aus Metall, in denen ein flüssiger Brennstoff verbrannt wird. Durch Aufstellung der Brandwannen in wassergefüllten Außenwannen wird eine gleichmäßige Wärmefreisetzungsrate über die gesamte Abbranddauer erreicht. Als Brennstoff eignet sich z.B. vergälltes Ethanol (96 Vol.-%), das sehr rußarm verbrennt.

In Tabelle 10 sind Brandwannengrößen und die bei der Verbrennung von Ethanol damit erzielbare Gesamtwärmefreisetzungsrate beschrieben.

Mit der empfohlenen Brennstoffmenge wird über mindestens zehn Minuten eine stationäre Brandphase (konstante Wärmefreisetzungsrate) erreicht. Die Wassermenge in den äußeren Wasserwannen ist so zu wählen, dass die leeren Brandwannen nicht aufschwimmen.

Im Bereich des Feuerplumes (bis zur Höhe der intermittierenden Flammen) kann die Plumecharakteristik für die beschriebenen Wärmequellen nach AS 4391-1999 mit Hilfe der von *Thomas* und *Hinkley* angegebenen Plumeformel angegeben werden. Im flammenfernen Bereich liefert z.B. die Plumeformel von *Heskestad* [3] zutreffende Ergebnisse.

Effekte, die zu einer Veränderung der Plumecharakteristik führen (z.B. erhöhte Lufteinmischung in den Heißgasplume durch überlagerte Raumströmungen),

4.3 Use of burning trays as fire simulation sources

4.3.1 Range of application, set-up and characteristics

The use of burning trays as fire simulation sources in smoke tests allows the release of a relatively high, constant heat output per heat source and is particularly suitable for verifying the smoke exhaust in tall buildings as well as in cases where the buoyancy-driven momentum of smoke spread is a critical quantity with respect to the effectiveness of the smoke control system.

The hot-gas flow is visualised by means of added fog in order to qualitatively evaluate the smoke-gas flow and smoke-layer formation in the object under investigation. The measurement of the local temperature distribution in the building is suitable for a quantitative evaluation; measurements of gas concentrations (such as the concentration of carbon dioxide) are useful supplements to this method.

Note: Here, for the evaluated heat release rate a quantitative evaluation is only directly possible. Other rating must be converted according to Section 4.2.2, taking into account the similarity laws.

Metal burning trays in which a liquid fuel is burned are suitable as fire simulation sources with a defined area on fire. Putting the burning tray into a water-filled larger tray will ensure a uniform heat release rate over the total burning time. A suitable fuel is, e.g., denatured ethanol (96 % vol.), which burns producing hardly any soot.

Table 10 lists the sizes of burning trays and the total heat release rates achievable when burning ethanol in them.

The recommended quantity of fuel will yield a stationary fire stage (constant heat release rate) over at least ten minutes. The quantity of water in the outer water trays shall be so chosen that the empty burning trays do not float.

As for the fire-plume region (up to the height of intermittent flames), the plume characteristic can be given for the described heat sources by using the plume formula of *Thomas* and *Hinkley* in accordance with AS 4391-1999. The plume formula of *Heskestad* [3], e.g., yields correct results for the region distant from the flames.

Effects changing the plume characteristic (such as increased air induction into the hot-gas plume due to superimposed flow patterns in the room) affect a hot-

Tabelle 10. Brandwannenanzahl je Wärmequelle, Innenmaße der Wannen, empfohlene Brennstoffmenge und Wärmefreisetzungsrate nach AS 4391-1999

Anzahl der Brandwannen	Abmessungen der Brandwannen ($L \times B \times H$) in mm	Abmessungen der Wasserwannen ($L \times B \times H$) in mm	Ethanolmenge je Brandwanne in ℓ	Gesamtwärmefreisetzungsrate in kW
1	420 × 297 × 65	495 × 350 × 180	2,5	60
1	594 × 420 × 90	700 × 495 × 130	5,5	140
1	841 × 595 × 130	990 × 700 × 180	13	340
2	841 × 595 × 130	990 × 700 × 180	15	700
4	841 × 595 × 130	990 × 700 × 180	16	1500

Table 10. Number of burning trays per heat source, internal dimensions of the trays, recommended quantity of fuel and heat release rate in accordance with AS 4391-1999

Number of burning trays	Dimensions of burning trays ($L \times B \times H$) in mm	Dimensions of water trays ($L \times B \times H$) in mm	Quantity of ethanol per burning tray in ℓ	Total heat release rate in kW
1	420 × 297 × 65	495 × 350 × 180	2,5	60
1	594 × 420 × 90	700 × 495 × 130	5,5	140
1	841 × 595 × 130	990 × 700 × 180	13	340
2	841 × 595 × 130	990 × 700 × 180	15	700
4	841 × 595 × 130	990 × 700 × 180	16	1500

wirken sich bei einem Heißbrauchttest mit Brandwannen in vergleichbarer Weise wie beim simulierten Realbrand aus.

4.3.2 Festlegung der Quellenanordnung

Die Anordnung und Dimensionierung der Brandsimulationsquellen ist grundsätzlich so vorzunehmen, dass eine hinreichende Annäherung an den Bemesungsbrand gewährleistet ist.

4.3.3 Sicherheitsvorkehrungen

Für den Umgang mit leichtentzündlichen Brennstoffen und offenem Feuer in einem Gebäude sind angemessene Sicherheitsvorkehrungen zu treffen.

Die Brandwannen sind auf einem nichtbrennbaren Untergrund aufzustellen (z.B. auf Calciumsilikat-Bauplatten); andere leicht entflammbare Stoffe sind während des Versuchs von den Brandwannen fernzuhalten. Im Nahbereich der Brandwannen kann ein Schutz der Gebäudeoberflächen und der Einrichtungen vor heißen Gasen und vor Strahlungswärme erforderlich werden.

smoke test using burning trays in a similar way as they would a simulated real-scale fire.

4.3.2 Specification of source arrangement

As a matter of principle, the fire simulation sources shall be arranged and dimensioned in such a manner that a sufficiently close approximation of the dimensioning fire is ensured.

4.3.3 Safety precautions

Appropriate safety precautions shall be taken when highly inflammable fuels and open fire are handled in a building.

The burning trays shall be placed on a non-combustible base (e.g. on calcium silicate slabs); other easily inflammable materials shall be kept away from the burning trays for the duration of the test. It may be necessary to protect the building surfaces and the interior from hot gases and radiant heat close to the burning trays.

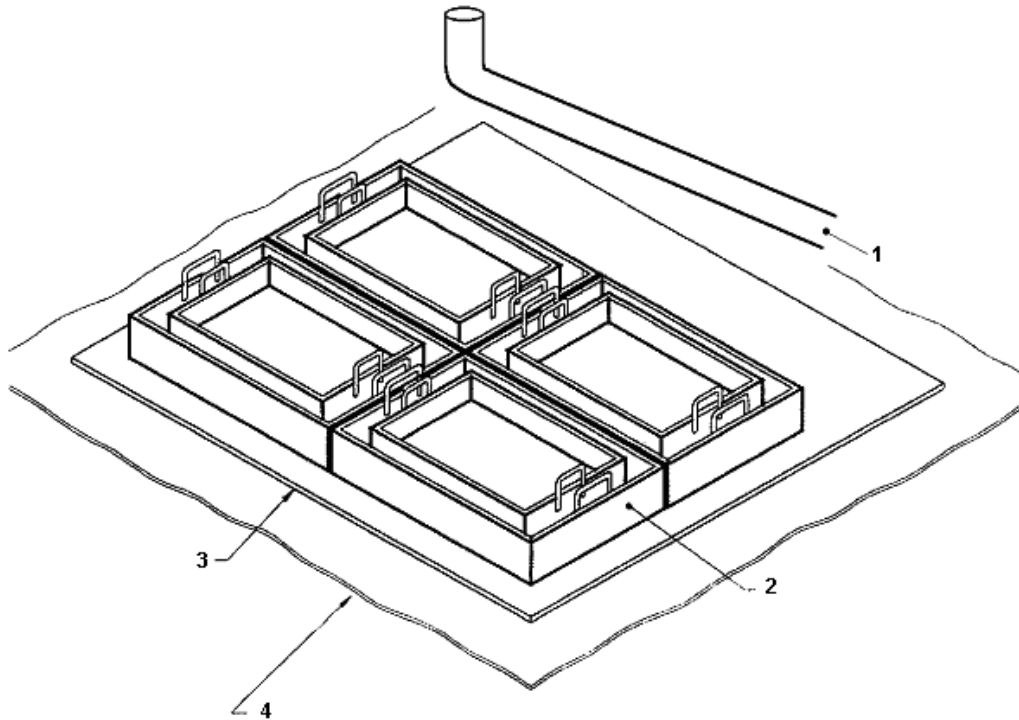


Bild 14. Versuchsanordnung gemäß AS 4391-1999 für 1,5 MW Gesamtwärmeleistung: eine Wärmequelle, bestehend aus vier Brandwannen (Größe DIN A 1)

- 1 Nebelzugabe
- 2 Wannenanordnung
- 3 wasserfeste Unterlage (bei Bedarf)
- 4 Gipskarton

Figure 14. Test set-up as specified in AS 4391-1999 for a total heat output of 1,5 MW: one heat source consisting of four burning trays (size DIN A 1)

- 1 Fog supply
- 2 Tray arrangement
- 3 Waterproof base (if required)
- 4 Gypsum board

Grundsätzlich wird die Wärmefreisetzung durch vollständiges Ausbrennen der Brandwannen beendet. Für den Fall, dass eine vorzeitige Unterbrechung der Wärmefreisetzung erforderlich werden sollte, sind Mittel zum Ablöschen der Brandwannen bereitzustellen (Abdeckbleche, Feuerlöscher).

As a matter of principle, the heat release is terminated by complete combustion of the fuel in the burning trays. Ensure that means for quenching the burning trays (cover plates, fire extinguishers) are available in case the heat release must be interrupted before the fuel is consumed.

5 Beispiele

5.1 Bestimmung der Brandverlaufskurven für ein gesprinklertes Ladenlokal

Für ein Ladenlokal (siehe Bild 15) in einer Einkaufspassage, das angebunden ist an ein Atrium, sollen die Brandverlaufskurven nach dieser Richtlinie bestimmt werden.

Gewählt:

- maximale spezifische Wärmefreisetzungsrate $\dot{q}_f = 500 \text{ kW/m}^2$ für Verkaufsflächen nach Tabelle 2

5 Examples

5.1 Determination of the fire curves for a sprinkler-equipped shop

The fire curves as per this guideline are to be determined for a shop (see Figure 15) in a shopping mall, the shop being connected to an atrium.

Selected:

- maximum heat release rate per unit area, $\dot{q}_f = 500 \text{ kW/m}^2$ for sales areas, as specified in Table 2

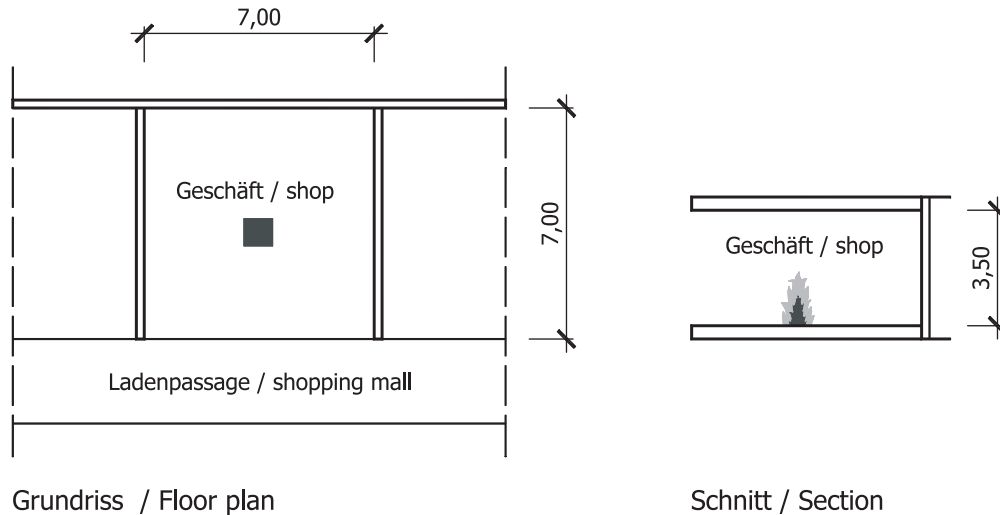


Bild 15. Darstellung der geometrischen Randbedingungen für Ladenlokal

Figure 15. Illustration of the geometrical boundary conditions of a shop

- Brandintensitätskoeffizient $\alpha = 0,047 \text{ kW/s}^2$ nach Tabelle 1, bei schneller Geschwindigkeit der Brandausbreitung
- Einsatz von automatischen Brandmeldern der Kenngröße Rauch
- Anordnung einer automatischen Löschanlage: Sprinklerung, Nennansprechtemperatur: 68°C , $RTI = 80 \text{ (s}\cdot\text{m)}^{0,5}$
- Interventionszeit der Feuerwehr: normale Verhältnisse

- fire intensity coefficient, $\alpha = 0,047 \text{ kW/s}^2$ as per Table 1, assuming fast fire spread
- use of automatic fire detectors responding to smoke
- arrangement of an automatic fire-extinguishing system: sprinklers, nominal response temperature: 68°C , $RTI = 80 \text{ (s}\cdot\text{m)}^{0,5}$
- fire brigade's intervention time: normal conditions

Brandverlaufskurven für hochenergetischen Brand:

Phase 5

Randbedingungen:

- $t_{1a} = 120 \text{ s}$ Zeit bis zur Brandmeldung gemäß Tabelle 3
- $t_{2b} = 780 \text{ s}$ Interventionszeit der Feuerwehr gemäß Tabelle 4

$$\Rightarrow t_5 = 120 + 780 = 900 \text{ s}$$

Phase 2/Phase 4

Sprinklerauslösung:

Der Zeitpunkt der Sprinklerauslösung wird nach Abschnitt 3.5 bestimmt. Folgende Eingabeparameter werden angesetzt:

- $h = 3,5 \text{ m}$ (vertikaler Abstand zwischen Brandfläche und Decke)
- maximaler Abstand zwischen Decke und Sprinkler: 10 cm
- $\alpha = 0,047 \text{ kW/s}^2$

Fire curves for a high-energy fire:

Stage 5

Boundary conditions:

- $t_{1a} = 120 \text{ s}$ time elapsing before fire alarm is issued, as per Table 3
- $t_{2b} = 780 \text{ s}$ fire brigade's intervention time, as per Table 4

$$\Rightarrow t_5 = 120 \text{ s} + 780 \text{ s} = 900 \text{ s}$$

Stage 2/stage 4

Activation of sprinklers:

The time at which the sprinklers are activated is determined as laid out in Section 3.5. The following input parameters are assumed:

- $h = 3,5 \text{ m}$ (vertical distance between area on fire and ceiling)
- maximum distance between ceiling and sprinkler spray disk: 10 cm
- $\alpha = 0,047 \text{ kW/s}^2$

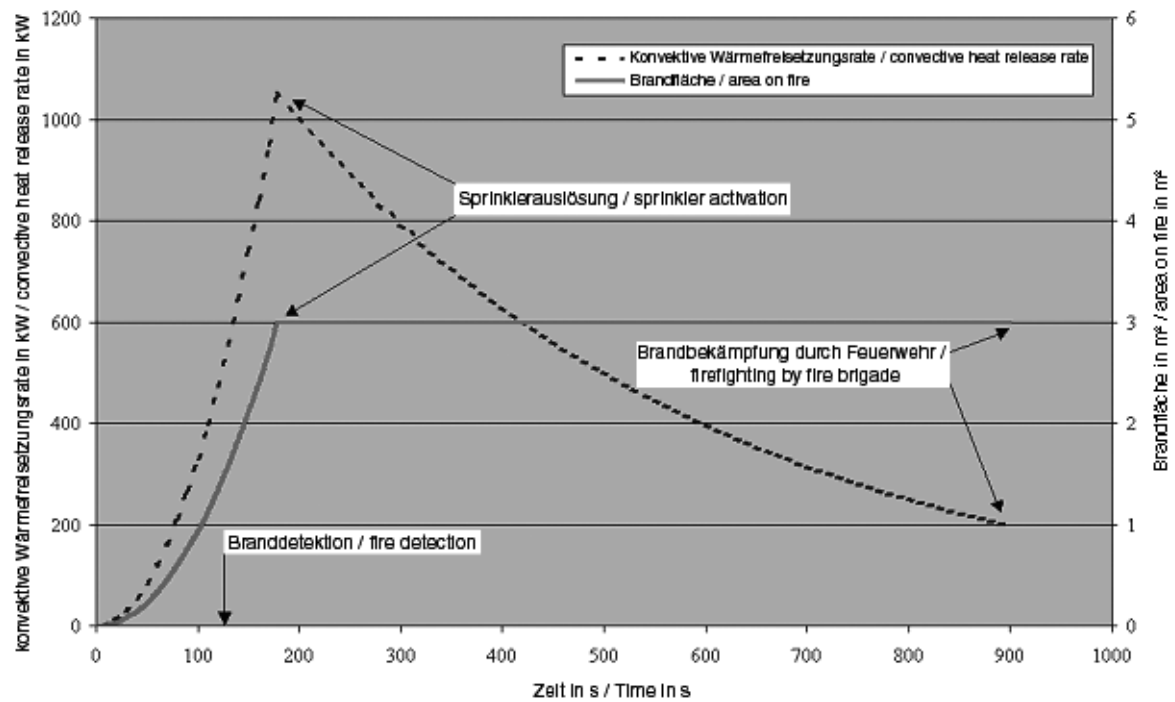


Bild 16. Hochenergetischer Brand: Darstellung der konvektiven Wärmefreisetzungsrate und der Brandfläche

Figure 16. High-energy fire: Illustration of the convective heat release rate and the area on fire

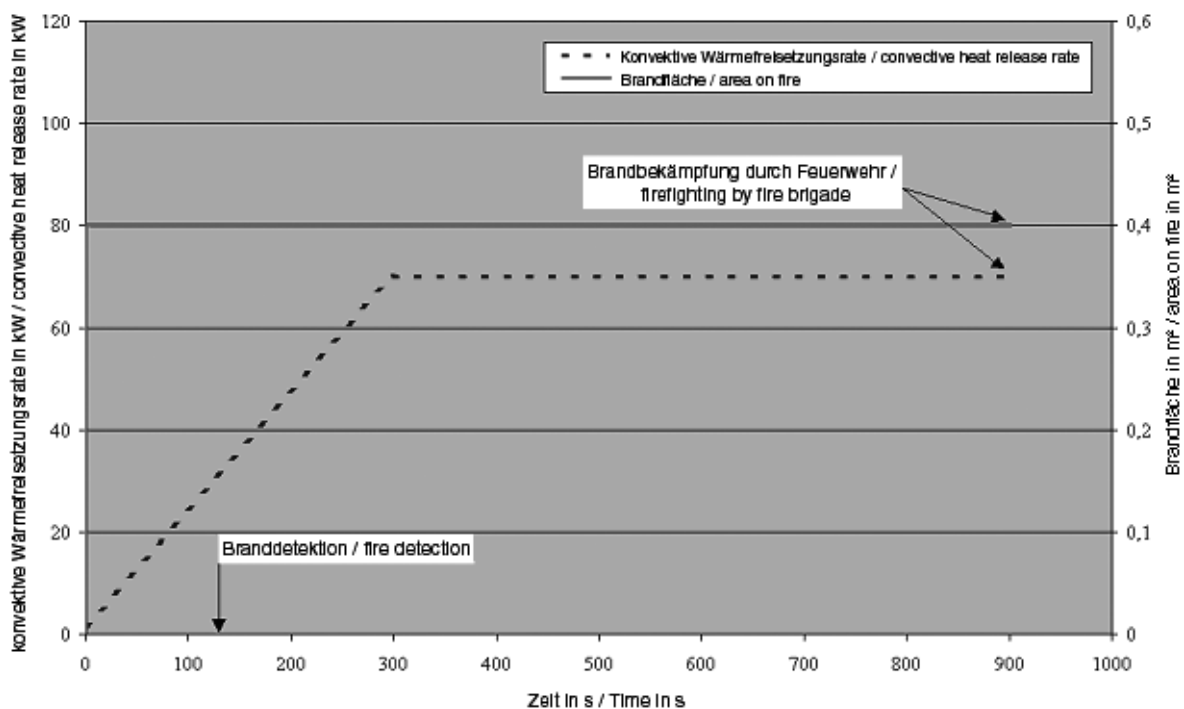


Bild 17. Niedrigenergetischer Brand: Darstellung der konvektiven Wärmefreisetzungsrate und der Brandfläche

Figure 17. Low-energy fire: Illustration of the convective heat release rate and the area on fire

⇒ der Auslösezeitpunkt für den Sprinkler ergibt sich nach Tabelle 7: $t_4 = 178$ s (interpoliert)

Entwicklung der Wärmefreisetzungsrate und Brandfläche in Phase 2 zum Zeitpunkt $t_4 = 178$ s:

$$\Rightarrow v = \sqrt{\frac{0,047}{500}} = 0,0097 \text{ m/s}$$

$$\Rightarrow A(\tau_2) = (0,0097 \cdot 178)^2 = 3,0 \text{ m}^2$$

$$\Rightarrow \dot{Q}(\tau_2) = 3 \cdot 500 = 1500 \text{ kW}$$

$$\Rightarrow \dot{Q}_{\text{konv}}(\tau_2) = 1500 \cdot 0,7 = 1050 \text{ kW}$$

Entwicklung der Wärmefreisetzungsrate und Brandfläche in Phase 4 von $t_4 = 178$ s bis $t_5 = 900$ s:

$$\Rightarrow A(\tau_4) = A(t_4) = 3,0 \text{ m}^2$$

$$\Rightarrow \dot{Q}(\tau_4) = 1500 \cdot e^{-0,0023 \cdot t_4}$$

$$\Rightarrow \dot{Q}(t_5) = 1500 \cdot e^{-0,0023 \cdot (900 - 178)} = 285 \text{ kW}$$

$$\Rightarrow \dot{Q}_{\text{konv}}(t_5) = 285 \cdot 0,7 = 200 \text{ kW}$$

Brandverlaufskurven für niedrigerenergetischen Brand

Phase 1

- $t_5 = 900$ s
- keine Sprinklerauslösung

$$\Rightarrow A(\tau_1) = 0,4 \text{ m}^2$$

$$\Rightarrow \dot{Q}(\tau_1 > 300 \text{ s}) = 100 \text{ kW}$$

$$\Rightarrow \dot{Q}_{\text{konv}}(\tau_1) = 100 \cdot 0,7 = 70 \text{ kW}$$

5.2 Quantitative Bewertung der Rauchgasausbreitung

Dargestellt werden soll ein Brandverlauf mit einer Wärmefreisetzungsrate von 1,43 MW. Bei einer maximalen spezifischen Wärmefreisetzungsrate von 715 kW/m² errechnet sich die Brandfläche zu 2 m². Der konvektiv freigesetzte Anteil beträgt dann nach Gleichung (17)

$$\dot{Q}_{\text{konv}} = 0,7 \cdot \dot{Q}$$

$$\dot{Q}_{\text{konv}} = 1,0 \text{ MW}$$

Die Brandsimulationsquelle wird gemäß Versuchsreihe 3 mit einer konvektiven Wärmeleistung von 150 kW betrieben. Hieraus resultiert folgender Ähnlichkeitsfaktor

⇒ The sprinkler activation time results from Table 7: $t_4 = 178$ s (interpolated)

Development of heat release rate and area on fire during stage 2 at time $t_4 = 178$ s:

$$\Rightarrow v = \sqrt{\frac{0,047}{500}} = 0,0097 \text{ m/s}$$

$$\Rightarrow A(\tau_2) = (0,0097 \cdot 178)^2 = 3,0 \text{ m}^2$$

$$\Rightarrow \dot{Q}(\tau_2) = 3 \cdot 500 = 1500 \text{ kW}$$

$$\Rightarrow \dot{Q}_{\text{konv}}(\tau_2) = 1500 \cdot 0,7 = 1050 \text{ kW}$$

Development of heat release rate and area on fire during stage 4 from time $t_4 = 178$ s to $t_5 = 900$ s:

$$\Rightarrow A(\tau_4) = A(t_4) = 3,0 \text{ m}^2$$

$$\Rightarrow \dot{Q}(\tau_4) = 1500 \cdot e^{-0,0023 \cdot t_4}$$

$$\Rightarrow \dot{Q}(t_5) = 1500 \cdot e^{-0,0023 \cdot (900 - 178)} = 285 \text{ kW}$$

$$\Rightarrow \dot{Q}_{\text{konv}}(t_5) = 285 \cdot 0,7 = 200 \text{ kW}$$

Fire curves for a low-energy fire

Stage 1

- $t_5 = 900$ s
- sprinklers not activated

$$\Rightarrow A(\tau_1) = 0,4 \text{ m}^2$$

$$\Rightarrow \dot{Q}(\tau_1 > 300 \text{ s}) = 100 \text{ kW}$$

$$\Rightarrow \dot{Q}_{\text{konv}}(\tau_1) = 100 \cdot 0,7 = 70 \text{ kW}$$

5.2 Quantitative assessment of smoke-gas spread

The development of the fire shall be represented for a heat release rate of 1,43 MW. The area on fire is calculated to be 2 m² for a maximum heat release rate per unit area of 715 kW/m². The convective release is, then, using Equation (17)

$$\dot{Q}_{\text{konv}} = 0,7 \cdot \dot{Q}$$

$$\dot{Q}_{\text{konv}} = 1,0 \text{ MW}$$

In accordance with test series 3, the fire simulation source is operated at a convective heat output of 150 kW. This leads to the following similarity factor

$$f_{\dot{Q}} = \frac{\dot{Q}_M}{\dot{Q}_0} = \frac{150 \text{ kW}}{1000 \text{ kW}} = 0,15$$

Aus Gleichung (32) folgt:

$$f_{\Delta\vartheta} = \frac{f_{\dot{Q}}}{f_w} = \frac{0,15}{f_w}$$

Eingesetzt in Gleichung (33) ergibt sich der Ähnlichkeitsfaktor für die Geschwindigkeit f_w

$$f_w^3 = 0,15$$

$$f_w = \frac{w_M}{w_0} = \sqrt[3]{0,15} = 0,53$$

$$w_M = 0,53 w_0$$

daraus folgt

$$\dot{V}_M = 0,53 \cdot \dot{V}_0$$

daraus folgt

$$f_{\Delta\vartheta} = \frac{0,15}{0,53} = 0,28$$

Der im Original erwärmte Rauchgasmassenstrom errechnet sich nach *Thomas* und *Hinkley* für das Ende des Strahlformierungsbereiches nach Gleichung (21) zu

$$\dot{m}_0 = 4,5 \text{ kg/s}$$

wobei die Länge des Strahlformierungsbereiches nach Gleichung (21)

$$l_F = 2 \cdot \sqrt{2} = 2,83 \text{ m}$$

beträgt.

Fall 1: Einbringung des Prüfrauchgases in der Höhe $z = l_F$

Dann ergibt sich der zu beheizende Luftmassenstrom zu

$$\dot{m}_M = 0,53 \dot{m}_0 = 0,53 \cdot 4,5 \text{ kg/s} = 2,385 \text{ kg/s}$$

oder der zu erwärmende Luftvolumenstrom

$$\dot{V}_M = \frac{2,385 \text{ kg/s}}{1,2 \text{ kg/m}^3} = 1,988 \text{ m}^3/\text{s}$$

mit $\rho = 1,2 \text{ kg/m}^3$

Die mittlere Rauchgastemperatur im Plume (Original) errechnet sich aus:

$$\Delta\vartheta_0 = \frac{\dot{Q}_{q_{\text{konv}}}}{\dot{m}_{\text{Pl}} \cdot c_{p,\text{Rauch}}} \rightarrow \Delta\vartheta_0 = 222 \text{ K}$$

$$f_{\dot{Q}} = \frac{\dot{Q}_M}{\dot{Q}_0} = \frac{150 \text{ kW}}{1000 \text{ kW}} = 0,15$$

It follows from Equation (32) that

$$f_{\Delta\vartheta} = \frac{f_{\dot{Q}}}{f_w} = \frac{0,15}{f_w}$$

Inserting this result into Equation (33) yields the similarity factor for the velocity f_w

$$f_w^3 = 0,15$$

$$f_w = \frac{w_M}{w_0} = \sqrt[3]{0,15} = 0,53$$

$$w_M = 0,53 w_0$$

from which it follows that

$$\dot{V}_M = 0,53 \cdot \dot{V}_0$$

from which it follows that

$$f_{\Delta\vartheta} = \frac{0,15}{0,53} = 0,28$$

For the end of the jet-forming region, the heated smoke-gas mass flow in the original room is calculated as described by *Thomas* and *Hinkley*, using Equation (21):

$$\dot{m}_0 = 4,5 \text{ kg/s}$$

where the length of the jet-forming region is

$$l_F = 2 \cdot \sqrt{2} = 2,83 \text{ m}$$

in accordance with Equation (21).

Case 1: Supply of test smoke gas at a height $z = l_F$

The air mass flow to be heated is, then

$$\dot{m}_M = 0,53 \dot{m}_0 = 0,53 \cdot 4,5 \text{ kg/s} = 2,385 \text{ kg/s}$$

Alternatively, the air volume flow is

$$\dot{V}_M = \frac{2,385 \text{ kg/s}}{1,2 \text{ kg/m}^3} = 1,988 \text{ m}^3/\text{s}$$

where $\rho = 1,2 \text{ kg/m}^3$

The mean temperature of the smoke gas in the (original) plume is calculated from

$$\Delta\vartheta_0 = \frac{\dot{Q}_{q_{\text{konv}}}}{\dot{m}_{\text{Pl}} \cdot c_{p,\text{Rauch}}} \rightarrow \Delta\vartheta_0 = 222 \text{ K}$$

ϑ_{SO} mittlere Strahltemperatur am Ende des Strahlformierungsbereiches (Original)

$$\vartheta_{SO} = (222 + 20) ^\circ\text{C} = 242 ^\circ\text{C}$$

Demnach ergibt sich eine vergleichbare Temperaturerhöhung im Modell zu

$$\Delta \vartheta_M = \Delta \vartheta_0 \cdot 0,28 = 62,16 ^\circ\text{C}$$

Daraus errechnet sich die mittlere Strahltemperatur ϑ_{SM} am Ende des Strahlformierungsbereiches (Modell) wie folgt

$$\vartheta_{SM} = 82,16 ^\circ\text{C}$$

Anmerkung: Die oben dargestellte Auslegung zur Brandsimulationsquelle ist immer für den jeweilig angestrebten Versuch nachzuweisen bzw. anzugeben. Sollen bei einer maschinellen Entrauchungsanlage quantitative Aussagen z. B. zur Beurteilung der Höhe raucharmer Schichten erfolgen, ist der Abluftstrom entsprechend dem Ähnlichkeitsfaktor f_v (hier beispielhaft $f_v = 0,53$) zu reduzieren. Hierzu sind oft umfangreiche Einstellungen an der Lüftungsanlage notwendig.

Fall 2: Einbringung des Prüfrauchgases in der Höhe $z \neq l_F$

$$z = 1,7 \text{ m}; l_F = 2,83 \text{ m}$$

Wenn $l_F \neq z$ muss eine Umrechnung des Rauchgasmassenstrom (Original) erfolgen:

Es errechnet sich der Massenstrom in der Höhe z nach Gleichung (22)

$$\frac{\dot{m}_0(l_F)}{\dot{m}_0(z)} = \left(\frac{2,83 - (-0,32)}{1,70 - (-0,32)} \right)^{1,667} = 2,1$$

Hieraus ergibt sich der Rauchgasmassenstrom in der Höhe z zu

$$\dot{m}_0(z) = \frac{4,5 \text{ kg/s}}{2,1} = 2,14 \text{ kg/s}$$

Mit der Brandsimulationseinrichtung wird folgender Prüfrauchgasmassenstrom erzeugt

$$\dot{m}_M(z) = 2,14 \text{ kg/s} \cdot 0,53 = 1,13 \text{ kg/s}$$

Demnach berechnet sich der Volumenstrom zu

$$\dot{V}_M(z) = \frac{1,13 \text{ kg/s}}{1,2 \text{ kg/m}^3} = 0,945 \text{ m}^3/\text{s}$$

Die mittlere Rauchgastemperatur im Plume (Original) errechnet sich in der Höhe $z = 1,7 \text{ m}$ zu

$$\Delta \vartheta_0 = \frac{1000 \text{ kW}}{2,14 \text{ kg/s} \cdot 1,0 \text{ kJ/kgK}} = 467,3 ^\circ\text{C}$$

Daraus folgt eine Temperaturdifferenz im Modellversuch von

$$\begin{aligned} \Delta \vartheta_M &= \Delta \vartheta_0 \cdot 0,28 = 130,8 ^\circ\text{C} \\ \vartheta_R &= 20 ^\circ\text{C} \end{aligned}$$

Where ϑ_{SO} is the mean jet temperature at the end of the (original) jet-forming region.

$$\vartheta_{SO} = (222 + 20) ^\circ\text{C} = 242 ^\circ\text{C}$$

A comparable temperature increase in the model, therefore, results as

$$\Delta \vartheta_M = \Delta \vartheta_0 \cdot 0,28 = 62,16 ^\circ\text{C}$$

From this, the mean jet temperature at the end of the jet-forming region (in the model), ϑ_{SM} , is then calculated as follows:

$$\vartheta_{SM} = 82,16 ^\circ\text{C}$$

Note: The above dimensioning of the fire simulation source for the test in question shall always be demonstrated or documented. Where, in case of powered smoke control system, quantitative statements are to be made, e. g. for assessing the height of smokeless layers, the extract air flow shall be reduced as specified by the similarity factor f_v (which is $f_v = 0,53$ in this case study). In many cases, this requires extensive adjustments to the ventilating system.

Case 2: Supply of test smoke gas at a height $z \neq l_F$

$$z = 1,7 \text{ m}; l_F = 2,83 \text{ m}$$

If $l_F \neq z$, the (original) smoke-gas mass flow must be converted:

The mass flow at height z is calculated using Equation (22)

$$\frac{\dot{m}_0(l_F)}{\dot{m}_0(z)} = \left(\frac{2,83 - (-0,32)}{1,70 - (-0,32)} \right)^{1,667} = 2,1$$

From this, the smoke-gas mass flow at height z results as

$$\dot{m}_0(z) = \frac{4,5 \text{ kg/s}}{2,1} = 2,14 \text{ kg/s}$$

The fire-simulation set-up generates the following test-smoke-gas mass flow:

$$\dot{m}_M(z) = 2,14 \text{ kg/s} \cdot 0,53 = 1,13 \text{ kg/s}$$

The volume flow is, then, calculated to be

$$\dot{V}_M(z) = \frac{1,13 \text{ kg/s}}{1,2 \text{ kg/m}^3} = 0,945 \text{ m}^3/\text{s}$$

The mean temperature of the smoke gas in the (original) plume at a height of $z = 1,7 \text{ m}$ is calculated as

$$\Delta \vartheta_0 = \frac{1000 \text{ kW}}{2,14 \text{ kg/s} \cdot 1,0 \text{ kJ/kgK}} = 467,3 ^\circ\text{C}$$

From this results the following temperature difference in the model test:

$$\begin{aligned} \Delta \vartheta_M &= \Delta \vartheta_0 \cdot 0,28 = 130,8 ^\circ\text{C} \\ \vartheta_R &= 20 ^\circ\text{C} \end{aligned}$$

mit einer Raumtemperatur von ϑ_{∞}

Daraus errechnet sich die mittlere Strahltemperatur ϑ_{S_M} (Modell) in der Höhe z zu

$$\vartheta_{S_M} = (130,8 + 20) \text{ °C} = 150,8 \text{ °C}$$

where the room temperature is ϑ_{∞}

From this, the mean jet temperature at a height z (in the model), ϑ_{S_M} , is then calculated as follows:

$$\vartheta_{S_M} = (130,8 + 20) \text{ °C} = 150,8 \text{ °C}$$

Schrifttum/Bibliography

Technische Regeln/Technical rules

AS 4391-1999 : 1999-01-19 Smoke management systems; Hot smoke test

DIN 18232 Rauch- und Wärmefreihaltung (Smoke and heat control systems). Berlin: Beuth Verlag

DIN EN 54-7 : 2001-03 Brandmeldeanlagen; Teil 7: Rauchmelder; Punktförmige Melder nach dem Streulicht-, Durchlicht- oder Ionisationsprinzip; Deutsche Fassung EN 54-7:2000 (Fire detection and fire alarm systems; Part 7: Smoke detectors; Point detectors using scattered light, transmitted light or ionization; German version EN 54-7:2000). Berlin: Beuth Verlag

DIN EN 12101-1 : 1995-11 Anlagen zur Kontrolle von Rauch- und Wärmeströmungen; Teil 1: Spezifikation für Rauchschürzen; Anforderungen und Prüfverfahren; Deutsche Fassung prEN 12101-1:1995 (Smoke and heat control systems; Part 1: Specification for smoke curtains; Requirements and test methods; German version prEN 12101-1:1995). Berlin: Beuth Verlag

DIN EN 12259-1 : 2001-11 Ortsfeste Löschanlagen; Bauteile für Sprinkler- und Sprühwasseranlagen; Teil 1: Sprinkler; Deutsche Fassung EN 12259-1:2001 (Fixed firefighting systems; Components for sprinkler and water spray systems; Part 1: Sprinklers; German version EN 12259-1:2001). Berlin: Beuth Verlag

DIN VDE 0833 Gefahrenmeldeanlagen für Brand, Einbruch und Überfall (Alarm systems for fire, intrusion and hold-up). Berlin: Beuth Verlag

VdS 2092 : 1999-08 Richtlinien für Sprinkleranlagen; Planung und Einbau. Zurückgezogen seit 2003-01. Nachfolgedokument VdS CEA 4001 : 2003-01

VdS 2827 : 2005-09 Bemessungsbrände für Brandsimulationen und Brandschutzkonzepte. Berlin: Beuth Verlag

VdS CEA 4001 : 2005-09 Richtlinien für Sprinkleranlagen; Planung und Einbau. Berlin: Beuth Verlag

VDI 6019 Blatt 2 Ingenieurverfahren zur Bemessung der Rauchableitung aus Gebäuden; Ingenieurmethoden (in Vorbereitung)

Literatur/Literature

[1] Seifert, U.; Stein, J.: Rauchversuche in Gebäuden. VFDB (2001) 3, S. 123–128

[2] McGrattan, K.B., et al.: Fire Dynamics Simulator (Version 2) – Technical Reference Guide. NISTIR 6783, NIST National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg (USA), 2001

[3] Brein, D.: Anwendungsbereiche und -grenzen für praxisrelevante Modellansätze zur Bewertung der Rauchausbildung in Gebäuden (Plume-Formeln). Forschungsstelle für Brandschutztechnik, Karlsruhe, Dezember 2001

[4] Evans, Davis D.: Ceiling Jet Flows in SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, 2nd Edition, Section 2/Chapter 4, National Fire Protection Association, Quincy, Massachusetts, 1995

[5] Davis, William D.: The Zone Fire Model Jet: A Model for the Prediction of Detector Activation and Gas Temperatures in the Presence of a Smoke Layer. NISTIR 6324, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, Maryland, May 1999

[6] Ergebnisbericht zur Beurteilung von Bränden an Schienenfahrzeugen als Bemessungsbrände zur brandschutztechnischen Auslegung von oberirdischen Personenverkehrsanlagen der Deutschen Bahn AG (Fassung 09/2000)

[7] Paschen, C.: Katalog Brandszenarien, Universität Wuppertal (unveröffentlichte Unterlagen), Original-Werte aus: Loveseat fire time-line, Fire Scenarios, Building and Fire Research Laboratory, NIST National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg (USA), Internet-Adresse: www.bfrl.nist.gov

[8] Paschen, C.: Katalog Brandszenarien, Universität Wuppertal (unveröffentlichte Unterlagen)

[9] Steinert, C.: Experimentelle Untersuchungen zum Abbrand- und Feuerüberungsverhalten von Personenkraftwagen, vfdb (2000) 4, S. 163–172

Anhang Umrechnungsgleichungen

A1 Gleichungen zur Bestimmung der Temperatur- und Geschwindigkeitsentwicklung unter der Decke nach [4]

$$T - T_{\infty} = \Delta T_2^* \cdot [K^{2/5} (T_{\infty}/g) \alpha^{2/5} h_{\max}^{-3/5}] \quad (A1)$$

$$U = U_2^* \cdot (K^{1/5} \alpha^{1/5} h_{\max}^{1/5}) \quad (A2)$$

mit

$$\Delta T_2^* = \begin{cases} 0 & t_2^* \leq t_f^* \\ \left(\frac{t_2^* - t_f^*}{0,188 + 0,313 \cdot r_{\max}/h_{\max}} \right)^{4/3} & t_2^* > t_f^* \end{cases} \quad (A3)$$

$$t_2^* = \tau_2 / (K^{-0,2} \alpha^{-0,2} h_{\max}^{0,8}) \quad (A4)$$

$$t_f^* = 0,954 (l + r_{\max}/h_{\max}) \quad (A5)$$

$$K = g / (c_p T_{\infty} \rho_{\infty}) \quad (A6)$$

$$U_2^* = 0,59 (r_{\max}/h_{\max})^{-0,63} \cdot \sqrt{\Delta T_2^*} \quad (A7)$$

Dabei ist

T_{∞} Umgebungstemperatur in K

T Rauchgastemperatur (Deckenbereich) in K

ΔT_2^* dimensionslose Rauchgastemperatur (Hilfsvariable)

U_2^* dimensionslose Rauchgasgeschwindigkeit (Hilfsvariable)

U Rauchgasgeschwindigkeit (Deckenbereich) in m/s

Δt_2^* dimensionslose Zeit (Hilfsvariable)

t_f^* Hilfsvariable, die die Zeitverzögerung der aufsteigenden Rauchgase zwischen Brandfläche und der zu untersuchenden Stelle berücksichtigt

τ_2 Zeitpunkt zu Beginn der Brandphase 2 in s

K Hilfskoeffizient in $m^4/(kJ \cdot s^2)$

ρ_{∞} Dichte der Luft bei Umgebungstemperatur in kg/m^3

c_p spezifische Wärmekapazität in $kJ/(kg \cdot K)$

g Erdbeschleunigung in m/s^2

α Brandintensitätskoeffizient in kW/s^2

$h_{\max}$ maximaler vertikaler Abstand zwischen Brandfläche und Decke in m

$r_{\max}$ maximaler horizontaler Abstand zwischen Plume-Achse und der zu untersuchenden Stelle in m

Annex Conversion equations

A1 Equations for determining the developments of temperature and velocity below the ceiling as per [4]

$$T - T_{\infty} = \Delta T_2^* \cdot [K^{2/5} (T_{\infty}/g) \alpha^{2/5} h_{\max}^{-3/5}] \quad (A1)$$

$$U = U_2^* \cdot (K^{1/5} \alpha^{1/5} h_{\max}^{1/5}) \quad (A2)$$

where

$$\Delta T_2^* = \begin{cases} 0 & t_2^* \leq t_f^* \\ \left(\frac{t_2^* - t_f^*}{0,188 + 0,313 \cdot r_{\max}/h_{\max}} \right)^{4/3} & t_2^* > t_f^* \end{cases} \quad (A3)$$

$$t_2^* = \tau_2 / (K^{-0,2} \alpha^{-0,2} h_{\max}^{0,8}) \quad (A4)$$

$$t_f^* = 0,954 (1 + r_{\max}/h_{\max}) \quad (A5)$$

$$K = g / (c_p T_{\infty} \rho_{\infty}) \quad (A6)$$

$$U_2^* = 0,59 (r_{\max}/h_{\max})^{-0,63} \cdot \sqrt{\Delta T_2^*} \quad (A7)$$

where

T_{∞} ambient temperature, in K

T smoke-gas temperature (close to the ceiling), in K

ΔT_2^* dimensionless smoke-gas temperature (auxiliary variable)

U_2^* dimensionless smoke-gas velocity (auxiliary variable)

U smoke-gas velocity (close to the ceiling), in m/s

Δt_2^* dimensionless time (auxiliary variable)

t_f^* auxiliary variable taking into account the time it takes for the smoke gases to rise from the area on fire to the point under investigation

τ_2 time when stage 2 of the fire starts, in s

K auxiliary coefficient, in $\text{m}^4/(\text{kJ} \cdot \text{s}^2)$

ρ_{∞} density of the air at ambient temperature, in kg/m^3

c_p specific heat, in $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$

g gravitational acceleration, in m/s^2

α fire intensity coefficient, in kW/s^2

$h_{\max}$ maximum vertical distance between area on fire and the ceiling, in m

$r_{\max}$ maximum horizontal distance between the plume axis and the point under investigation, in m

A2 Gleichung zur Bestimmung der Temperatur im Auslöseelement des Sprinklers nach [5]

$$\frac{dT_e}{dt} = \frac{\sqrt{U}}{RTI} \cdot \left[T - T_e - \frac{C}{\sqrt{U}} \cdot (T_e - T_\infty) \right] \quad (\text{A8})$$

Dabei ist

- T_e Temperatur im Auslöseelement in K
- T_∞ Umgebungstemperatur in K
- T Rauchgastemperatur in K
- RTI Trägheitsindex (response time index) in $\sqrt{(s \cdot m)}$
- U Rauchgasgeschwindigkeit (Deckenbereich) in m/s
- C Wärmeleitfaktor in $\sqrt{(m/s)}$

A2 Equation for determining the temperature in the responsive element of the sprinkler as per [5]

$$\frac{dT_e}{dt} = \frac{\sqrt{U}}{RTI} \cdot \left[T - T_e - \frac{C}{\sqrt{U}} \cdot (T_e - T_\infty) \right] \quad (\text{A8})$$

where

- T_e temperature in the responsive element, in K
- T_∞ ambient temperature, in K
- T smoke-gas temperature, in K
- RTI response time index, in $\sqrt{(s \cdot m)}$
- U smoke-gas velocity (close to the ceiling), in m/s
- C conductivity factor, in $\sqrt{(m/s)}$