

VEREIN
DEUTSCHER
INGENIEURE

Ingenieurverfahren zur Bemessung
der Rauchableitung aus Gebäuden
Ingenieurmethoden

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

VDI 6019

Blatt 2 / Part 2

Ausg. 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
Einleitung	3	Introduction	3
1 Anwendungsbereich	3	1 Scope	3
2 Begriffe	3	2 Terms and definitions	3
3 Formelzeichen	4	3 Symbols.	4
4 Brandmodellierung und Brandablauf	7	4 Fire modelling and fire development	7
4.1 Darstellung von Brandverlaufskurven	7	4.1 Representation of fire curves	7
4.2 Beschreibung der brandschutztechnischen Interaktionen	8	4.2 Description of relevant fire-protection interactions	8
5 Allgemeine Hinweise für die Planung von Entrauchungssystemen	9	5 General guidance on planning of smoke-exhaust ventilation systems	9
6 Nachweis für die niedrigenergetische Brandphase	10	6 Verification method for the low-energy fire stage	10
6.1 Vereinfachtes Nachweisverfahren für niedrigenergetische Brände (Brandphase 1 kW bis 100 kW).	10	6.1 Simplified verification method for low-energy fires (fire stage 1 kW to 100 kW)	10
6.2 Zusatzmaßnahmen	13	6.2 Additional measures	13
7 Bewertungsgrößen für die Dimensionierung von Entrauchungseinrichtungen	14	7 Evaluation parameters for the dimensioning of smoke-exhaust units	14
7.1 Allgemeines.	14	7.1 General	14
7.2 Bewertungsgrößen	14	7.2 Evaluation parameters	14
8 Analytisches Berechnungsverfahren für einfache Raumgeometrien	14	8 Analytical calculation method for simple room geometries	14
8.1 Einleitung	14	8.1 Introduction.	14
8.2 Berechnung des Rauchgasmassenstroms	15	8.2 Calculation of the smoke-gas mass flow	15
8.3 Wärmebilanz der Rauchschiicht, Rauchschiichttemperatur	17	8.3 Heat balance of smoke layer, smoke-layer temperature	17

VDI-Gesellschaft Bauen und Gebäudetechnik (GBG)

Fachbereich Technische Gebäudeausrüstung

	Seite		Page
8.4	Berechnung des abzuführenden Rauchgasvolumenstroms	8.4	Calculation of the smoke-gas volume flow to be removed
	21		21
8.5	Berechnung des erforderlichen Zuluftstroms	8.5	Calculation of the required inlet-air volume flow
	21		21
8.6	Bemessung des Systems zur natürlichen Rauchableitung (NRA)	8.6	Dimensioning of the natural smoke-exhaust ventilation system.
	22		22
8.7	Bemessung des Systems zur maschinellen Rauchableitung (MRA)	8.7	Dimensioning of the mechanical smoke-exhaust ventilation system.
	23		23
8.8	Öffnungsflächen – Definitionen und Anforderungen.	8.8	Inlet air – Definitions and requirements.
	24		24
8.9	Nachweis der mittleren Raumtemperatur in der raucharmen Schicht	8.9	Verification of the mean room temperature in the smokeless layer
	30		30
9	Dimensionierung von Entrauchungssystemen mit Zonenmodellen	9	Dimensioning of smoke-exhaust ventilation systems using zone models
	31		31
9.1	Einleitung	9.1	Introduction
	31		31
9.2	Anwendungsvoraussetzungen und Anwendungsgrenzen.	9.2	Application requirements and application limits
	32		32
9.3	Beschreibung der Anwendungssoftware.	9.3	Description of the application software
	34		34
9.4	Darstellung und Bewertung der Simulationsergebnisse	9.4	Representation and evaluation of the simulation results
	34		34
9.5	Allgemeine Hinweise zur Nachweisführung	9.5	General notes regarding verification
	35		35
10	Dimensionierung von Entrauchungssystemen mit CFD-Rechnungen	10	Dimensioning of smoke-exhaust ventilation systems using CFD calculations
	35		35
10.1	Einleitung	10.1	Introduction
	35		35
10.2	Vorgehensweise bei der Berechnung	10.2	Calculation procedure
	36		36
10.3	Vorgaben für die Anwendung von CFD-Verfahren.	10.3	Requirements for the application of CFD methods.
	36		36
10.4	Darstellung und Bewertung der Simulationsergebnisse	10.4	Representation and evaluation of the simulation results
	44		44
11	Modellversuche	11	Simulation tests
	45		45
11.1	Einleitung	11.1	Introduction
	45		45
11.2	Modellgesetzmäßigkeiten (Ähnlichkeitskennzahlen)	11.2	Laws governing simulation (similarity characteristics).
	45		45
11.3	Modellmaßstab.	11.3	Scale of model.
	46		46
11.4	Modellgestaltung	11.4	Model design
	47		47
11.5	Umrechnungen physikalischer Größen	11.5	Conversion of physical quantities
	47		47
11.6	Dokumentation der Ergebnisse	11.6	Documentation of results
	49		49
Anhang A	Ergänzende Hinweise für Zuluftöffnungen	Annex A	Supplementary information concerning inlet-air openings
	50		50
Anhang B	Datenblatt – Dimensionierung von Entrauchungssystemen mit Zonenmodellen	Annex B	Data sheet – Dimensioning of smoke-exhaust ventilation systems using zone models
	54		55
Anhang C	Datenblatt – Dimensionierung von Entrauchungssystemen mit CFD-Rechnungen	Annex C	Data sheet – Dimensioning of smoke-exhaust ventilation systems using CFD calculations.
	60		61
Anhang D	Anwendungsbeispiele	Annex D	Case studies
	66		66
Schrifttum	88	Bibliography	88

Vorbemerkung

Der Inhalt dieser Richtlinie ist entstanden unter Beachtung der Vorgaben und Empfehlungen der Richtlinie VDI 1000.

Alle Rechte, insbesondere die des Nachdrucks, der Fotokopie, der elektronischen Verwendung und der Übersetzung, jeweils auszugsweise oder vollständig, sind vorbehalten.

Die Nutzung dieser VDI-Richtlinie ist unter Wahrung des Urheberrechts und unter Beachtung der Lizenzbedingungen (www.vdi-richtlinien.de), die in den VDI-Merkblättern geregelt sind, möglich.

Allen, die ehrenamtlich an der Erarbeitung dieser VDI-Richtlinie mitgewirkt haben, sei gedankt.

Einleitung

Bei der Erstellung brandschutztechnischer Nachweise zur Entrauchung für komplexe Bauvorhaben werden zunehmend die Möglichkeiten rechnerischer Ingenieurverfahren genutzt. Die Richtlinie VDI 6019 Blatt 2 beschreibt die Grundlagen und Anwendungsgrenzen dieser Verfahren. Als Basis für die Bemessung können die Brandverlaufskurven aus VDI 6019 Blatt 1 herangezogen werden. Bei der Bewertung der Ergebnisse ist die Bandbreite der Eingangsgrößen zu berücksichtigen.

1 Anwendungsbereich

Diese Richtlinie gilt für die Bemessung von Anlagen zur Rauchableitung insbesondere in Gebäuden. Sie zeigt Anwendungsmöglichkeiten, Grenzen und Anforderungen an die Ingenieurmethoden zur Dimensionierung auf. Es werden Zonenmodelle, CFD-Modelle und Modellversuche behandelt. Darüber hinaus wird für einfache Geometrien ein analytisches Berechnungsverfahren zur Verfügung gestellt.

Nicht behandelt sind Anlagen zur Sicherheitsdruckbelüftung und Spülung sowie ähnliche Systeme.

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).

2 Begriffe**Ähnlichkeitsbereich**

Bereich der Strahlströmung, der sich an den Strahlformierungsbereich anschließt. Der Ähnlichkeitsbereich eines Strahls ist gekennzeichnet durch affine (ähnliche) Temperatur-, Konzentrations- und Geschwindigkeitsverläufe für verschiedene Abstände vom Strahlursprung.

Preliminary note

The content of this guideline has been developed in strict accordance with the requirements and recommendations of the guideline VDI 1000.

All rights are reserved, including those of reprinting, reproduction (photocopying, micro copying), storage in data processing systems and translation, either of the full text or of extracts.

The use of this guideline without infringement of copyright is permitted subject to the licensing conditions specified in the VDI notices (www.vdi-richtlinien.de).

We wish to express our gratitude to all honorary contributors to this guideline.

Introduction

Engineering-grade calculation methods are increasingly used in the verification of the compliance of complex building projects with fire-protection regulations. The guideline VDI 6019 Part 2 describes the fundamentals and the application limits of these methods. The fire curves of VDI 6019 Part 1 can be used as a basis for dimensioning. The spread of the input variables must be taken into account when evaluating the results.

1 Scope

This guideline applies to the dimensioning of smoke-exhaust ventilation systems, particularly those used in buildings. It shows potential applications and the limits and requirements of the engineering methods for dimensioning. Zone models, CFD models and simulation tests are discussed. Moreover, an analytical calculation method for simple geometries is provided.

The guideline does not deal with safety pressurisation and flushing installations as well as similar systems.

In addition to buildings, this guideline is also applicable to, e. g., subterranean traffic systems (such as tunnels) and vehicles (such as ships).

2 Terms and definitions**Similarity range**

Range of the jet flow downstream of the jet formation range. The similarity range of a jet is characterised by affine (similar) temperature, concentration and velocity curves for various distances from the jet origin.

Mischströmung

Raumströmungsmuster, das geprägt wird durch eine impulsbehaftete Zuluft einbringung. Kennzeichnend für Mischströmungen sind homogene Temperatur- und Konzentrationsfelder im Raum.

Rauchabschnitt

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

Strahlformierungsbereich

Bereich einer Strahlströmung in der Nähe des Strahlursprungs. Bei einem Auftriebsstrahl (Plume) kann die Länge des Strahlformierungsbereichs mit $2 \times D_B$ abgeschätzt werden (D_B = Durchmesser der Wärmequelle).

Tracergas

Innerhalb von Strömungsversuchen verwendetes (luftfremdes) Gas, das eingesetzt wird, um räumliche Konzentrationsfelder zu ermitteln.

Quellterm

Innerhalb der strömungsmechanischen Grundgleichungen (Massenerhaltung, Impulserhaltung, Energieerhaltung) beschreiben Quellterme die „Entstehung“ einer Erhaltungsgröße (z.B. Masse) in einem Strömungsgebiet.

3 Formelzeichen

In dieser Richtlinie werden die nachfolgend aufgeführten Formelzeichen verwendet:

Formelzeichen	Bezeichnung	Einheit
A	Fläche	m^2
A_{Br}	Brandfläche	m^2
A_{geo}	geometrische Fläche	m^2
A_i	i -te Fläche (z.B. von Wänden)	m^2
A_{lichte}	freie bzw. lichte Öffnungsfläche	m^2
A_R	Rauchabschnittsfläche	m^2
a_s	Ausspülgrad	–
A_w	aerodynamisch wirksame Fläche	m^2
Ar	Archimedes-Zahl	–
b	Breite der Wandöffnung	m
C_1	Induktionskoeffizient	$kg/(m^{5/2}s)$
C_2	Induktionskoeffizient	$kg(kW s^3 m^5)^{-1/3}$

Mixed flow

Flow pattern forming in a room as the result of the momentum carried by the inlet air. Mixed flows are characterised by homogeneous temperature and concentration fields in the room.

Smoke zone

Area in a room confined by smoke barriers or building elements underneath the ceiling, which will prevent the horizontal spread of smoke gases in the event of fire.

Jet formation range

Area of a jet flow close to the jet origin. In the case of a thermal updraught (plume), the length of the jet formation range can be estimated to be $2 \times D_B$ (D_B = diameter of the heat source).

Tracer gas

(Foreign) gas used in flow tests for the determination of concentration fields.

Source term

Within fluid-mechanical governing equations (conservation of mass, conservation of momentum, conservation of energy), source terms describe the “origin” of a conserved quantity (such as mass) in a flow field.

3 Symbols

The following symbols are used throughout this guideline:

Symbol	Designation	Unit
A	area	m^2
A_{Br}	area on fire	m^2
A_{geo}	geometrical area	m^2
A_i	i -th surface area (of, e.g., walls)	m^2
A_{lichte}	clear surface area of an opening	m^2
A_R	surface area of smoke reservoir	m^2
a_s	relative dilution	–
A_w	aerodynamic free area	m^2
Ar	Archimedes number	–
b	width of wall opening	m
C_1	induction coefficient	$kg/(m^{5/2}s)$
C_2	induction coefficient	$kg(kW s^3 m^5)^{-1/3}$

Formelzeichen	Bezeichnung	Einheit	Symbol	Designation	Unit
c^n	Konzentration	g/g	c^n	concentration	g/g
c_{v0}	Durchflussbeiwert (ohne Windeinfluss)	–	c_{v0}	flow coefficient (ignoring wind effects)	–
$c_{p,B}$	Bezugswärme- kapazität	kJ/(kg K)	$c_{p,B}$	reference heat capacity	kJ/(kg K)
$c_{p,Rauch}$	spezifische Wärme- kapazität	kJ/(kg K)	$c_{p,Rauch}$	specific heat capacity	kJ/(kg K)
d	lichte Breite der Absaugstelle	m	d	clear width of exhaust	m
D_{Br}	effektiver Brand- durchmesser	m	D_{Br}	effective diameter of fire	m
E	Erkennungsfaktor	–	E	recognition factor	–
Eu	Euler-Zahl	–	Eu	Euler number	–
g	Erdbeschleunigung	m/s ²	g	gravitational acceler- ation	m/s ²
h	Höhe der Wand- öffnung	m	h	height of wall opening	m
Δh	Dicke der Rauch- schicht an der Ab- saugstelle	m	Δh	thickness of smoke layer near the exhaust	m
H	(Raum-)Höhe	m	H	(room) height	m
H_{eff}	effektiver Heizwert	kJ/g	H_{eff}	effective calorific value	kJ/g
h_{eff}	Höhe zwischen Brandfläche und den Rauchabzugsgeräten bzw. den Ansaugstel- len der Ventilatoren	m	h_{eff}	distance in height be- tween area on fire and smoke-exhaust ventilators or extrac- tion area	m
K	Extinktions- koeffizient	m ⁻¹	K	extinction coefficient	m ⁻¹
k	kinetische Energie der Schwankungs- bewegung	m ² /s ²	k	kinetic energy of oscillation	m ² /s ²
L_B	Bezugslänge	m	L_B	reference length	m
m_{Rauch}	Rauchpartikelmasse	g	m_{Rauch}	smoke-particle mass	g
\dot{m}_{Pl}	Rauchgasmassen- strom (Plume)	kg/s	\dot{m}_{Pl}	smoke-gas mass flow (plume)	kg/s
N_{Zellen}	Zellenanzahl	–	N_{Zellen}	number of cells	–
Pr	Prandtl-Zahl	–	Pr	Prandtl number	–
p	Druck	Pa	p	pressure	Pa
Δp_B	Bezugsdruck- differenz	Pa	Δp_B	reference pressure differential	Pa
\dot{Q}	Gesamt-Wärmefrei- setzungsrate	kW	\dot{Q}	total heat release rate	kW
\dot{Q}_{ab}	abgeführter Wärme- strom	kW	\dot{Q}_{ab}	removed heat flow	kW
\dot{Q}_{konv}	konvektive Wärme- freisetzungsrate	kW	\dot{Q}_{konv}	convective heat release rate	kW
\dot{Q}_{max}	maximale Gesamt- Wärmefreisetzungsr- ate	kW	\dot{Q}_{max}	maximum total heat release rate	kW

Formelzeichen	Bezeichnung	Einheit	Symbol	Designation	Unit
$\dot{Q}_{\text{Str,RS}}$	Strahlungswärme	kW	$\dot{Q}_{\text{Str,RS}}$	radiant heat	kW
$\dot{Q}_{\text{Trans,RS}}$	Transmissionswärme	kW	$\dot{Q}_{\text{Trans,RS}}$	transmitted heat	kW
Re	Reynolds-Zahl	–	Re	Reynolds number	–
S_{vorh}	vorhandene Sichtweite	m	S_{vorh}	actual sight distance	m
S_{zul}	zulässige Sichtweite	m	S_{zul}	permissible sight distance	m
St_r	Strouhal-Zahl	–	St_r	Strouhal number	–
s	Wandschichtdicke	m	s	wall-layer thickness	m
T_B	Bezugstemperatur	K	T_B	reference temperature	K
T_{Rauch}	Rauchtemperatur im Bereich der Brandgasventilatoren	K	T_{Rauch}	smoke temperature near fire-gas fans	K
T_{RS}	Temperatur in der Rauchsicht	K	T_{RS}	temperature in the smoke layer	K
T_{zu}	Zulufttemperatur	K	T_{zu}	inlet-air temperature	K
t_E	Ereigniszeitpunkt	s	t_E	point in time of an event	s
U	Wärmedurchgangskoeffizient	W/(m ² K)	U	thermal transmittance	W/(m ² K)
U_B	Bezugsgeschwindigkeit	m/s	U_B	reference velocity	m/s
$U_{i,\text{eff}}$	effektiver Wärmedurchgangskoeffizient	W/(m ² K)	$U_{i,\text{eff}}$	effective thermal transmittance	W/(m ² K)
V_{Raum}	Raumvolumen	m ³	V_{Raum}	room volume	m ³
\dot{V}_{ab}	abzuführender Rauchgasvolumenstrom	m ³ /s	\dot{V}_{ab}	smoke-gas volume flow to be removed	m ³ /s
$\dot{V}_{\text{ab,masch}}$	Absaugvolumenstrom	m ³ /s	$\dot{V}_{\text{ab,masch}}$	extraction volume flow	m ³ /s
\dot{V}_{zu}	Zuluftvolumenstrom	m ³ /s	\dot{V}_{zu}	inlet-air volume flow	m ³ /s
$\dot{V}_{\text{zu,masch}}$	maschinell zugeführter Zuluftstrom	m ³ /s	$\dot{V}_{\text{zu,masch}}$	mechanical inlet-air flow	m ³ /s
w_{zu}	Zuluftgeschwindigkeit	m/s	w_{zu}	inlet-air velocity	m/s
Y_0	virtueller Ursprung	m	Y_0	virtual origin	m
Y_{eff}	effektive Aufstieghöhe	m	Y_{eff}	effective height of rise	m
y_{Rauch}	Rauchausbeutefaktor	g/g	y_{Rauch}	smoke yield factor	g/g
α	Wärmeübergangskoeffizient	W/(m ² K)	α	heat transfer coefficient	W/(m ² K)
γ_2	Faktor zur Berücksichtigung der Maximaltemperatur im Plume	–	γ_2	factor accounting for the maximum temperature in the plume	–
δ	Strahlungsverlustfaktor	–	δ	radiation loss factor	–
$\Delta \vartheta_B$	Bezugstemperaturdifferenz	K	$\Delta \vartheta_B$	reference temperature differential	K

Formelzeichen	Bezeichnung	Einheit	Symbol	Designation	Unit
ε	turbulente Dissipation	m^2/s^3	ε	turbulent dissipation	m^2/s^3
ζ	Druckverlustbeiwert	–	ζ	pressure-loss coefficient	–
η_B	Bezugviskosität	Pa s	η_B	reference viscosity	Pa s
λ	Wärmeleitfähigkeit	W/(mK)	λ	thermal conductivity	W/(mK)
λ_B	Bezugswärmeleitfähigkeit	W/(mK)	λ_B	reference thermal conductivity	W/(mK)
ν_B	Bezugviskosität	m^2/s	ν_B	reference viscosity	m^2/s
ρ_B	Bezugsdichte	kg/m^3	ρ_B	reference density	kg/m^3
ρ_{zu}	Zuluftdichte	kg/m^3	ρ_{zu}	inlet-air density	kg/m^3
σ_s	spezifischer Extinktionskoeffizient	m^2/g	σ_s	specific extinction coefficient	m^2/g
τ_E	Entfluchtungszeit	s	τ_E	evacuation time	s

4 Brandmodellierung und Brandablauf

4.1 Darstellung von Brandverlaufskurven

Im Rahmen der Festlegung von Brandszenarien für die Bemessung von Anlagen zur Rauchableitung ist es erforderlich, die wesentlichen charakteristischen Brandverlaufskurven einschließlich der brandtechnologischen Kenngrößen zu benennen und darzustellen. Folgende Mindestangaben sind erforderlich:

- zeitlicher Verlauf der Wärmefreisetzungsrate (gesamt und/oder konvektiv)
- zeitliche Entwicklung der Brandfläche
- Angaben zum Brandort (z.B. Eckbereich, Wandbereich, Höhenlage etc.)
- Form der Brandquelle (z.B. horizontale Brandfläche, Regalbrand, Lkw-Brand)
- bei Verbrennungsmodellen zusätzlich:
 - Angaben zur chemischen Zusammensetzung des gewählten Brandmaterials
 - Angaben zur Verbrennungseffektivität (Ventilationsbedingungen, Lagerungsdichte)
 - Angaben zum Heizwert
 - gegebenenfalls Angaben zur spezifischen Wärmefreisetzungsrate
 - gegebenenfalls Angaben zur spezifischen Abbrandrate
- bei Verbrennungsmodellen und Nachweisen zur Sichtweitenbeschränkung zusätzlich:
 - Angaben zum Rauchpotenzial (z.B. Rußausbeutefaktor, optische Dichte pro Meter etc.)
 - Angaben zu den optischen Raucheigenschaften (z.B. spez. Extinktionskoeffizient)
 - Angaben zu lichttechnischen Parametern und relevanten Sehobjekten (z.B. Erkennungsfaktor von Fluchtwegpiktogrammen)

4 Fire modelling and fire development

4.1 Representation of fire curves

In specifying fire scenarios for the dimensioning of smoke-exhaust ventilation systems, it is necessary to identify and represent the principal characteristic fire curves including the fire-technical parameters. The following minimum information shall be provided:

- time history of heat release rate (total and/or convective)
- development over time of the area of fire
- details of the fire site (e.g. corner region, wall region, altitude, etc.)
- shape of fire source (e.g. horizontal area on fire, shelves on fire, truck on fire)
- additionally, for combustion models:
 - chemical composition of the selected material to be burnt
 - effectiveness of combustion (ventilation conditions, compactness)
 - calorific value
 - specific heat release rate, if necessary
 - specific mass burning rate, if necessary
- additionally, for combustion models and for verifications of limited sight distance:
 - smoke potential (e.g. soot yield factor, optical density per metre, etc.)
 - optical properties of the smoke (e.g. specific extinction coefficient)
 - light-technical parameters and relevant visual objects (e.g. recognition factor of escape-route pictograms)

Anmerkung: Zur Beurteilung von toxischen Konzentrationen im Bereich der raucharmen Schicht stehen unterschiedliche Methoden zur Verfügung. Die meisten Prognosemodelle für die Rauchgastoxizität basieren auf dem Konzept der fraktionellen effektiven Dosis (engl. fractional effective dose, FED) bzw. fraktionellen effektiven Konzentration (engl. fractional effective concentration, FEC), die auf Inkapazitation (Fluchtunfähigkeit) zu beziehen sind. Diesbezüglich finden sich Angaben u. a. in ISO 13571 und [9]. Derartige Nachweise sind in dieser Richtlinie nicht enthalten

Note: Various methods are available for evaluating toxic concentrations in the smokeless layer. Most models for predicting smoke-gas toxicity are based on the concepts of fractional effective dose (FED) or fractional effective concentration (FEC), which must be related to incapacitation (inability to escape). Pertinent information is given, among others, in ISO 13571 and [9]. Such verification methods are not included in this guideline.

4.2 Beschreibung der brandschutztechnischen Interaktionen

Zur Beschreibung der Funktion des Entrauchungssystems und zur Verdeutlichung der Interaktionen mit dem angesetzten Bemessungsbrand sind die jeweiligen zeitlichen Eingabegrößen darzustellen, z. B. in Form eines Zeitstrahls. Bei der Wahl der Eingabegrößen sind insbesondere charakteristische Kenngrößen aus den Brandverlaufskurven nach VDI 6019 Blatt 1 zu beachten.

4.2 Description of relevant fire-protection interactions

For a description of the smoke-exhaust ventilation system and for illustration of the interactions with the design fire in question, the respective chronological input parameters shall be represented, e. g. in the form of a time bar. In selecting the input parameters, take into account particularly the characteristic parameters from the fire curves of VDI 6019 Part 1.

Folgende Mindestangaben sind erforderlich:

The following minimum information shall be provided:

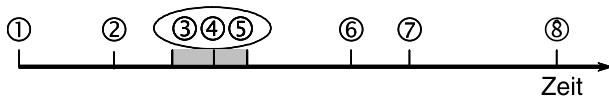
- a) Zeitpunkt der Initialbrandentstehung (in der Regel $t = 0$)
- b) Die Branddetektionszeit, die die Zeit von der Brandentstehung bis zur visuellen oder automatischen Brandentdeckung beschreibt. Sie ist gleichzusetzen mit der Zeit bis zur Brandmeldung gemäß Tabelle 3 aus Abschnitt 3.4.5 der Richtlinie VDI 6019 Blatt 1. Sofern durch andere geeignete Verfahren (z. B. Modelle zur Auslösung von Rauchmeldern) eine kürzere Branddetektionszeit nachgewiesen wird, kann diese herangezogen werden.
- c) Zeitpunkt der Wirksamkeit des Entrauchungssystems (Rauchabzüge bzw. Entrauchungsöffnungen, Brandgasventilatoren, mobile Rauchschürzen, Zuluftöffnungen etc.)
- d) Aktivierungszeitpunkt einer automatischen Löschanlage
- e) Zeitpunkt der Brandbekämpfung durch die Feuerwehr. Dieser Zeitpunkt wird bestimmt nach VDI 6019 Blatt 1, Abschnitt 3.4.5.

- a) point in time of outbreak of initial fire (typically $t = 0$)
- b) Fire detection time describing the time elapsing from the outbreak of fire to visual or automatic fire detection. It shall be equal to the time until fire alarm as per Table 3 in Section 3.4.5 of guideline VDI 6019 Part 1. A shorter fire detection time can be used where proof of it can be furnished by means of other appropriate methods (e. g. models for the activation of smoke detectors).
- c) point in time of the smoke-exhaust ventilation system becoming effective (smoke exhausts or smoke-vent openings, fire-gas fans, mobile smoke curtains, inlet-air openings, etc.)
- d) point in time of activation of an automatic fire-extinguishing system
- e) Point in time when the fire brigade begins fire-fighting. This point in time shall be determined in accordance with VDI 6019 Part 1, Section 3.4.5.

Der zeitliche Ablauf der einzelnen brandschutztechnisch relevanten Interaktionen ist schutzzielabhängig mindestens darzustellen bis zum Beginn von Brandbekämpfung und Fremdrettung durch die Feuerwehr bzw. bis zur Beendigung der Entfluchtung.

Depending on the protection goal, the time course of the individual relevant fire-protection interactions shall be represented at least up to the onset of fire-fighting and rescuing by the fire brigade or until completion of evacuation.

Beispiel zur Darstellung eines Zeitstrahls:



- ① Brandentstehung
- ② Branddetektion (einschließlich Brandmeldung und Alarmierung der Feuerwehr)
- ③ vollständige Öffnung von allen Rauchabzügen abgeschlossen
- ④ alle mobilen Rauchschürzen in Endstellung
- ⑤ vollständige Öffnung aller Zuluftöffnungen abgeschlossen
- ⑥ Auslösung Sprinkleranlage
- ⑦ Entfluchtung des Gebäudes abgeschlossen
- ⑧ manuelle Brandbekämpfung durch Feuerwehr

5 Allgemeine Hinweise für die Planung von Entrauchungssystemen

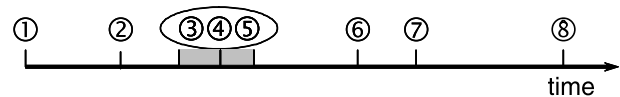
Um zu verhindern, dass Brandrauch in den Raumbereich, der im Schutzziel definiert ist, zurückströmt, sind folgende Maßnahmen vorzusehen:

- Beim Betrieb von raumluftechnischen Anlagen ist sicherzustellen, dass über die Zuluft kein Rauch verteilt wird. Dazu ist der Umluft- oder Mischluftbetrieb im Brandfall auszuschalten. Raumluftechnische Anlagen, deren Zuluft- oder Abluftführung im Raum der Rauchableitung und der Sicherstellung der Einhaltung der Schutzziele entgegenwirken, sind unverzüglich außer Betrieb zu nehmen.
- Andere strömungstechnische Anlagen (z. B. Heizgebläse), die Volumenströme mit Strömungsgeschwindigkeiten von mehr als 1 m/s in die Rauchschicht einleiten, sind unverzüglich abzustellen.
- Gegebenenfalls sind unverzüglich Rauchabschnittsgrenzen zu aktivieren.
- Im bodennahen Bereich sind ausreichend große Nachströmöffnungen mit einer Nachströmgeschwindigkeit von ≤ 1 m/s sicherzustellen.

In Räumen von weniger als 3 m Höhe wird sich im Regelfall keine ausreichend große raucharme Schicht ausbilden können, wie es zur Entfluchtung, Rettung und zum Löschangriff erforderlich ist. Hier sind dann gegebenenfalls spezielle Entrauchungskonzepte vorzusehen.

In Räumen, in denen sich Temperatursperrschichten ausbilden können, z. B. unter großen Dachverglasungen, werden die Rauchgase erst dann die Decke erreichen, wenn ein Temperatúrausgleich zwischen den Rauchgasen und der Sperrschicht eingetreten ist. Erst dann können im Deckenbereich installierte automatische Melder detektieren und die Entrauchung aktiviert werden.

Example of time-bar representation:



- ① outbreak of fire
- ② fire detection (including fire call and alarming of the fire brigade)
- ③ all smoke-exhaust ventilators are fully open
- ④ all mobile smoke barriers in end position
- ⑤ all inlet-air openings fully open
- ⑥ activation of sprinkler system
- ⑦ evacuation of building completed
- ⑧ manual firefighting by the fire brigade

5 General guidance on planning of smoke-exhaust ventilation systems

The following precautions shall be taken to prevent any backflow of fire smoke into the room area defined by the protection goal:

- When operating air-conditioning systems, make sure to prevent the distribution of smoke via the inlet air. To this end, the recirculated- or mixed-air mode of operation shall be shut off in the event of fire. Any air-conditioning systems whose inlet- or extract-air routing in the room counteracts smoke removal and impedes compliance with the protection goal shall be disconnected immediately.
- Other fluidic systems (such as heater blowers) introducing volume flows into the smoke layer at flow velocities in excess of 1 m/s shall be disconnected immediately.
- Where required, smoke-zone barriers shall be activated immediately.
- Sufficiently large openings for make-up air, allowing make-up air velocities ≤ 1 m/s shall be provided near the floor.

Room heights of less than 3 m will usually forbid the formation of a sufficiently large smokeless layer, which is prerequisite to evacuation, rescue and firefighting activities. Special smoke-removal concepts will then have to be developed.

In rooms in which the formation of temperature barrier layers is possible, e. g. underneath large roof glazing systems, the smoke gases will not reach the ceiling until temperature equalisation between the smoke gases and the barrier layer occurs. It is only then that automatic detectors installed in the ceiling can detect the smoke and that smoke-exhaust ventilation can be activated.

Temperatursperrschichten, z.B. unter großen Dachglaskonstruktionen, gelten als unkritisch, wenn eine Permanentlüftung mit Öffnungen nach außen von mindestens 1 % der Glasfläche vorhanden ist.

Wenn kritische Temperatursperrschichten zu erwarten sind, sind unterhalb dieser Sperrschicht automatische Melder (z.B. Linearmelder) für eine frühzeitige automatische Aktivierung des Entrauchungssystems zu empfehlen.

Das Entrauchungssystem wird zunächst dimensioniert auf der Basis hochenergetischer Brände (vergleiche Abschnitt 8 bis Abschnitt 11). Anschließend ist die Rauchausbreitung bei einer niedrigenergetischen Brandphase zu untersuchen (Abschnitt 6 und Abschnitt 9 bis Abschnitt 11). Mit diesem Ergebnis ist gegebenenfalls die Dimensionierung anzupassen.

6 Nachweis für die niedrigenergetische Brandphase

Sollen Räume mit einer natürlichen Rauchabzugsanlage (NRA) entraucht werden, so gilt es bei der Projektierung zu prüfen, ob sich bei einem niedrigenergetischen Brand im Sinne von VDI 6019 Blatt 1 eine stabile Rauchschicht bilden kann, oder ob gegebenenfalls zusätzliche Maßnahmen zur Rauchabführung erforderlich sind. Dieser Nachweis kann mit Ingenieurmethoden nach Abschnitt 9 bis Abschnitt 11 oder mit dem nachfolgend beschriebenen vereinfachten Verfahren geführt werden.

6.1 Vereinfachtes Nachweisverfahren für niedrigenergetische Brände (Brandphase 1 kW bis 100 kW)

Eine mögliche Störung der Rauchschichtbildung ist immer dann besonders zu untersuchen, wenn vor Aktivierung der NRA die mittlere Rauchgastemperatur in der Rauchschicht weniger als 1 K über der mittleren Raumtemperatur liegt. Die mittlere Rauchgastemperatur der Rauchschicht berechnet sich nach Gleichung (16), wobei für die maximale Gesamt-Wärmefreisetzungsrate $\dot{Q} = 100$ kW angesetzt wird. Der zeitliche Verlauf der Wärmefreisetzungsrate sowie die Berechnung der Brandfläche ist VDI 6019 Blatt 1 zu entnehmen.

Wenn die nach Gleichung (16) berechnete mittlere Rauchgastemperatur weniger als 1 K oberhalb der mittleren Raumtemperatur liegt, muss davon ausgegangen werden, dass ein erhöhter Raucheintrag in den unteren Raumbereich stattfindet. Für die weitere Berechnung gilt vereinfachend, dass sich bei solchen niedrigenergetischen Brandereignissen der Rauch

Temperature barrier layers, e.g. underneath large roof glazing systems, are not considered critical if permanent ventilation is provided through openings to the outside, covering at least 1 % of the glazed surface area.

Where critical temperature barrier layers are to be expected, the installation of automatic detectors (e.g. linear detectors) underneath this barrier layer is recommended to allow early automatic activation of the smoke-exhaust ventilation system.

The smoke-exhaust ventilation system is first dimensioned on the basis of high-energy fires (see Section 8 to Section 11). Then, the smoke spread at a low-energy fire stage shall be investigated (Section 6 and Section 9 to Section 11). Depending on the result, the dimensioning may have to be adapted accordingly.

6 Verification method for the low-energy fire stage

Where rooms are designed for natural smoke ventilation systems, it must be checked at the planning stage whether a stable smoke layer can be formed in the event of a low-energy fire as defined in VDI 6019 Part 1 or if additional smoke-removal measures may be required. This verification can be carried out applying engineering methods in accordance with Section 9 to Section 11, or using the simplified method described below.

6.1 Simplified verification method for low-energy fires (fire stage 1 kW to 100 kW)

The possibility of disturbed smoke-layer formation shall be investigated, in particular, whenever the mean smoke-gas temperature within the smoke layer exceeds the mean room temperature by less than 1 K before the natural smoke-exhaust ventilation system is activated. The mean smoke-gas temperature of the smoke layer is calculated using Equation (16), where a maximum total heat release rate of $\dot{Q} = 100$ kW is assumed. The development over time of the heat release rate and the calculation of the area on fire can be taken from VDI 6019 Part 1.

If the mean smoke-gas temperature calculated using Equation (16) exceeds the mean room temperature by less than 1 K, an increased volume of smoke must be assumed to be introduced into the lower room region. For the sake of simplification, it is assumed for further calculation that in such low-energy fire events, the smoke is distributed over the room evenly (analo-

gleichmäßig im Raum verteilt (Analogie zum Einzonenmodell), dass die Höhe der anzusetzenden Wandflächen zur Bestimmung von Wärmeverlusten mit der Plume-Aufstiegshöhe korreliert und dass für die Berechnung der mittleren Rauchgastemperatur eine Plume-Aufstiegshöhe von der Brandfläche bis zur Decke angesetzt wird.

Es ist rechnerisch nachzuweisen, dass bis zu einem bestimmten Ereigniszeitpunkt t_E , wie

- der Abschluss der Entfluchtung oder
- der Abschluss der Fremdrettung oder
- der Beginn des Löschangriffs oder
- der Beginn zusätzlicher Entrauchungsmaßnahmen,

eine Mindestsichtweite S_{zul} nicht unterschritten wird.

Anmerkung: Der Nachweis des notwendigen Zeitbedarfs (z.B. nach VDMA-Merkblatt „Entrauchung von Räumen im Brandfall – Notwendige Zeiten für Entfluchtung, Rettung, Löschangriff; FV ALT im VDMA, Frankfurt, Ausgabe 2005-03) ist nicht Gegenstand dieser Richtlinie und muss gesondert geführt werden.

Der Nachweis der Sichtweite gilt als erfüllt, wenn diese am Ende des notwendigen Zeitbedarfs mindestens der für diesen Raum maximal zulässigen Rettungsweglänge entspricht. Die Sichtweiten beziehen sich grundsätzlich auf das Erkennen von Sicherheitszeichen am nächstgelegenen Ausgang. Es gilt:

$$S_{\text{vorh}} \geq S_{\text{zul}} \quad \text{mit} \quad S_{\text{vorh}} = \frac{E}{K} \quad (1)$$

$$K = \sigma_s \frac{m_{\text{Rauch}}}{V_{\text{Raum}}} \quad (2)$$

wobei die Anwendung dieses Verfahrens $K \leq 0,25 \text{ m}^{-1}$ voraussetzt.

Dabei ist

S_{vorh} vorhandene Sichtweite in m
 S_{zul} zulässige Sichtweite in m, entspricht der minimal zulässigen Rettungsweglänge

E Erkennungsfaktor
 K Extinktionskoeffizient in m^{-1}
 σ_s spezifischer Extinktionskoeffizient in m^2/g
 m_{Rauch} Rauchpartikelmasse im Raum in g
 V_{Raum} Raumvolumen in m^3

Anmerkung: Der maximal zulässige Extinktionskoeffizient wird nach [10] auf $K = 0,25 \text{ m}^{-1}$ festgelegt, um den Einfluss reizender Rauchgaskomponenten, die insbesondere Tränenfluss hervorrufen (z.B. Chloride), zu begrenzen. Unter Berücksichtigung des Erkennungsfaktors $E = 5$ (gilt für hinterleuchtete Rettungswegzeichen nach DIN 4844) ergibt sich daraus eine Mindestsichtweite von 20 m. Ein höher angesetzter Erkennungsfaktor E für Sicherheitszeichen muss gesondert nachgewiesen werden, z. B. nach [11].

gous to the one-zone model), that the height of the wall surfaces to be considered for determining heat losses is correlated with the height of rise of the plume, and that for calculating the mean smoke-gas temperature, a height of rise of the plume extends from the area on fire to the ceiling.

It shall be verified, by way of calculation, that up to a specific point in time of an event, t_E , such as

- the completion of evacuation or
- the completion of rescue activities by the fire brigade or
- the onset of firefighting or
- the onset of additional smoke removal measures,

the sight distance does not fall short of a minimum sight distance, S_{zul} .

Note: The verification of the times required (e.g. in accordance with the VDMA bulletin “Removal of smoke from rooms in the event of fire – Times required for evacuation, rescue, firefighting”; FV ALT within VDMA, Frankfurt, 2005-03 edition, available in German only) is not included in the scope of this guideline and must be carried out separately.

The sight distance is considered verified if, after the required time has elapsed, it equals at least the maximum permissible length of rescue route for the room in question. The sight distances always refer to the recognition of safety signs at the nearest exit. The following holds:

$$S_{\text{vorh}} \geq S_{\text{zul}} \quad \text{mit} \quad S_{\text{vorh}} = \frac{E}{K} \quad (1)$$

$$K = \sigma_s \frac{m_{\text{Rauch}}}{V_{\text{Raum}}} \quad (2)$$

Note that this method requires $K \leq 0,25 \text{ m}^{-1}$.

where

S_{vorh} actual sight distance, in m
 S_{zul} permissible sight distance, in m, corresponding to the minimum permissible length of rescue route

E recognition factor
 K extinction coefficient, in m^{-1}
 σ_s specific extinction coefficient, in m^2/g
 m_{Rauch} smoke-particle mass in the room, in g
 V_{Raum} room volume, in m^3

Note: In accordance with [10], the maximum permissible extinction coefficient is specified to be $K = 0,25 \text{ m}^{-1}$ so as to limit the effect of irritant smoke-gas components that cause, in particular, lacrimation (e.g. chlorides). Considering a recognition factor $E = 5$ (valid for back-lit rescue-route signs as per DIN 4844), this yields a minimum sight distance of 20 m. If a higher recognition factor E for safety signs is to be assumed, the respective proof must be furnished separately, e.g. according to [11].

Die freigesetzte Rauchpartikelmasse berechnet sich unter Berücksichtigung der in Tabelle 1 aufgeführten brandtechnologischen Kenngrößen wie folgt:

$$m_{\text{Rauch}} = 1,67 \cdot 10^{-3} \cdot \dot{Q}_{\text{max}} \cdot \frac{y_{\text{Rauch}}}{H_{\text{eff}}} \cdot t_{\text{E}}^2 \cdot \frac{1}{s} \quad (3)$$

für $t_{\text{E}} \leq t_0 + 300 \text{ s}$

$$m_{\text{Rauch}} = \dot{Q}_{\text{max}} \cdot \frac{y_{\text{Rauch}}}{H_{\text{eff}}} \cdot (150 \text{ s} + (t_{\text{E}} - 300 \text{ s})) \quad (4)$$

für $t_{\text{E}} > t_0 + 300 \text{ s}$

Dabei ist

- y_{Rauch} Rauchausbeutefaktor in g/g nach Tabelle 1
- H_{eff} effektiver Heizwert in kJ/g nach Tabelle 1
- \dot{Q}_{max} maximale Gesamt-Wärmefreisetzungsrates in kW in der niedrigerenergetischen Brandphase
- t_{E} Ereigniszeitpunkt in s
- t_0 Zeitpunkt der Initialbrandentstehung

Anmerkung: Die zu berechnenden Sichtweiten sind abhängig vom Rauchausbeutefaktor, den optischen Raucheigenschaften (Extinktionskoeffizient) und der Verbrennungseffektivität (Heizwert). Nachfolgend sind entsprechende brandtechnologische Kenngrößen für drei verschiedene Brandmaterialien aufgeführt, die ein geringes, mittleres oder hohes Rauchpotenzial charakterisieren. Sofern keine näheren Stoffangaben bekannt sind oder das Rauchpotenzial nicht abgeschätzt werden kann, ist das hohe Rauchpotenzial nach Tabelle 1 anzusetzen.

The smoke-particle mass released is calculated taking into account the fire-technical parameters listed in Table 1, as follows:

$$m_{\text{Rauch}} = 1,67 \cdot 10^{-3} \cdot \dot{Q}_{\text{max}} \cdot \frac{y_{\text{Rauch}}}{H_{\text{eff}}} \cdot t_{\text{E}}^2 \cdot \frac{1}{s} \quad (3)$$

for $t_{\text{E}} \leq t_0 + 300 \text{ s}$

$$m_{\text{Rauch}} = \dot{Q}_{\text{max}} \cdot \frac{y_{\text{Rauch}}}{H_{\text{eff}}} \cdot (150 \text{ s} + (t_{\text{E}} - 300 \text{ s})) \quad (4)$$

for $t_{\text{E}} > t_0 + 300 \text{ s}$

where

- y_{Rauch} smoke yield factor, in g/g, as per Table 1
- H_{eff} effective calorific value, in kJ/g, as per Table 1
- \dot{Q}_{max} maximum total heat release rate, in kW, at the low-energy fire stage
- t_{E} point in time of an event, in s
- t_0 point in time of outbreak of initial fire

Note: The sight distances to be calculated depend on the smoke yield factor, the optical properties of the smoke (extinction coefficient) and effectiveness of combustion (calorific value). Appropriate fire-technical parameters are listed below for three different materials to be burnt, representing a low, medium or high smoke potential. A high smoke potential according to Table 1 has to be assumed where further material details are unknown or the smoke potential cannot be estimated.

Tabelle 1. Brandtechnologische Kenngrößen zur Beschreibung des Rauchpotenzials

Rauchpotenzial	Charakteristischer Stoff	Rauchausbeutefaktor · (effektiver Heizwert) ⁻¹ (y_{Rauch} in g/g) · (H_{eff} in kJ/g) ⁻¹	Effektiver Heizwert ^{*)} H_{eff} in kJ/g	Rauchausbeutefaktor ^{*)} y_{Rauch} in g/g	Spezifischer Extinktionskoeffizient σ_s in m ² /g
gering	Holz	$1,2 \cdot 10^{-3}$	13	0,015	6
mittel	Polystyrol	$6,1 \cdot 10^{-3}$	26	0,16	10 ^{**)}
hoch	PVC	$10,0 \cdot 10^{-3}$	10	0,10	10 ^{**)}

*) abgeleitet aus [8]
**) nach ISO 13571

Table 1. Fire-technical parameters describing the smoke potential

Smoke potential	Characteristic material	Smoke yield factor · (effective calorific value) ⁻¹ (y_{Rauch} in g/g) · (H_{eff} in kJ/g) ⁻¹	Effective calorific value ^{*)} H_{eff} in kJ/g	Smoke yield factor ^{*)} y_{Rauch} in g/g	Specific extinction coefficient σ_s in m ² /g
low	wood	$1,2 \cdot 10^{-3}$	13	0,015	6
medium	polystyrene	$6,1 \cdot 10^{-3}$	26	0,16	10 ^{**)}
high	PVC	$10,0 \cdot 10^{-3}$	10	0,10	10 ^{**)}

*) derived from [8]
**) as per ISO 13571

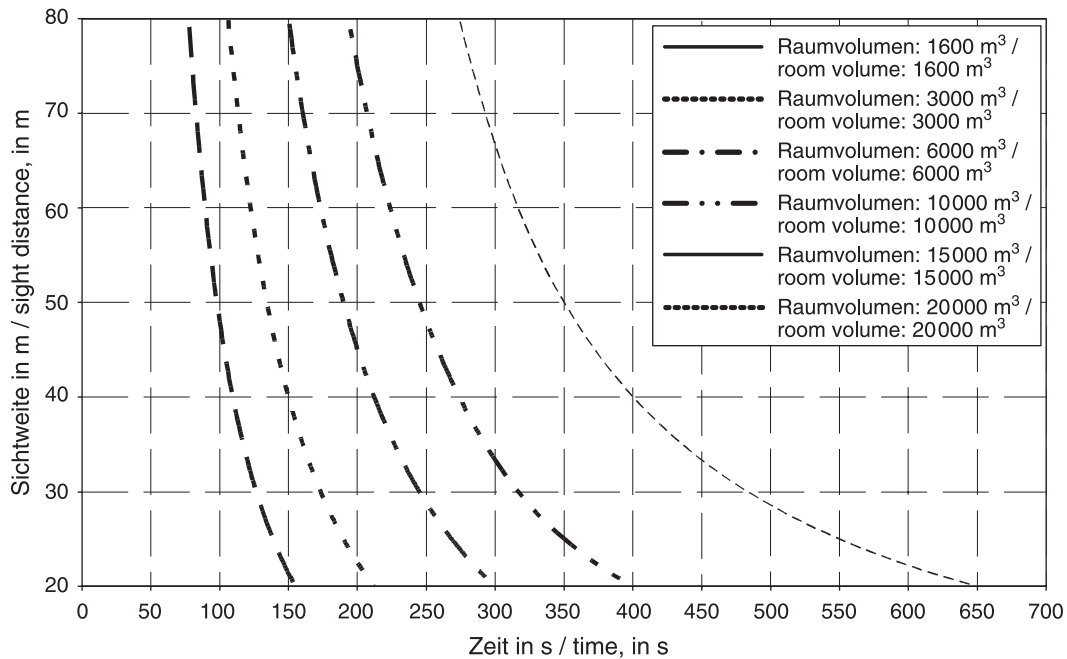


Bild 1. Zeitliche Abnahme der Sichtweite (niedrigenergetische Brandphase bis 100 kW)

Figure 1. Development over time of the sight distance (low-energy fire stage up to 100 kW)

Der Rauchausbeutefaktor repräsentiert die Fraktion des Brennstoffs, die in Partikelmasse umgesetzt wird. Der effektive Heizwert unterscheidet sich vom theoretischen Heizwert, der sich anhand der chemischen Stoffzusammensetzung berechnen lässt, durch Berücksichtigung einer im Brandversuch bestimmten Verbrennungseffektivität. Die hier angesetzten spezifischen Extinktionskoeffizienten gelten für polychromatisches Licht.

In Bild 1 ist unter Berücksichtigung der Gesamt-Wärmefreisetzungsrate für den niedrigenergetischen Brand nach Richtlinie VDI 6019 Blatt 1 mit $\dot{Q} = 100$ kW nach 5 min, eines hohen Rauchpotenzials und eines Erkennungsfaktors $E = 5$ die Zeit einer ausreichenden Sichtweite abzulesen.

6.2 Zusatzaßnahmen

Kann der Nachweis einer ausreichenden Mindestsichtweite nicht geführt werden, sind geeignete Zusatzaßnahmen z.B. in Form einer unterstützenden mechanischen Rauchabführung erforderlich, um den Verdünnungseffekt zu gewährleisten.

Anmerkung: Geeignete Zusatzaßnahmen können z.B. darin bestehen, dass in natürlichen Rauch- und Wärmebezugsgeräten (NRWG) geeignete Ventilatoren integriert sind, die in der niedrigenergetischen Anfangsphase die Entrauchung maschinell einleiten. Bei im Brandfall zunehmenden Temperaturdifferenzen wird dann, nachdem der thermische Auftrieb die führende Entrauchungskraft darstellt, keine weitere Anforderung mehr an diese Ventilatoren gestellt.

The smoke yield factor is a measure of the fraction of combustible that is converted into particle mass. The effective calorific value is different from the theoretical calorific value, which can be calculated on the basis of the chemical composition by taking into account the effectiveness of combustion determined in a fire test. The specific extinction coefficients assumed here apply to polychromatic light.

The time required for the establishment of a sufficient sight distance can be read from Figure 1, assuming the total heat release rate for a low-energy fire as per VDI 6019 Part 1, i.e. $\dot{Q} = 100$ kW after 5 min, a high smoke potential and a recognition factor $E = 5$.

6.2 Additional measures

If proof of a sufficient minimum sight distance cannot be furnished, appropriate additional measures shall be required, e.g. in the form of auxiliary mechanical smoke removal, in order to ensure the dilution effect.

Note: Appropriate additional measures may consist, e.g., in integrating into the natural-draught smoke and heat removal system suitable fans for mechanical initiation of smoke removal at the initial, low-energy, stage. As the temperature differences increase in the event of fire, after thermal updraught has become the driving force of smoke removal, no further requirement will then have to be met by these fans.

7 Bewertungsgrößen für die Dimensionierung von Entrauchungseinrichtungen

7.1 Allgemeines

Angestrebtes Ziel bei der Dimensionierung von Einrichtungen zur Entrauchung ist die Aufrechterhaltung einer schutzzielorientierten raucharmen Schicht. An diese Schicht sind Anforderungen geknüpft, die im Folgenden dargestellt werden.

7.2 Bewertungsgrößen

An Bewertungsgrößen werden folgende Mindestanforderungen gestellt:

- 1) Die Raumtemperatur (Lufttemperatur und Strahlungseinfluss) muss in der raucharmen Schicht kleiner 70 °C sein.
- 2) Es ist eine ausreichende Sichtweite, die das Erkennen von Rettungszeichen ermöglicht, zu gewährleisten. Die Sichtweite muss mindestens der Rettungsweglänge (Laufweglänge) entsprechen.

8 Analytisches Berechnungsverfahren für einfache Raumgeometrien

8.1 Einleitung

Für geometrisch einfache Räume und Rauchabschnitte kann die Dimensionierung von üblichen Systemen zur Rauchableitung (natürliche Rauchabzugsanlagen NRA, maschinelle Rauchabzugsanlagen MRA) auf der Basis eines vereinfachten Bemessungsverfahrens erfolgen. Ziel ist es, je nach Entrauchungssystem die Zu- und Abluftflächen bzw. Abluft- und gegebenenfalls Zuluftvolumenströme so zu dimensionieren, dass eine raucharme Schicht für einen vorgegebenen Zeitraum eingehalten werden kann.

Bei der Bemessung nach diesem Verfahren sind grundsätzlich zwei verschiedene Brandverlaufskurven zu berücksichtigen, die eine sehr geringe und eine maximale konvektive Wärmefreisetzungsrate beschreiben. Brandverlaufskurven mit sehr geringen Wärmefreisetzungsraten sind in VDI 6019 Blatt 1 und das Verfahren ist in Abschnitt 6 aufgeführt.

Folgende Randbedingungen sind einzuhalten, damit dieses vereinfachte Verfahren angewendet werden kann:

Geometrische Randbedingungen

- Es wird ein eingeschossiger Rauchabschnitt ohne Zwischenebenen, die zu einer Störung des Plumes führen können, betrachtet.
- Mindesthöhe $h \geq 4,0$ m

7 Evaluation parameters for the dimensioning of smoke-exhaust units

7.1 General

In dimensioning smoke-exhaust units, maintaining a smokeless layer in accordance with the protection goal is aimed for. This layer shall meet requirements as described below.

7.2 Evaluation parameters

Evaluation parameters shall meet the following minimum requirements:

- 1) The room temperature (air temperature and radiation effect) must be less than 70 °C in the smokeless layer.
- 2) A sufficient sight distance, allowing the recognition of rescue signs, must be ensured. The sight distance shall at least equal the length of rescue route (route length).

8 Analytical calculation method for simple room geometries

8.1 Introduction

For rooms and smoke reservoirs of simple geometries, the dimensioning of common systems for smoke extraction (natural smoke extraction systems, mechanical smoke extraction systems) can be carried out on the basis of a simplified dimensioning method. Depending on the smoke-exhaust ventilation system, the inlet-air and extract-air opening surfaces and the extract-air and any required inlet-air volume flows shall be dimensioned in such a manner that a smokeless layer can be maintained for a specified period of time.

Dimensioning on the basis of this method shall always take into account two different fire curves, which describe an extremely low and a maximum convective heat release rate. Fire curves with very low heat release rates are given in VDI 6019 Part 1 and the method is described in Section 6.

The following basic conditions shall be fulfilled for this simplified method to be applied:

Geometrical boundary conditions

- A single-storey smoke reservoir without intermediate levels that might disturb the plume is considered.
- minimum height $h \geq 4,0$ m

- Rauchabschnittsfläche $A_R \leq 1600 \text{ m}^2$
- Abstand zwischen Rauchschürzen und/oder Wänden $\leq 60 \text{ m}$
- Die Rauchabzugsöffnungen bzw. Absaugstellen müssen jeweils annähernd auf einer Höhe liegen.

Sonstige Randbedingungen

- Die Anwendbarkeit des Verfahrens setzt voraus, dass die sich im Betrieb des Bauwerks einstellenden Raumlufttemperaturen an jeder Stelle im Raum kleiner sind als der nach Gleichung (22) berechnete Wert der Rauchgastemperatur (mit $\gamma_2 = 1$). Insbesondere bei natürlich belüfteten Räumen sind hier die Temperaturen im Dachbereich zu prüfen.
- Möglicherweise auftretende Kaltluftabfälle (z.B. durch Transmissionswärmeverluste im Fassaden- oder Dachbereich, Einsatz von Kühldecken), durch die Rauchgase aus der Rauchsicht in den Aufenthaltsbereich zurückgeführt werden können, werden durch dieses Verfahren nicht erfasst.
- Das Berechnungsverfahren berücksichtigt Einflüsse der durch RLT-Anlagen verursachten Strömungsverhältnisse nicht. Deshalb kann die Wirksamkeit der Rauchabführung mit den Berechnungen nur für den Betriebsfall bestätigt werden, in dem im Brandfall die Lüftungsanlagen für den Brandraum abgeschaltet werden.
- Windinduzierte Druckverhältnisse an den Außenflächen des Gebäudes werden bei der Ermittlung von Öffnungsflächen nach diesem Verfahren nicht berücksichtigt. Dieser Umstand ist insbesondere bei der Verteilung von Öffnungsflächen (Nachströmflächen, NRA) zu berücksichtigen.
- Dieses Verfahren kann nur für Brandszenarien herangezogen werden, deren Rauchgasmassenstrom-Berechnung sich innerhalb des angegebenen Anwendungsbereichs befindet.
- Die Höhe der raucharmen Schicht wird unter anderem von der Höhe der Zuluftöffnungen bestimmt (siehe Abschnitt 8.8).
- Das Berechnungsverfahren kann für die Bemessung von NRA oder MRA, jedoch nicht für gemischte Systeme in einem Rauchabschnitt verwendet werden.
- Mit diesem Berechnungsverfahren kann die Zuluftnachführung bei NRA nur auf natürliche, bei MRA sowohl auf natürliche und/oder maschinelle Weise erfolgen.

8.2 Berechnung des Rauchgasmassenstroms

Die Bemessung der erforderlichen Rauchabzugs- und Zuluftflächen bzw. Abluft- sowie Zuluftvolumen-

- smoke-zone surface area $A_R \leq 1600 \text{ m}^2$
- distance between smoke barriers and/or walls $\leq 60 \text{ m}$
- The smoke ventilator openings or extraction areas must all lie at approximately the same level.

Other boundary conditions

- The method can only be applied if the room-air temperatures prevailing anywhere in the room during operation of the building are less than the smoke-gas temperature calculated using Equation (22) (where $\gamma_2 = 1$). The temperatures in the roof area, particularly for naturally ventilated rooms must be checked.
- Any downdraughts of cold air (caused, e.g., by heat losses due to transmission in the facade or roof area, or by the use of chilled ceilings) which may cause smoke gases from the smoke layer to return into the occupied area, are disregarded by this method.
- The calculation method does not take into account effects of the flow conditions caused by air-conditioning systems. Therefore, these calculations can confirm the effectiveness of smoke removal only for such operating cases where, in the event of fire, the ventilating systems for the room on fire will be disconnected.
- Wind-induced pressure conditions on the outer building surfaces are not considered when using this method to determine surface areas of openings. This fact must be taken into account particularly in the distribution of opening surfaces (openings for make-up air, natural smoke extraction system).
- This method is only applicable for fire scenarios for which the calculated smoke-gas mass flow lies within the specified application range.
- The height of the smokeless layer is determined, among other things, by the height of the inlet-air openings (see Section 8.8).
- The calculation method can be used for the dimensioning of natural or mechanical smoke-exhaust ventilation systems, but not for mixed systems within one smoke reservoir.
- With this calculation method, make-up air for natural-draught smoke removal systems can be supplied only naturally, and both naturally and/or mechanically for mechanical smoke-removal systems.

8.2 Calculation of the smoke-gas mass flow

The required smoke-removal and inlet-air opening surfaces and the extract-air and inlet-air volume

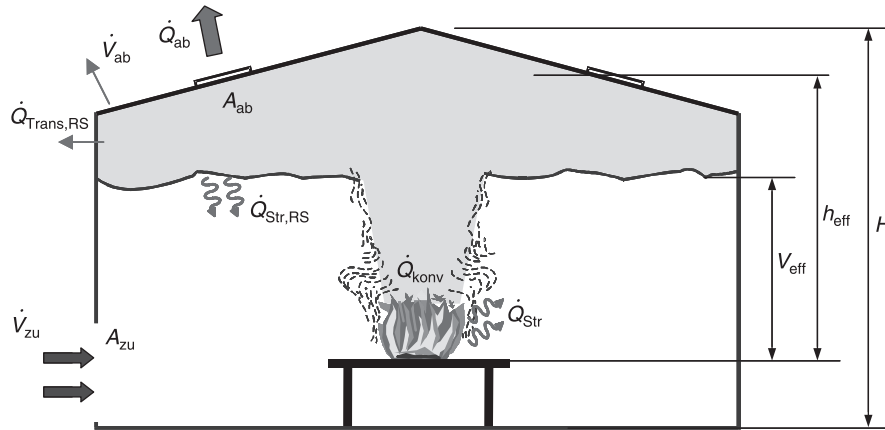


Bild 2. Schematische Darstellung des Brandraums

Figure 2. Schematic of room on fire

ströme erfolgt auf Basis der in VDI 6019 Blatt 1 ermittelten Brandverlaufskurven (Wärmefreisetzungsrate, Brandfläche) und des sich daraus ergebenden Rauchgasmassenstroms \dot{m}_{pl} . Grundsätzlich sind die maximale Wärmefreisetzungsrate und die maximale Brandfläche heranzuziehen. Der Rauchgasmassenstrom beschreibt die Luftströme, die konvektiv durch den Brandherd bewegt und dem Strahl durch Induktion beigemischt werden. Die Massenströme der durch den Verbrennungsvorgang freigesetzten Verbrennungsprodukte, z.B. CO₂, CO und Ruß, sind dabei gegenüber diesen Luftströmen vernachlässigbar. Rauchgase werden daher in diesem Verfahren als kontaminierte heiße Luft behandelt. Für die Berechnung von \dot{m}_{pl} werden die Stoffkonstanten für Luft herangezogen.

Für die Berechnung von \dot{m}_{pl} sind in Abhängigkeit vom Verhältnis der Aufstieghöhe Y_{eff} und der modifizierten Brandfläche $\sqrt{A_{Br}}$ zwei Anwendungsbereiche zu unterscheiden:

Anwendungsbereich 1

mit $\frac{Y_{eff}}{\sqrt{A_{Br}}} \leq 2$ (Strahlformierungsbereich)

Anwendungsbereich 2

mit $\frac{Y_{eff}}{\sqrt{A_{Br}}} > 2$ (Ähnlichkeitsbereich)

Im Anwendungsbereich 1 berechnet sich der Rauchgasmassenstrom, der in die Rauchsicht einströmt, nach

$$\dot{m}_{pl} = C_1 Y_{eff}^{1,5} \sqrt{4\pi A_{Br}} \tag{5}$$

Dabei ist

- \dot{m}_{pl} Rauchgasmassenstrom (Plume) in kg/s
- A_{Br} Brandfläche in m²

flows are dimensioned on the basis of the fire curves (heat release rate, area on fire) determined in VDI 6019 Part 1 and the resulting smoke-gas mass flow, \dot{m}_{pl} . Calculations shall always be based on the maximum heat release rate and the maximum area on fire. The smoke-gas mass flow describes the air flows that move through the seat of fire by convection and mix with the jet through induction. The mass flows of the combustion products released by the combustion process, such as CO₂, CO and soot, are negligible compared to these air flows. Smoke gases are, therefore, treated as contaminated hot air in the context of this method. For the calculation of \dot{m}_{pl} , the material constants of air are used.

For the calculation of \dot{m}_{pl} , two application ranges shall be distinguished, depending on the ratio of height of rise, Y_{eff} , over modified area on fire, $\sqrt{A_{Br}}$:

Application range 1

where $\frac{Y_{eff}}{\sqrt{A_{Br}}} \leq 2$ (jet formation range)

Application range 2

where $\frac{Y_{eff}}{\sqrt{A_{Br}}} > 2$ (similarity range)

In application range 1, the smoke-gas mass flow entering the smoke layer is calculated using

$$\dot{m}_{pl} = C_1 Y_{eff}^{1,5} \sqrt{4\pi A_{Br}} \tag{5}$$

where

- \dot{m}_{pl} smoke-gas mass flow (plume), in kg/s
- A_{Br} area on fire, in m²

Y_{eff} effektive Aufstiegshöhe (Höhe zwischen Brandfläche und Unterkante Rauchschrift) in m

C_1 Induktionskoeffizient, $C_1 = 0,19$ in $\text{kg m}^{-5/2} \text{s}^{-1}$

Der Anwendungsbereich von Gleichung (5) ist durch folgende Randbedingungen abgegrenzt:

- $\frac{Y_{\text{eff}}}{\sqrt{A_{\text{Br}}}} \leq 2$
- Wärmefreisetzungsraten von 8 kW bis 30 MW mit einer flächenbezogenen Wärmefreisetzungsrate zwischen 200 kW/m^2 und 1800 kW/m^2
- effektive Aufstiegshöhe bis 20 m
- runde oder näherungsweise quadratische Brandflächen mit Seitenlängen von 0,2 m bis 4,5 m

Im Anwendungsbereich 2 berechnet sich der Rauchgasmassenstrom nach folgender Gleichung:

$$\dot{m}_{\text{Pl}} = C_2 \dot{Q}_{\text{konv}}^{1/3} (Y_{\text{eff}} - Y_0)^{5/3} \quad (6)$$

mit

$$Y_0 = -1,02 \cdot D_{\text{Br}} + 0,083 \cdot \dot{Q}^{0,4} \quad (7)$$

mit

$$\dot{Q}_{\text{konv}} = 0,7 \dot{Q} \quad (8)$$

Dabei ist

\dot{m}_{Pl} Rauchgasmassenstrom (Plume) in kg/s
 \dot{Q}_{konv} konvektive Wärmefreisetzungsraten in kW
 \dot{Q} Gesamt-Wärmefreisetzungsraten in kW
 Y_{eff} effektive Aufstiegshöhe (Höhe zwischen Brandherdfläche und Unterkante Rauchschrift) in m
 Y_0 virtueller Ursprung in m
 D_{Br} effektiver Branddurchmesser in m
 C_2 Induktionskoeffizient,
 $C_2 = 0,071$ in $\text{kg}(\text{kW s}^3 \text{ m}^5)^{-1/3}$

Der Anwendungsbereich von Gleichung (6) ist durch folgende Randbedingungen abgegrenzt:

- $\frac{Y_{\text{eff}}}{\sqrt{A_{\text{Br}}}} > 2$
- runde oder näherungsweise quadratische Brandflächen
- konstante Temperatur in der Strahlumgebung
- störströmungsfreie (ruhende) Umgebung

8.3 Wärmebilanz der Rauchschrift, Rauchschrifttemperatur

Mit dem nach Gleichung (5) bzw. Gleichung (6) berechneten Rauchgasmassenstrom wird der Wärmestrom \dot{Q}_{konv} in die Rauchschrift transportiert. Für die Wärmebilanz der Rauchschrift ergibt sich

Y_{eff} effective height of rise (height between area on fire and lower edge of smoke layer), in m

C_1 induction coefficient, $C_1 = 0,19$, in $\text{kg m}^{-5/2} \text{s}^{-1}$

The application range of Equation (5) is defined by the following boundary conditions:

- $\frac{Y_{\text{eff}}}{\sqrt{A_{\text{Br}}}} \leq 2$
- heat release rates between 8 kW and 30 MW with area-related heat release rates between 200 kW/m^2 and 1800 kW/m^2
- effective height of rise up to 20 m
- circular or approximately square areas on fire with edge lengths between 0,2 m and 4,5 m

In application range 2, the smoke-gas mass flow is calculated using the following equation:

$$\dot{m}_{\text{Pl}} = C_2 \dot{Q}_{\text{konv}}^{1/3} (Y_{\text{eff}} - Y_0)^{5/3} \quad (6)$$

where

$$Y_0 = -1,02 \cdot D_{\text{Br}} + 0,083 \cdot \dot{Q}^{0,4} \quad (7)$$

where

$$\dot{Q}_{\text{konv}} = 0,7 \dot{Q} \quad (8)$$

where

\dot{m}_{Pl} smoke-gas mass flow (plume), in kg/s
 \dot{Q}_{konv} convective heat release rate, in kW
 \dot{Q} total heat release rate, in kW
 Y_{eff} effective height of rise (height between area on fire and lower edge of smoke layer), in m

Y_0 virtual origin, in m
 D_{Br} effective diameter of fire, in m
 C_2 induction coefficient,
 $C_2 = 0,071$, in $\text{kg}(\text{kW s}^3 \text{ m}^5)^{-1/3}$

The application range of Equation (6) is defined by the following boundary conditions:

- $\frac{Y_{\text{eff}}}{\sqrt{A_{\text{Br}}}} > 2$
- circular or approximately square areas on fire
- constant temperatures in the jet environment
- environment free of disturbing flows (quiescent environment)

8.3 Heat balance of smoke layer, smoke-layer temperature

Along with the smoke-gas mass flow calculated using Equation (5) or Equation (6), the heat flow, \dot{Q}_{konv} is conveyed into the smoke layer. For the heat balance of the smoke layer, the following holds:

$$\dot{Q}_{\text{konv}} = \dot{Q}_{\text{ab}} + \dot{Q}_{\text{Trans,RS}} + \dot{Q}_{\text{Str,RS}} \quad (9)$$

Dabei ist

- \dot{Q}_{konv} konvektive, in die Rauchschiicht transportierte Wärme in kW
- \dot{Q}_{ab} über die Rauchabzugsanlage konvektiv aus der Rauchschiicht abgeführte Wärme in kW
- $\dot{Q}_{\text{Trans,RS}}$ durch Transmission über die Raumschließungsflächen aus der Rauchschiicht abgeführte Wärme in kW
- $\dot{Q}_{\text{Str,RS}}$ durch Strahlung aus der Rauchschiicht abgeführte Wärme in kW

Für die Beschreibung der einzelnen Terme in Gleichung (9) wird vereinfachend vorausgesetzt, dass in der Rauchschiicht eine homogene Temperaturverteilung vorliegt. Ferner wird unterstellt, dass außerhalb der Rauchschiicht die Umgebungstemperatur dem Wert der Zulufttemperatur T_{zu} entspricht.

Für den über die Rauchabzugsanlage abgeführten Wärmestrom \dot{Q}_{ab} gilt

$$\dot{Q}_{\text{ab}} = \dot{m}_{\text{Pl}} c_{p,\text{Rauch}}(T_{\text{RS}} - T_{\text{zu}}) \quad (10)$$

Dabei ist

- \dot{Q}_{ab} über die Rauchabzugsanlage konvektiv aus der Rauchschiicht abgeführte Wärme in kW
- \dot{m}_{Pl} Rauchgasmassenstrom (Plume) in kg/s
- $c_{p,\text{Rauch}}$ spezifische Wärmekapazität in kJ/(kg K)
- T_{RS} Temperatur in der Rauchschiicht in K
- T_{zu} Zulufttemperatur in K

Der über die mit der Rauchschiicht in Berührung stehenden Bauteilflächen (Wände, Decken) abgeführte Wärmestrom $\dot{Q}_{\text{Trans,RS}}$ ergibt sich aus

$$\dot{Q}_{\text{Trans,RS}} = \sum_i U_{i,\text{eff}} A_i (T_{\text{RS}} - T_{\text{zu}}) \quad (11)$$

Dabei ist

- $\dot{Q}_{\text{Trans,RS}}$ durch Transmission über die Raumschließungsflächen aus der Rauchschiicht abgeführte Wärme in kW
- A_i i -te mit der Rauchschiicht in Berührung stehende Bauteilfläche in m^2
- $U_{i,\text{eff}}$ effektiver Wärmedurchgangskoeffizient der i -ten Bauteilfläche in $\text{W}/(\text{m}^2 \text{K})$
- T_{RS} Temperatur in der Rauchschiicht in K
- T_{zu} Zulufttemperatur in K

Der effektive Wärmedurchgangskoeffizient $U_{i,\text{eff}}$ berücksichtigt hierbei Wärmespeichervorgänge in Wand- bzw. Deckenflächen. Nähere Angaben hierzu finden sich z.B. in [6]. Vereinfacht wird $U_{i,\text{eff}}$ unter Verwendung des Wärmedurchgangskoeffizienten U_i gemäß EN ISO 6946 zu

$$\dot{Q}_{\text{konv}} = \dot{Q}_{\text{ab}} + \dot{Q}_{\text{Trans,RS}} + \dot{Q}_{\text{Str,RS}} \quad (9)$$

where

- \dot{Q}_{konv} convective heat conveyed into the smoke layer, in kW
- \dot{Q}_{ab} heat removed from the smoke layer by means of the smoke removal system, in kW
- $\dot{Q}_{\text{Trans,RS}}$ heat removed from the smoke layer by transmission via the surfaces enclosing the room, in kW
- $\dot{Q}_{\text{Str,RS}}$ heat removed from the smoke layer by radiation, in kW

For the description of the individual terms in Equation (9), it is assumed, by way of simplification, that the temperature distribution in the smoke layer is homogeneous. Furthermore, the ambient temperature outside of the smoke layer is assumed to equal the inlet-air temperature, T_{zu} .

For the heat flow, \dot{Q}_{ab} , removed via the smoke removal system:

$$\dot{Q}_{\text{ab}} = \dot{m}_{\text{Pl}} c_{p,\text{Rauch}}(T_{\text{RS}} - T_{\text{zu}}) \quad (10)$$

where

- \dot{Q}_{ab} the heat removed from the smoke layer by convection via the smoke removal system, in kW
- \dot{m}_{Pl} smoke-gas mass flow (plume), in kg/s
- $c_{p,\text{Rauch}}$ specific heat capacity, in kJ/(kg K)
- T_{RS} temperature in the smoke layer, in K
- T_{zu} inlet-air temperature, in K

The heat flow removed via the surfaces of building elements (walls, ceilings) that are in contact with the smoke layer, $\dot{Q}_{\text{Trans,RS}}$, is calculated as

$$\dot{Q}_{\text{Trans,RS}} = \sum_i U_{i,\text{eff}} A_i (T_{\text{RS}} - T_{\text{zu}}) \quad (11)$$

where

- $\dot{Q}_{\text{Trans,RS}}$ heat removed from the smoke layer by transmission via the surfaces enclosing the room, in kW
- A_i area of the i -th building-element surface in contact with the smoke layer, in m^2
- $U_{i,\text{eff}}$ effective thermal transmittance of the i -th building-element surface, in $\text{W}/(\text{m}^2 \text{K})$
- T_{RS} temperature in the smoke layer, in K
- T_{zu} inlet-air temperature, in K

The effective thermal transmittance, $U_{i,\text{eff}}$, here takes into account heat storage processes occurring in wall and ceiling surfaces. Further pertinent information can be found, e.g., in [6]. By way of simplification, using the thermal transmittance, U_i , as per EN ISO 6946, $U_{i,\text{eff}}$ becomes the estimate

$$U_{i,\text{eff}} = 2,5 U_i \tag{12}$$

abgeschätzt. Für den Wärmedurchgangskoeffizienten bei stationärer Wärmeleitung gilt

$$U_i = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{\text{innen},i}} + \sum_j \frac{s_j}{\lambda_j} + \frac{1}{\alpha_{\text{außen},i}}} \tag{13}$$

Dabei ist

- U_i Wärmedurchgangskoeffizient der i -ten Bauteilfläche in $\text{W}/(\text{m}^2 \text{K})$ gemäß EN ISO 6946
- $\alpha_{\text{innen},i}$ Wärmeübergangskoeffizient auf der Innenseite der i -ten Fläche von Bauteilen in $\text{W}/(\text{m}^2 \text{K})$ gemäß EN ISO 6946
- $\alpha_{\text{außen},i}$ Wärmeübergangskoeffizient auf der Außenseite der i -ten Fläche von Bauteilen in $\text{W}/(\text{m}^2 \text{K})$ gemäß EN ISO 6946
- s_j j -te Bauteilschichtdicke in m
- λ_j Wärmeleitfähigkeit der Bauteilschicht mit der Dicke s_j in $\text{W}/(\text{m K})$ gemäß EN ISO 10456 und EN 12524

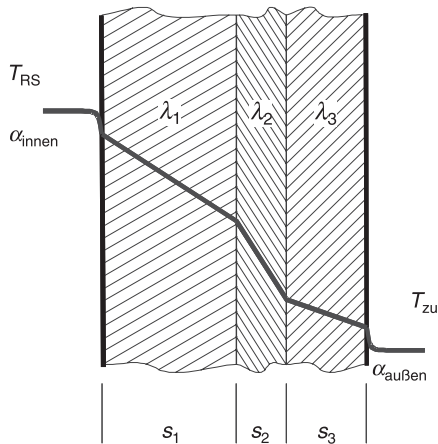


Bild 3. Definition des Wärmedurchgangskoeffizienten

Anhaltswerte für Wärmeleitfähigkeiten finden sich in Tabelle 2 oder in EN 12524. Die Wärmeübergangskoeffizienten α sind von zahlreichen Veränderlichen abhängig (z.B. Strömungsbedingungen an der Wand, Temperatur).

Für Betrachtungen im Sinne dieser Richtlinie ist es ausreichend, wenn mit den abgeschätzten Werten

$$\alpha_{\text{innen},i} \approx 8 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{K}) \quad \text{und} \\ \alpha_{\text{außen},i} \approx 25 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{K})$$

gemäß EN ISO 6946 gerechnet wird.

Die durch Strahlung aus der Rauchschiicht abgeführte Wärme $\dot{Q}_{\text{Str,RS}}$ ist im Wesentlichen abhängig von der Raumgeometrie, den Temperaturverhältnissen und

$$U_{i,\text{eff}} = 2,5 U_i \tag{12}$$

For the thermal transmittance with stationary heat conduction

$$U_i = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{\text{innen},i}} + \sum_j \frac{s_j}{\lambda_j} + \frac{1}{\alpha_{\text{außen},i}}} \tag{13}$$

where

- U_i thermal transmittance of the i -th building-element surface, in $\text{W}/(\text{m}^2 \text{K})$, as per EN ISO 6946
- $\alpha_{\text{innen},i}$ internal heat transfer coefficient of the i -th building-element surface, in $\text{W}/(\text{m}^2 \text{K})$, as per EN ISO 6946
- $\alpha_{\text{außen},i}$ external heat transfer coefficient of the i -th building-element surface, in $\text{W}/(\text{m}^2 \text{K})$, as per EN ISO 6946
- s_j thickness of the j -th building-element layer, in m
- λ_j thermal conductivity of the building-element layer with thickness s_j , in $\text{W}/(\text{m K})$, as per EN ISO 10456 and EN 12524

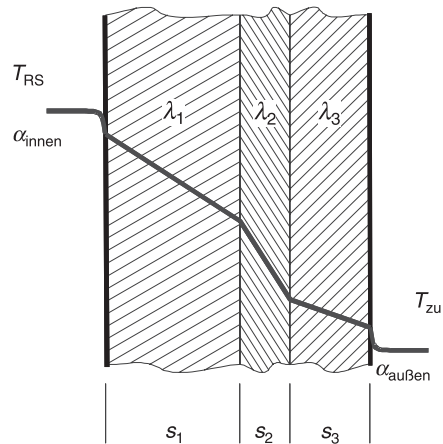


Figure 3. Definition of thermal transmittance

Reference values for thermal conductivities are to be found in Table 2 or in EN 12524. The heat transfer coefficients, α , depend on a multitude of variables (e.g. flow conditions at the wall, temperature).

For calculations in the context of this guideline, it suffices to use the estimates

$$\alpha_{\text{innen},i} \approx 8 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{K}) \quad \text{and} \\ \alpha_{\text{außen},i} \approx 25 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{K})$$

as per EN ISO 6946.

The heat removed from the smoke layer by radiation, $\dot{Q}_{\text{Str,RS}}$, essentially depends on the geometry of the room, the temperature conditions and the so-called

Tabelle 2. Wärmeleitfähigkeit und Wärmedurchgangskoeffizienten verschiedener Bauteile und Bauarten

Stoff	Wärmeleitfähigkeit λ in W/(m K) (Anhaltswert)
Wärmedämmputz nach DIN 18550-3	0,08
Gipskartonplatten nach DIN 18180	0,25
Zement-Estrich	1,4
Normalbeton	2,1
Vollziegel, Hochlochziegel, Füllziegel	0,8
Mauerwerk Kalksandstein	0,79
Hohlblock nach DIN 18151	0,3
Mineralwolle nach EN 13162	0,035
Polystyrolschaum	0,035
Einschaliges wärmegeädämmtes Stahltrapezprofildach	$U = 0,2 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$
Einschaliges Blechdach	$U = 5,0 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$
Rauchschräge aus Glasfasergewebe	$U = 4,5 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$

Table 2. Thermal conductivity and thermal transmittances of various building elements and constructions

Material	Thermal conductivity λ in W/(m K) (reference value)
Thermal-insulation rendering as per DIN 18550-3	0,08
Gypsum plasterboards as per DIN 18180	0,25
Cement screed	1,4
Standard concrete	2,1
Solid brick, honeycomb brick, clay masonry unit for concrete or mortar fill	0,8
Calcium silicate masonry unit	0,79
Hollow block as per DIN 18151	0,3
Mineral wool as per EN 13162	0,035
Polystyrene foam	0,035
Single-leaf thermally insulated trapezoidal sheet steel roof	$U = 0,2 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$
Single-leaf sheet metal roof	$U = 5,0 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$
Smoke curtain of fibre-glass fabric	$U = 4,5 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$

den sogenannten Emissionsgraden. Zur vereinfachten Ermittlung von $\dot{Q}_{\text{Str,RS}}$ kann die empirische Abschätzung

$$\dot{Q}_{\text{Str,RS}} \approx \delta \dot{Q}_{\text{konv}} \tag{14}$$

verwendet werden. Der Strahlungsverlustfaktor der Rauchschräge

$$\delta = 0,031 A_R^{1/3} \tag{15}$$

ist hierbei reduziert auf eine Funktion der Rauchschrägenfläche und kann aus Bild 4 entnommen werden.

emissivities. For a simplified determination of $\dot{Q}_{\text{Str,RS}}$, it is permissible to use the empirical estimate

$$\dot{Q}_{\text{Str,RS}} \approx \delta \dot{Q}_{\text{konv}} \tag{14}$$

with the radiation loss factor of the smoke layer

$$\delta = 0,031 A_R^{1/3} \tag{15}$$

being reduced to a function of the smoke-reservoir surface area, see Figure 4.

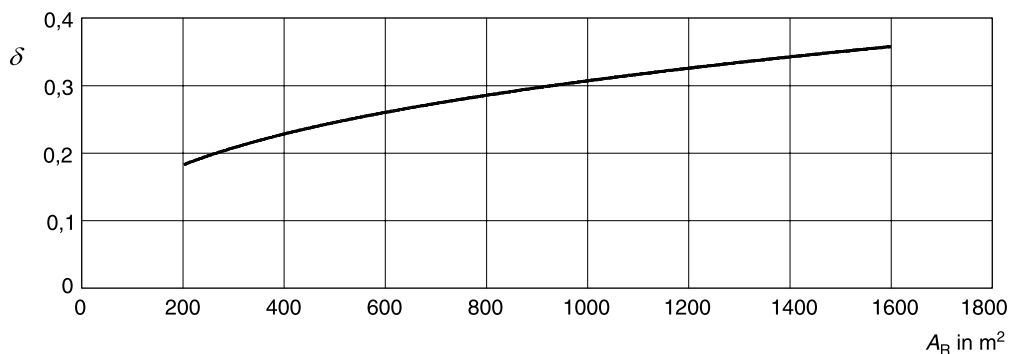


Bild 4. Strahlungsverlustfaktor der Rauchschräge

Figure 4. Radiation loss factor of the smoke layer

Mit den Gleichungen (9) bis (15) ergibt sich für die Temperatur der Rauchschiicht

$$T_{RS} = \frac{(1 - \delta)\dot{Q}_{konv}}{\dot{m}_{pl} c_{p,Rauch} + 0,001 \frac{kW}{W} \sum_i U_{i,eff} A_i} + T_{zu} \quad (16)$$

Dabei ist

\dot{Q}_{konv}	konvektive Wärmefreisetzungsrate in kW
\dot{m}_{pl}	Rauchgasmassenstrom (Plume) in kg/s
$c_{p,Rauch}$	spezifische Wärmekapazität in kJ/(kg K)
T_{RS}	Temperatur in der Rauchschiicht in K
T_{zu}	Zulufttemperatur in K
A_i	i -te mit der Rauchschiicht in Berührung stehende Fläche von Bauteilen in m ²
$U_{i,eff}$	effektiver Wärmedurchgangskoeffizient der i -ten Fläche von Bauteilen in W/(m ² K)

8.4 Berechnung des abzuführenden Rauchgasvolumenstroms

Der Rauchgasvolumenstrom errechnet sich nach Gleichung (17) wie folgt:

$$\dot{V}_{ab} = \dot{m}_{pl} \frac{T_{RS}}{T_{zu} \rho_{zu}} \quad (17)$$

Dabei ist

\dot{V}_{ab}	abzuführender Rauchgasvolumenstrom in m ³ /s
\dot{m}_{pl}	Rauchgasmassenstrom (Plume) in kg/s nach Gleichung (5) bzw. Gleichung (6)
T_{RS}	Temperatur der Rauchschiicht nach Gleichung (16) in K
T_{zu}	Temperatur der einströmenden Zuluft in K
ρ_{zu}	Dichte der einströmenden Zuluft in kg/m ³

Anmerkung: Aus der allgemeinen Gasgleichung folgt:
 $T_{zu} \rho_{zu} = \text{konst.} = 353,18 \text{ K kg/m}^3$

8.5 Berechnung des erforderlichen Zuluftstroms

Aus Kontinuitätsgründen muss der aus Gleichung (17) zu berechnende abzuführende Rauchgasvolumenstrom durch Zuluft ersetzt werden. Der notwendige Zuluftvolumenstrom ergibt sich aus

$$\dot{V}_{zu} = \frac{\dot{m}_{pl}}{\rho_{zu}} \quad (18)$$

Dabei ist

\dot{V}_{zu}	Zuluftvolumenstrom in m ³ /s
\dot{m}_{pl}	Rauchgasmassenstrom (Plume) in kg/s nach Gleichung (5) bzw. Gleichung (6)
ρ_{zu}	Dichte der einströmenden Zuluft in kg/m ³

Der Zuluftstrom ist im Bereich der raucharmen Schicht natürlich und/oder maschinell und impulsarm ($w_{zu} \leq 1,0 \text{ m/s}$) einzubringen.

As a result of Equations (9) through (15), the temperature of the smoke layer is

$$T_{RS} = \frac{(1 - \delta)\dot{Q}_{konv}}{\dot{m}_{pl} c_{p,Rauch} + 0,001 \frac{kW}{W} \sum_i U_{i,eff} A_i} + T_{zu} \quad (16)$$

where

\dot{Q}_{konv}	convective heat release rate, in kW
\dot{m}_{pl}	smoke-gas mass flow (plume), in kg/s
$c_{p,Rauch}$	specific heat capacity, in kJ/(kg K)
T_{RS}	temperature in the smoke layer, in K
T_{zu}	inlet-air temperature, in K
A_i	area of the i -th building-element surface in contact with the smoke layer, in m ²
$U_{i,eff}$	effective thermal transmittance of the i -th building-element surface, in W/(m ² K)

8.4 Calculation of the smoke-gas volume flow to be removed

The smoke-gas volume flow is calculated using Equation (17) as follows:

$$\dot{V}_{ab} = \dot{m}_{pl} \frac{T_{RS}}{T_{zu} \rho_{zu}} \quad (17)$$

where

\dot{V}_{ab}	smoke-gas volume flow to be removed, in m ³ /s
\dot{m}_{pl}	smoke-gas mass flow (plume), in kg/s, as per Equation (5) or Equation (6)
T_{RS}	temperature of smoke layer as per Equation (16), in K
T_{zu}	temperature of inlet air flowing in, in K
ρ_{zu}	density of inlet air flowing in, in kg/m ³

Note: From the general gas equation, it follows:
 $T_{zu} \rho_{zu} = \text{const.} = 353,18 \text{ K kg/m}^3$

8.5 Calculation of the required inlet-air volume flow

For reasons of continuity, the smoke-gas volume flow to be removed, as calculated using Equation (17), must be compensated for by inlet air. The required inlet-air volume flow results as

$$\dot{V}_{zu} = \frac{\dot{m}_{pl}}{\rho_{zu}} \quad (18)$$

where

\dot{V}_{zu}	inlet-air volume flow, in m ³ /s
\dot{m}_{pl}	smoke-gas mass flow (plume), in kg/s, as per Equation (5) or Equation (6)
ρ_{zu}	density of inlet air flowing in, in kg/m ³

In the area of the smokeless layer, air shall be supplied naturally and/or mechanically and with low momentum ($w_{zu} \leq 1,0 \text{ m/s}$).

8.6 Bemessung des Systems zur natürlichen Rauchableitung (NRA)

8.6.1 Bestimmung der Gesamt-Rauchabzugs- und Gesamt-Nachströmflächen (NRA)

Die Berechnung der Rauchabzugs- und Zuluftflächen erfolgt nach Gleichung (19) und Gleichung (20):

$$A_{ab} = \frac{\dot{V}_{ab}}{\bar{c}_{v0,ab}} \cdot \sqrt{\frac{T_{zu}}{2g(T_{RS} - T_{zu})(h_{eff} - Y_{eff}) - \frac{1}{\bar{c}_{v0,zu}^2} w_{zu}^2 T_{RS}}} \tag{19}$$

$$A_{zu} = \frac{1}{w_{zu}} \left(\frac{\dot{m}_{pl}}{\rho_{zu}} - \dot{V}_{zu,masch} \right) \tag{20}$$

Dabei ist

- A_{ab} geometrische Gesamt-Rauchabzugsfläche in m^2
- A_{zu} geometrische Gesamt-Zuluftfläche in m^2
- \dot{V}_{ab} abzuführender Rauchgasvolumenstrom nach Gleichung (17) in m^3/s
- T_{zu} Zulufttemperatur in K
- T_{RS} Temperatur der Rauchsicht nach Gleichung (16) in K
- w_{zu} Strömungsgeschwindigkeit, bezogen auf die geometrische Fläche (Anströmgeschwindigkeit) in m/s
- $\bar{c}_{v0,ab}$ Durchflussbeiwert der Gesamt-Rauchabzugsfläche (ohne Windeinfluss) nach Gleichung (25)
- $\bar{c}_{v0,zu}$ Durchflussbeiwert der Gesamt-Nachströmfläche (ohne Windeinfluss) nach Gleichung (25)
- Y_{eff} effektive Aufstiegshöhe (Höhe zwischen Brandherdfläche und Unterkante Rauchgasschicht) in m
- h_{eff} Höhe zwischen Brandfläche und mittlerer Achse der Rauchabzugsgeräte bzw. der Ansaugstelle der Ventilatoren in m
- ρ_{zu} Dichte der Zuluft in kg/m^3
- $\dot{V}_{zu,masch}$ der raucharmen Schicht maschinell zugeführter Zuluftvolumenstrom in m^3/s

Aufgrund der im Berechnungsverfahren enthaltenen Vereinfachungen ist ein Sicherheitszuschlag sowohl auf die Zuluft- als auch auf die Rauchabzugsfläche (Gleichung (19) und Gleichung (20)) von bis zu 25 % zu empfehlen.

Sowohl in Gleichung (19) als auch in Gleichung (20) findet die Geschwindigkeit in den Zuluftflächen Berücksichtigung. Dieser Wert ist bei der Auslegung frei zu wählen, er soll jedoch eine Größe von $w_{zu} = 1,0$ m/s nicht überschreiten, wenn die Brandherd-

8.6 Dimensioning of the natural smoke-exhaust ventilation system

8.6.1 Determination of the total surface areas of the natural smoke ventilator and inlet-air openings

The surface areas of the smoke-removal and inlet-air openings are calculated using Equation (19) and Equation (20):

where

- A_{ab} total geometrical surface area of the natural smoke ventilator, in m^2
- A_{zu} total geometrical surface area of the inlet air, in m^2
- \dot{V}_{ab} smoke-gas volume flow as per Equation (17), in m^3/s
- T_{zu} inlet-air temperature, in K
- T_{RS} temperature of smoke layer as per Equation (16), in K
- w_{zu} flow velocity, referred to the geometrical surface area (face velocity), in m/s
- $\bar{c}_{v0,ab}$ flow coefficient of the total surface area of the smoke ventilator (ignoring wind effects) as per Equation (25)
- $\bar{c}_{v0,zu}$ flow coefficient of the total surface area of inlet air (ignoring wind effects) as per Equation (25)
- Y_{eff} effective height of rise (height between area on fire and lower edge of smoke-gas layer), in m
- h_{eff} height between area on fire and the centreline of smoke-exhaust ventilators or fan extraction areas, in m
- ρ_{zu} density of inlet air, in kg/m^3
- $\dot{V}_{zu,masch}$ air volume flow mechanically supplied to the smokeless layer, in m^3/s

Due to the simplifications contained in the calculation method, it is recommended to add an allowance of up to 25 % to both the inlet-air and smoke-exhaust ventilator surfaces (Equation (19) as well as Equation (20)).

Both Equation (19) and Equation (20) take into account the velocity in the inlet-air openings. This value is to be chosen arbitrarily in designing; however, it should not exceed $w_{zu} = 1,0$ m/s if it is possible for a seat of fire to lie in the sphere of influence of an inlet-

position im Einflussbereich der Nachströmöffnung liegen kann (siehe Anhang A). Ein höherer Wert ist vertretbar, wenn die Nachströmöffnungen in einem Rauchabschnitt angeordnet sind, der nicht direkt vom Brand betroffen ist.

8.6.2 Größe und Verteilung der NRWG

Die NRWG sind gleichmäßig verteilt innerhalb des Rauchabschnitts anzuordnen. Im Allgemeinen ist es zweckmäßiger, eine größere Anzahl kleinerer NRWG als eine kleinere Anzahl größerer NRWG vorzusehen. Als Richtwert für die Mindestgröße einer NRWG kann die aerodynamisch wirksame Fläche $A_w = 1 \text{ m}^2$ je 200 m^2 Rauchabschnittsfläche angesetzt werden. A_w errechnet sich nach Gleichung (24).

8.7 Bemessung des Systems zur maschinellen Rauchableitung (MRA)

8.7.1 Bemessung des Gesamt-Absaugvolumenstroms und der Gesamt-Nachströmflächen (MRA)

Die Bemessung des Gesamt-Absaugvolumenstroms erfolgt entsprechend Gleichung (17):

$$\dot{V}_{ab,masch} \geq \dot{V}_{ab} \tag{21}$$

Dabei ist

- $\dot{V}_{ab,masch}$ Gesamt-Absaugvolumenstrom in m^3/s
- \dot{V}_{ab} Rauchgasvolumenstrom in m^3/s gemäß Gleichung (17)

Für die Positionierung der Absaugstellen innerhalb des Rauchabschnitts sind folgende Regelungen zu beachten (Bild 5).

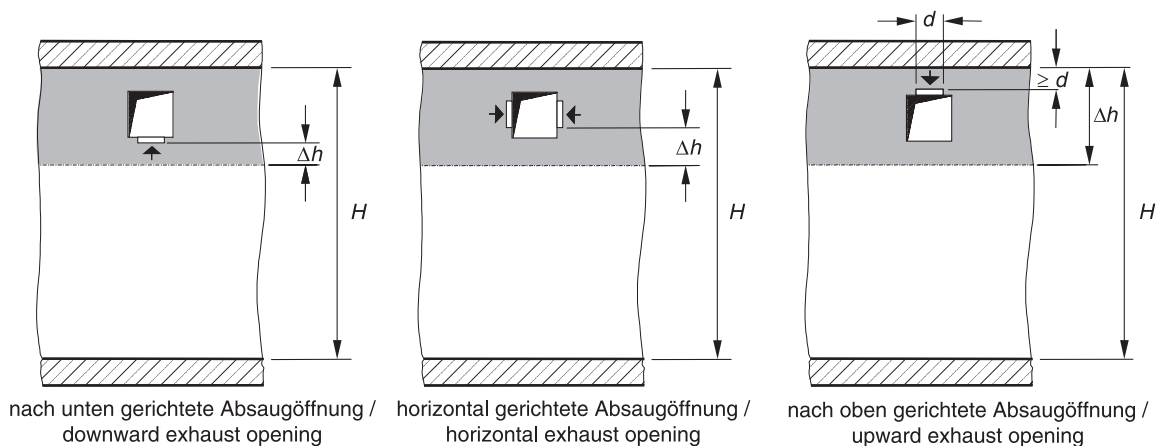


Bild 5. Positionierung der Absaugstellen innerhalb eines Rauchabschnitts: schematischer Schnitt durch einen Rauchabschnitt; Absaugstelle mit einem Pfeil gekennzeichnet (nach DIN 18232-5)

air opening (see Annex A). A higher value is justifiable where inlet-air openings are arranged in a smoke zone that is not directly affected by a fire.

8.6.2 Size and distribution of the natural smoke- and heat-exhaust ventilator

The natural smoke- and heat-exhaust ventilator shall be distributed evenly within the smoke zone. In general, it is more useful to provide a larger number of smaller units than a smaller number of larger units. The aerodynamic free area, $A_w = 1 \text{ m}^2$ per 200 m^2 of smoke-reservoir area, can be assumed as a standard value for the minimum size of a natural smoke- and heat-exhaust ventilator. A_w is calculated using Equation (24).

8.7 Dimensioning of the mechanical smoke-exhaust ventilation system

8.7.1 Dimensioning of the total extraction volume flow and of the total surface area of inlet-air openings (mechanical smoke-exhaust systems)

The total extraction volume flow is dimensioned in accordance with Equation (17):

$$\dot{V}_{ab,masch} \geq \dot{V}_{ab} \tag{21}$$

where

- $\dot{V}_{ab,masch}$ total extraction volume flow, in m^3/s
- \dot{V}_{ab} smoke-gas volume flow, in m^3/s , as per Equation (17)

The following specifications for positioning of the exhausts within the smoke zone have to be observed (Figure 5).

Figure 5. Positioning of exhausts within smoke zone: schematic section through a smoke zone, each exhaust being marked with an arrow (as per DIN 18232-5)

8.7.2 Bemessung der Temperaturbelastung der Brandgasventilatoren

Die maximale zu erwartende Temperatur an der Absaugstelle wird wie folgt ermittelt:

$$T_{\text{Rauch}} = T_{\text{zu}} + \frac{\dot{Q}_{\text{konv}}}{\dot{m}_{\text{Pl}} c_{p,\text{Rauch}}} \gamma_2 \quad (22)$$

Dabei ist

- T_{Rauch} maximale Rauchgastemperatur im Einflussbereich des Ventilators in K
- T_{zu} Umgebungs- bzw. Zulufttemperatur in K
- \dot{m}_{Pl} Rauchgasmassenstrom (Plume) in kg/s nach Gleichung (5) oder Gleichung (6)
- \dot{Q}_{konv} konvektive Wärmefreisetzungsrate in kW
- $c_{p,\text{Rauch}}$ spezifische Wärmekapazität in kJ/(kg · K) $\approx 1,01$ kJ/(kg · K)
- γ_2 Faktor zur Berücksichtigung der Maximaltemperatur im Plume ($\gamma_2 = 1,2$)

Tabelle 3. Maximaler Volumenstrom je Absaugstelle nach DIN 18232-5

Rauchsichtdicke Δh im Bereich der Absaugstelle in m	Volumenstrom \dot{V}_{ab} je Absaugstelle in m ³ /s
$\leq 0,5$	$\leq 0,2$
$\leq 1,0$	$\leq 1,2$
$\leq 1,5$	$\leq 3,5$
$\leq 2,0$	$\leq 7,0$
$\leq 2,5$	$\leq 12,0$

8.7.2 Dimensioning of the temperature load on the fire-gas fans

The maximum temperature to be expected at the exhaust is determined by the following:

$$T_{\text{Rauch}} = T_{\text{zu}} + \frac{\dot{Q}_{\text{konv}}}{\dot{m}_{\text{Pl}} c_{p,\text{Rauch}}} \gamma_2 \quad (22)$$

where

- T_{Rauch} maximum smoke-gas temperature in the sphere of influence of the fan, in K
- T_{zu} ambient or inlet-air temperature, in K
- \dot{m}_{Pl} smoke-gas mass flow (plume), in kg/s as per Equation (5) or Equation (6)
- \dot{Q}_{konv} convective heat release rate, in kW
- $c_{p,\text{Rauch}}$ specific heat capacity, in kJ/(kg · K), $\approx 1,01$ kJ/(kg · K)
- γ_2 factor accounting for the maximum temperature in the plume ($\gamma_2 = 1,2$)

Table 3. Maximum volume flow per exhaust as per DIN 18232-5

Smoke layer thickness Δh near the exhaust in m	Volume flow \dot{V}_{ab} per exhaust in m ³ /s
$\leq 0,5$	$\leq 0,2$
$\leq 1,0$	$\leq 1,2$
$\leq 1,5$	$\leq 3,5$
$\leq 2,0$	$\leq 7,0$
$\leq 2,5$	$\leq 12,0$

8.8 Öffnungsflächen – Definitionen und Anforderungen

8.8.1 Allgemeines

Bei Öffnungsflächen wird unterschieden zwischen der lichten bzw. freien Öffnungsfläche A_{lichte} , der geometrischen Fläche A_{geo} (Nennfläche) und der aerodynamisch wirksamen Fläche A_w .

Die lichte bzw. freie Öffnungsfläche A_{lichte} ist der freie Querschnitt in der lufttechnischen Einrichtung, der tatsächlich durchströmt wird (siehe Bild 6) mit

$$A_{\text{lichte, ges}} = \sum_i A_{\text{lichte, i}} \quad (23)$$

Die geometrische Fläche A_{geo} (Nennfläche) bezeichnet die Anströmfläche der lufttechnischen Einrichtungen zur Nachführung von Frischluft oder der Einrichtungen zur Abfuhr von Rauchgas (siehe Bild 6). Diese Fläche wird in der Regel als Bezugsfläche bei der Bestimmung des Durchflussbeiwerts c_{v0} genutzt.

Die aerodynamisch wirksame Fläche A_w ohne Wind einfluss ergibt sich als Produkt aus geometrischer

8.8 Inlet air – Definitions and requirements

8.8.1 General

A distinction is made between the clear surface area of an opening, A_{lichte} , the geometrical surface area, A_{geo} , (nominal area) and the aerodynamic free area, A_w .

The clear surface area of the opening, A_{lichte} , is the clear cross-section of the terminal unit through which the flow actually passes (see Figure 6), where

$$A_{\text{lichte, ges}} = \sum_i A_{\text{lichte, i}} \quad (23)$$

The geometrical surface area, A_{geo} (nominal area) describes the flow-facing surface of the units for the supply of make-up air or of the units for the removal of smoke gas (see Figure 6). This surface area usually serves as the reference area for the determination of the flow coefficient, c_{v0} .

The aerodynamic free area, A_w , without wind effects, is the product of the geometrical surface area and the

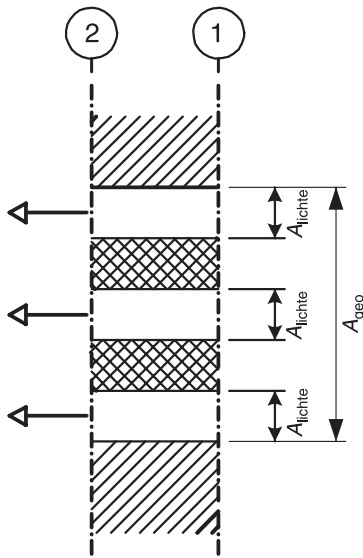


Bild 6. Öffnungsflächen (Prinzip)

- ① Anströmfläche
- ② Abströmfläche

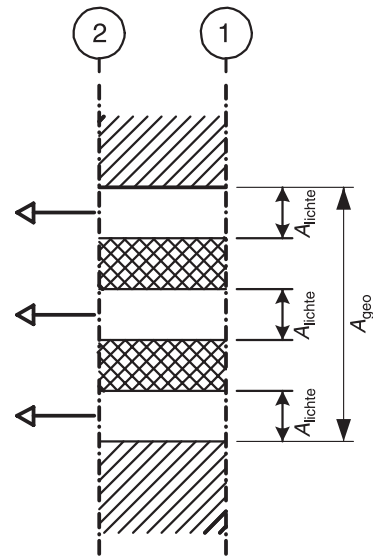


Figure 6. Opening surfaces (principle)

- ① inflow surface
- ② outflow surface

Fläche und Durchflussbeiwert c_{v0} gemäß EN 12101-2 für Abluftflächen.

$$A_w = A_{geo} c_{v0} = A_{geo} \frac{1}{\sqrt{\zeta}} \quad (24)$$

Die aerodynamisch wirksame Fläche ist ein Vergleichswert zur Beurteilung des Druckverlusts unterschiedlicher Konstruktionen bei gleichem Durchfluss. Insbesondere in der Lüftungstechnik wird bei der Berechnung durchströmter Bauteile oft der Druckverlustbeiwert ζ anstelle des Durchflussbeiwerts c_{v0} verwendet. Ein Bezug beider Größen ergibt sich durch $\zeta = 1/c_{v0}^2$ [3]. Bei der Berechnung der aerodynamisch wirksamen Öffnungsfläche ist der Durchflussbeiwert der Nachströmflächen zu berücksichtigen. Anhaltswerte für c_{v0} sind Tabelle 4 zu entnehmen.

Bei von Tabelle 4 abweichenden Fensterkonstruktionen (z.B. Fensteranschlagpunkt etc.) sind Durchflussbeiwerte experimentell zu bestimmen.

Sollen für die Rauchabzugs- bzw. Nachströmflächen verschiedene Bauteile unterschiedlicher Größe und/oder Durchflussbeiwerte vorgesehen werden (z.B. Kombination von Klappflügelfenster und Wendeflügelfenster), so ist bei der Berechnung nach Gleichung (19) ein gemittelter Durchflussbeiwert \bar{c}_{v0} zu berücksichtigen. Er errechnet sich aus

$$\bar{c}_{v0} = \frac{\sum_{i=1}^n A_{geo,i} c_{v0,i}}{\sum_{i=1}^n A_{geo,i}} \quad (25)$$

flow coefficient, c_{v0} , as per EN 12101-2 for exhaust surfaces.

$$A_w = A_{geo} c_{v0} = A_{geo} \frac{1}{\sqrt{\zeta}} \quad (24)$$

The aerodynamic free area is a comparative value for the assessment of the pressure lost in various designs given the same flow. Particularly in the field of ventilation, building elements designed for the passage of a flow are often calculated using the pressure-loss coefficient, ζ , instead of the flow coefficient, c_{v0} . Both quantities are related by the function $\zeta = 1/c_{v0}^2$ [3]. When calculating the aerodynamically effective opening surface, the flow coefficient of the make-up air opening surfaces must be taken into account. Reference values for c_{v0} are given in Table 4.

For window designs deviating from Table 4 (e.g. window rabbet, etc.), flow coefficients shall be determined experimentally.

Where different building elements of various sizes and/or flow coefficients are to be used for the smoke-removal and make-up air opening surfaces (e.g. combination of top-hung swing windows and pivot windows), an averaged flow coefficient, \bar{c}_{v0} , shall be entered in Equation (19). It is obtained as

$$\bar{c}_{v0} = \frac{\sum_{i=1}^n A_{geo,i} c_{v0,i}}{\sum_{i=1}^n A_{geo,i}} \quad (25)$$

Dabei ist

n Anzahl der geometrischen Öffnungsflächen
 $A_{geo,i}$ i -te geometrische Öffnungsfläche in m^2

$c_{v0,i}$ Durchflussbeiwert der Öffnungsfläche $A_{geo,i}$
 \bar{c}_{v0} flächengemittelter Gesamtdurchflussbeiwert

Gleichung (25) ist jeweils separat für die Nachström- und Rauchabzugsflächen anzuwenden. In diesem Zusammenhang bekommt die Auslegung der notwendigen Öffnungsflächen einen iterativen Charakter und der Berechnungsgang stellt sich wie folgt dar: Zunächst wird aus Gleichung (20) die erforderliche Gesamtzuluftfläche berechnet und so auf die verschiedenen Öffnungsbauteile verteilt, dass die Bedingung $A_{zu} = \sum_{i=1}^n A_{zu,i}$ erfüllt ist. Mit Kenntnis der Durch-

flussbeiwerte der Einzelflächen wird anschließend der gemittelte Durchflussbeiwert nach Gleichung (25) bestimmt. Es ist anzumerken, dass die in Gleichung (20) vorgegebene Zuluftgeschwindigkeit w_{zu} für den Fall, dass die einzelnen Zuluftflächen unter-

where

n number of geometrical opening surfaces
 $A_{geo,i}$ area of i -th geometrical opening surface, in m^2

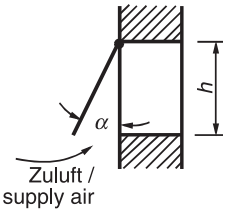
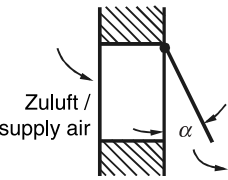
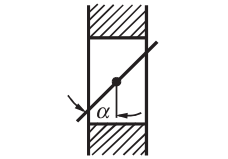
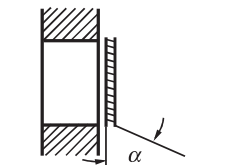
$c_{v0,i}$ flow coefficient of opening surface, $A_{geo,i}$
 \bar{c}_{v0} total flow coefficient averaged over the area

Equation (25) shall be applied separately for the smoke-exhaust and inlet-air opening surfaces. In this context, the dimensioning of the required opening surfaces becomes iterative, the calculation procedure being as follows: First, the required total inlet-air opening surface is calculated using Equation (20), and is allotted to the various opening units in such a manner that the condition $A_{zu} = \sum_{i=1}^n A_{zu,i}$ is fulfilled.

Knowing the flow coefficients of the individual surfaces, the averaged flow coefficient is then determined using Equation (25). Note that the inlet-air velocity, w_{zu} , to be specified in Equation (20) is a weighted velocity if the individual inlet-air opening surfaces have different flow coefficients. The actual

Tabelle 4. Durchflussbeiwerte c_{v0} ohne Windeinfluss verschiedener Wandöffnungen nach [3]; Zwischenwerte dürfen interpoliert werden /

Table 4. Flow coefficient, c_{v0} , ignoring wind effects, for various wall openings according to [3]; interpolation of intermediate values is permissible

Bezeichnung / Designation	Skizze / Sketch	Öffnungswinkel α / Opening angle α in Grad / in degrees	$h/b = 1:1$ c_{v0}	$h/b = 1:2$ c_{v0}	$h/b = 1:3$ c_{v0}
Klappflügelfenster / Top-hung swing window		15	0,25	0,22	0,18
		30	0,42	0,38	0,33
		45	0,52	0,50	0,44
		60	0,57	0,56	0,53
		90	0,62	0,62	0,62
Klappflügelfenster*) / Top-hung swing window*)		15	0,30	0,24	0,18
		30	0,45	0,38	0,34
		45	0,56	0,50	0,46
		60	0,63	0,57	0,55
		90	0,67	0,63	0,63
Wendeflügel Fenster / Pivot window		15	0,15	-	0,13
		30	0,30	-	0,27
		45	0,44	-	0,39
		60	0,56	-	0,56
		90	0,64	-	0,61
Waagerechte und senkrechte Jalousien / Horizontal and vertical louvres		15	0,15	0,13	-
		30	0,30	0,27	-
		45	0,44	0,39	-
		60	0,56	0,56	-
		90	0,64	0,61	-

*) gilt auch für Drehpunkt unten (Kippflügel) / also holds for bottom-hung windows

schiedliche Durchflussbeiwerte besitzen, eine gewichtete Geschwindigkeit darstellt. Die tatsächlichen Geschwindigkeiten in den Einzelflächen lassen sich berechnen mit

$$w_{zu,i} = \frac{c_{v0,zu,i}}{\bar{c}_{v0,zu}} w_{zu} \quad (26)$$

Vor dem weiteren Rechengang ist mit dieser Beziehung zu prüfen, inwieweit die tatsächlichen Geschwindigkeiten von der in Ansatz gebrachten mittleren Geschwindigkeit (nach oben) abweichen und ob dies tolerierbar ist. In diesem Zusammenhang ergibt sich die maximale Zuluftgeschwindigkeit an dem Bauteil, das den größten Durchflussbeiwert aufweist. Gegebenenfalls ist die bis zu diesem Zeitpunkt durchgeführte Berechnung zu wiederholen, wobei ein kleinerer Wert für w_{zu} in Gleichung (20) einzusetzen ist. Die aus dieser Vorgehensweise resultierenden Ergebnisse für w_{zu} und $\bar{c}_{v0,zu}$ werden anschließend zur Berechnung der Abluftflächen in Gleichung (19) verwendet.

Für den Fall, dass (auch) bei den Rauchabzugsflächen Bauteile mit unterschiedlichen Durchflussbeiwerten verwendet werden sollen, ist von Gleichung (19) in der Form

$$A_{ab} \bar{c}_{v0,ab} = \dot{V}_{ab} \sqrt{\frac{T_{zu}}{2 g (T_{RS} - T_{zu})(h_{eff} - Y_{eff}) - \frac{1}{\bar{c}_{v0,zu}^2} w_{zu}^2 T_{RS}}} \quad (27)$$

Gebrauch zu machen. Hierbei stellt $A_{ab} = \sum_{i=1}^n A_{ab,i}$

die Summe aller Teilablftflächen dar und $\bar{c}_{v0,ab}$ den für diese Flächen gemittelten Durchflussbeiwert. Das Ergebnis der Auswertung von Gleichung (27) wird nun in Gleichung (25) in der Form

$$\sum_{i=1}^n A_{ab,i} c_{v0,ab,i} = A_{ab} \bar{c}_{v0,ab} \quad (28)$$

eingesetzt. Anschließend werden die Werte $A_{ab,i}$ für $(n-1)$ Rauchabzugsflächen vorgegeben. Ihre Wahl ist frei und kann sich an den baulichen Gegebenheiten orientieren, wobei die Einschränkung

$\sum_{i=1}^{n-1} A_{ab,i} < A_{ab}$ einzuhalten ist. Der Berechnungsgang

endet mit der Ermittlung der noch verbleibenden Restrauchabzugsfläche $A_{ab,n}$, die zu gewinnen ist aus

$$A_{ab,n} = \frac{1}{c_{v0,ab,n}} \left(A_{ab} \bar{c}_{v0,ab} - \sum_{i=1}^{n-1} A_{ab,i} c_{v0,ab,i} \right) \quad (29)$$

Strömungsgeschwindigkeiten

Die Zuluftführung hat möglichst bodennah, impulsarm und unterhalb der Rauchsicht zu erfolgen. Die

velocities in the individual surfaces can be calculated using

$$w_{zu,i} = \frac{c_{v0,zu,i}}{\bar{c}_{v0,zu}} w_{zu} \quad (26)$$

Before carrying the calculation any further, check, by means of this relation, whether the actual velocities deviate from (exceed) the mean velocity entered and whether such a deviation can be tolerated. The maximum inlet-air velocity at the building element having the highest flow coefficient is thus obtained. The calculation steps made so far may have to be repeated at this point, entering a smaller value for w_{zu} in Equation (20). The results thus obtained for w_{zu} and $\bar{c}_{v0,zu}$ are then used in Equation (19) to calculate the extract-air opening surfaces.

If (again) building elements that differ in flow coefficient are to be used for the smoke-removal opening surfaces, the Equation (19) shall be modified as follows:

Where $A_{ab} = \sum_{i=1}^n A_{ab,i}$ is the sum total of all partial

extract-air opening surfaces, and $\bar{c}_{v0,ab}$ is the flow coefficient averaged over these surfaces. The result of the evaluation of Equation (27) is now entered in Equation (25) in the form

$$\sum_{i=1}^n A_{ab,i} c_{v0,ab,i} = A_{ab} \bar{c}_{v0,ab} \quad (28)$$

Then, the values, $A_{ab,i}$, for $(n-1)$, for smoke-exhaust opening surfaces are specified. They may be chosen arbitrarily, depending on the constructional conditions, while observing the condition

$\sum_{i=1}^{n-1} A_{ab,i} < A_{ab}$

Finally, the residual smoke-exhaust opening surface area, $A_{ab,n}$, is calculated, which is to be obtained from

$$A_{ab,n} = \frac{1}{c_{v0,ab,n}} \left(A_{ab} \bar{c}_{v0,ab} - \sum_{i=1}^{n-1} A_{ab,i} c_{v0,ab,i} \right) \quad (29)$$

Flow velocities

Inlet air shall be supplied as close to the floor as possible, at low momentum, and underneath the smoke

Geschwindigkeit in der Nachströmfläche (entspricht der Abströmfläche ② in Bild 6) soll einen Wert von $w_{zu} = 1,0$ m/s nicht überschreiten (Erläuterung siehe Anhang A), mit

$$w_{zu} = \frac{\dot{m}_{Pl}}{\rho_{zu} A_{lichte}} \quad (30)$$

Die Oberkante der Zuluftöffnung soll zur Rauchschichtgrenze einen Abstand von mindestens 1,0 m aufweisen. Bei Zuluftöffnungen, die zu einer aufwärts gerichteten Strömung (z.B. mit aufwärts gerichteten Wetterschutzgittern) führen, ist ein größerer Abstand einzuhalten.

Zuluftöffnungen müssen unverzüglich nach Auslösung der NRA geöffnet werden (z.B. automatisch, durch Werkfeuerwehr, durch betriebliche oder organisatorische Vorkehrungen).

8.8.2 Sonderfälle

Mitunter werden als Öffnungsflächen Fassadenelemente eingesetzt, die aus einzelnen, meist horizontal drehbar gelagerten Scheiben bestehen (Bild 7). Konstruktionsbedingt lassen sich die Lamellen häufig nicht in eine horizontale Position drehen. Zwischen den einzelnen Lamellen entstehen Strömungskanäle, die die einströmende Luft gleichrichten und unter einer schrägen, meist aufwärtsgerichteten Ausblasrichtung dem Raum zuführen. In diesen Fällen ist der lichte Querschnitt nach Bild 7 zu bestimmen.

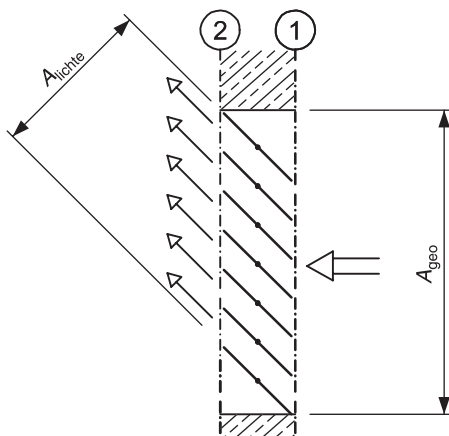


Bild 7. Lamellenartiges Zuluftelement z. B. für Glasfassaden

Für Kippflügel Fenster (Bild 8, Bild 9) berechnet sich die aerodynamisch wirksame Öffnungsfläche nach Gleichung (24) mit einem Durchflussbeiwert gemäß Tabelle 4 und der geometrischen Öffnungsfläche $A_{geo} = b \cdot h$ (Anströmfläche). Die lichte Öffnungsfläche zur Bestimmung der Abströmgeschwindigkeit nach Gleichung (30) lässt sich in guter Näherung für verschiedene Öffnungswinkel aus Bild 11 ermitteln. Das hier dargestellte Diagramm resultiert

layer. The velocity in the inlet-air opening surface (corresponding to outflow surface ② in Figure 6) should not exceed a value of $w_{zu} = 1,0$ m/s (explanation see Annex A), where

$$w_{zu} = \frac{\dot{m}_{Pl}}{\rho_{zu} A_{lichte}} \quad (30)$$

The upper edge of the inlet-air opening surface shall, if possible, be at least 1,0 m away from the smoke-layer interface. This distance shall be greater for inlet-air openings leading to an upward flow (having, e.g., upward weather grilles).

Inlet air must be opened immediately upon activation of the natural smoke-exhaust ventilation system (e.g. automatically, by the factory fire brigade, by operational or organisational measures).

8.8.2 Special cases

Sometimes, facade elements are used as opening surfaces which consist of several panes pivotable, in most cases, about the horizontal axis (Figure 7). For design reasons, it is often impossible to pivot the lamellae to the horizontal position. In-between the lamellae, flow channels are formed which equalise the incoming air flow and supply it to the room at an angle, mostly in an upward blowing direction. In these cases, the clear cross-section is to be determined in accordance with Figure 7.

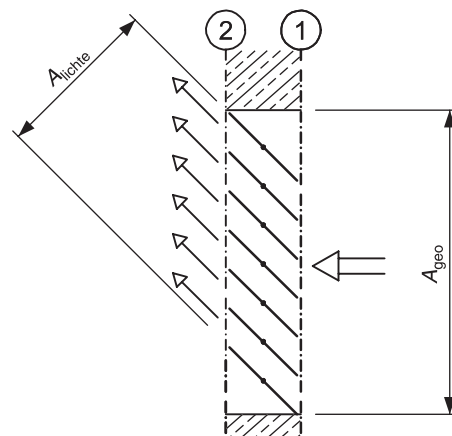


Figure 7. Lamellar air-supply elements, e.g. for glass facades

For tilt windows (Figure 8, Figure 9), the aerodynamic free area is calculated using Equation (24), as the product of a flow coefficient from Table 4 and the geometrical opening surface area, $A_{geo} = b \cdot h$ (inflow surface). The clear opening surface area for determination of the outflow velocity as per Equation (30) can be determined in good approximation for various opening angles using Figure 11. This diagram results from numerical calculations based on a simple

aus numerischen Berechnungen an einem einfachen Modell eines Kippflügelfensters. Es kann gleichermaßen angewendet werden für ein einzelnes Kippflügelfenster (Bild 8) und parallel angeordnete Kippflügelfenster (Bild 9).

model of a tilt window. It is applicable to both a single tilt window (Figure 8) and several tilt windows arranged in parallel (Figure 9).

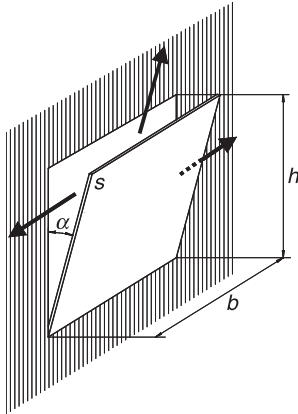


Bild 8. Kippflügelfenster

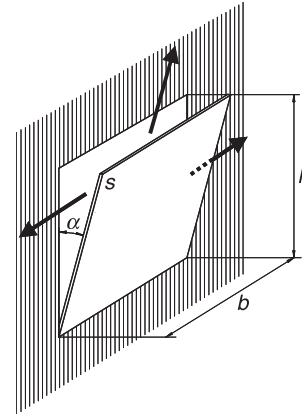


Figure 8. Tilt window

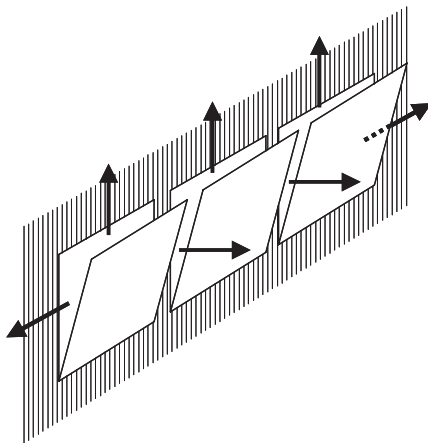


Bild 9. Parallelanordnung von Kippflügelfenstern

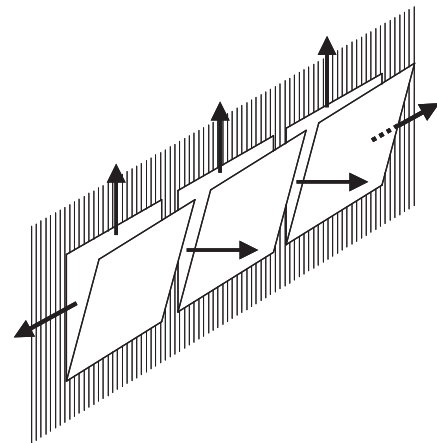


Figure 9. Tilt windows arranged in parallel

Lochbleche in Öffnungsflächen (Bild 10) werden in der Lufttechnik verwendet zur Vergleichmäßigung der Strömungsverhältnisse. Ihre Wirkung beruht auf der Erzeugung von Druckverlust bei der Durchströmung. Der Druckverlustbeiwert bzw. der Durchflussbeiwert ist in Bild 12 in Abhängigkeit vom freien Querschnitt des Lochblechs dargestellt.

Perforated sheets in opening surfaces (Figure 10) are used in the field of ventilation in order to equalise flow conditions. Their effect relies on a pressure loss generated as the flow passes through. The pressure-loss coefficient and the flow coefficient are shown in Figure 12 as functions of the clear cross-section of the perforated sheet.

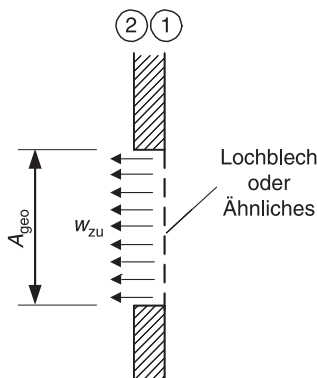


Bild 10. Lochblech in einer Öffnungsfläche

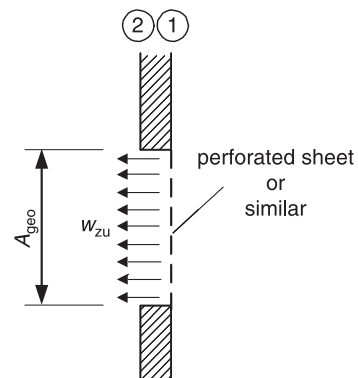


Figure 10. Perforated sheet in opening surface

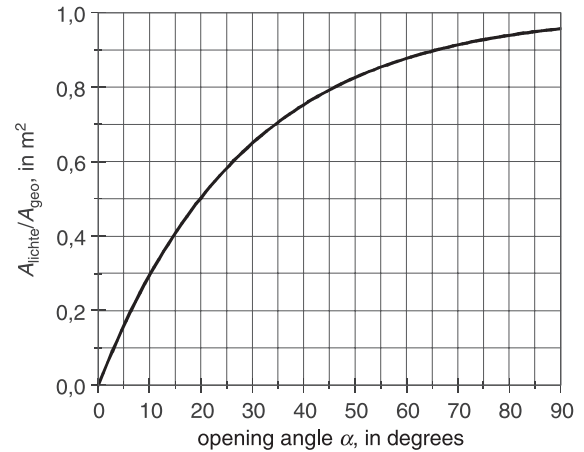
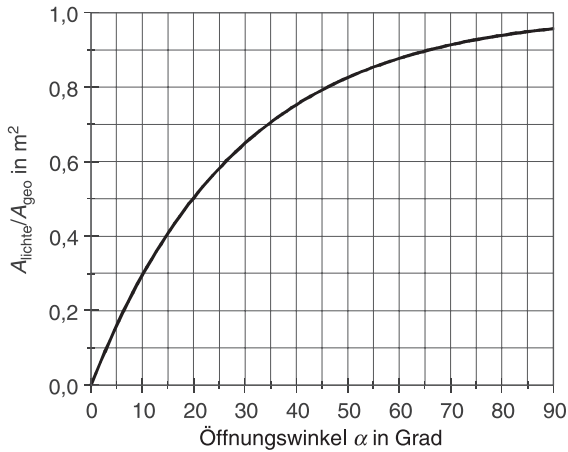


Bild 11. Diagramm zur Abschätzung der lichten Öffnungsfläche bei Kipflügel Fenstern

Figure 11. Diagram allowing to estimate the clear opening surface area of tilt windows

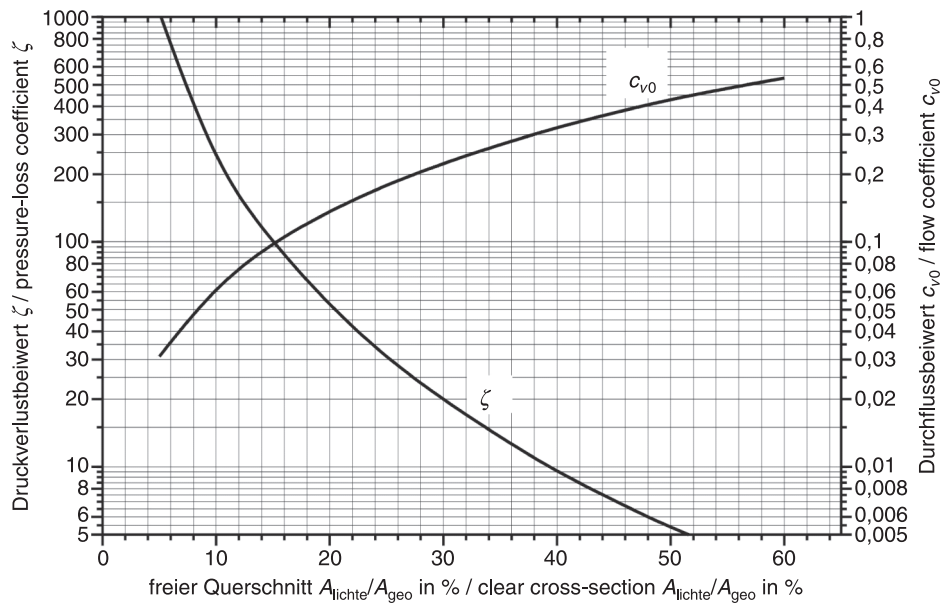


Bild 12. Druckverlustbeiwert ζ bzw. Durchflussbeiwert c_{v0} von Lochblech nach [5] (als Bezugsfläche dient die geometrische Öffnungsfläche)

Figure 12. Pressure-loss coefficient, ζ , and flow coefficient, c_{v0} , of perforated sheet according to [5] (the geometrical opening surface being the reference surface)

Im Gegensatz zu den bislang dargestellten Öffnungsflächen wird bei Lochblechen die Strömungsgeschwindigkeit mit dem Anströmquerschnitt A_{geo} gemäß Bild 10 bestimmt, da sich die ausbildenden Luftstrahlen aus den einzelnen Löchern nach kurzem Laufweg wieder zusammenlegen. Dieser Sachverhalt gilt gleichermaßen für z.B. Siebe, Metallgestricke usw.

Contrary to the opening surfaces described so far, the flow velocity for perforated sheets is determined using the flow-facing cross-section, A_{geo} , as per Figure 10, considering that the air jets formed by passage through the individual holes merge again soon after leaving the perforated sheet. This fact also holds for, e.g., screens, metal fabrics, etc.

8.9 Nachweis der mittleren Raumtemperatur in der raucharmen Schicht

Bei der Bemessung des Entrauchungssystems gilt es prinzipiell nachzuweisen, dass die Temperatur im Aufenthaltsbereich innerhalb der raucharmen Schicht

8.9 Verification of the mean room temperature in the smokeless layer

As a matter of principle, when dimensioning the smoke-exhaust ventilation system, proof shall be furnished that the temperature in the occupied area

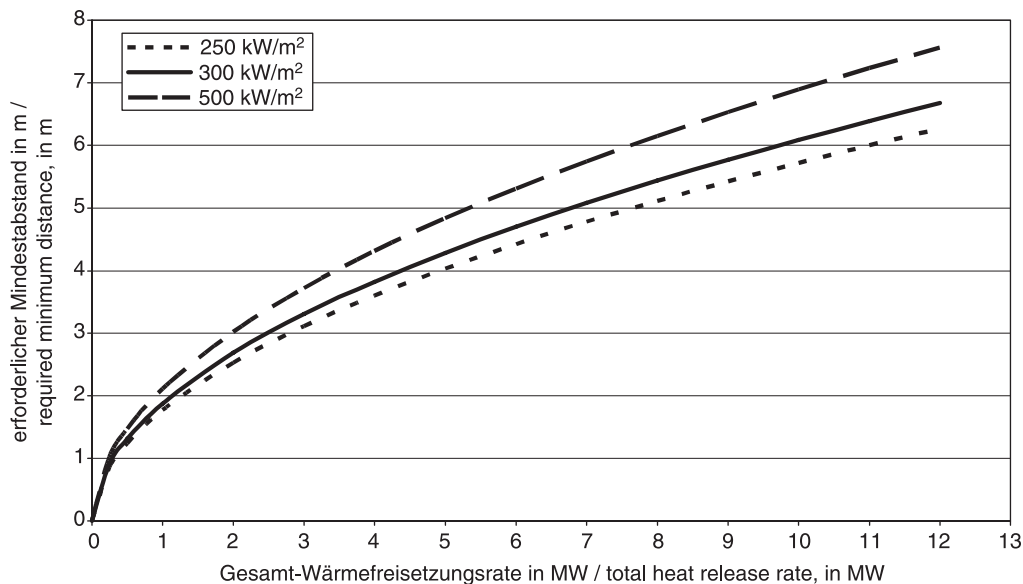


Bild 13. Erforderlicher Mindestabstand zur Flammenoberfläche in Abhängigkeit von der maximalen spezifischen Wärmefreisetzungsrate (vgl. VDI 6019 Blatt 1)

Figure 13. Required minimum distance to flame surface as a function of the maximum specific heat release rate (see VDI 6019 Part 1)

70 °C nicht übersteigt. Es kann davon ausgegangen werden, dass dieses Kriterium dann erfüllt wird, wenn die nach Gleichung (16) berechnete mittlere Rauchgastemperatur T_{RS} nicht höher ist als 150 °C.

Der zu führende Nachweis gilt hierbei nur für einen Bereich mit ausreichendem Abstand zum Brandherd. Dieser Abstand kann aus Bild 13 ermittelt werden.

within the smokeless layer does not exceed 70 °C. This criterion can be assumed to be fulfilled if the mean smoke-gas temperature T_{RS} calculated as per Equation (16) does not exceed 150 °C.

The proof to be furnished only applies to an area at sufficient distance to the seat of fire. This distance can be determined from Figure 13.

9 Dimensionierung von Entrauchungssystemen mit Zonenmodellen

9.1 Einleitung

Zonenmodelle sind numerische Berechnungsmodelle, die zeitabhängige Verläufe von Vorgängen zur Rauchausbreitung innerhalb von Räumen und offenen Raumstrukturen darstellen können. Mit diesen Programmen werden im Wesentlichen die Bilanzen für Masse und Energie numerisch ausgewertet. Bei Ein- oder Mehrraum-Mehrzonenmodellen wird in bestimmten Zonen (z.B. im Plume) zusätzlich die Impulserhaltungsgleichung berücksichtigt.

Ähnlich zum Berechnungsverfahren für einfache Geometrien nach Abschnitt 8 basieren diese Modelle auf der Vorstellung, dass sich innerhalb des zu bewertenden Raums die über dem Brandherd aufsteigenden Rauchgase in einer Zone, der sogenannten Heißgasschicht, unterhalb der Decke schichtförmig ausbreiten. Die darunter befindliche und nur gering mit Rauch belastete Zone wird Kaltgasschicht genannt. Die Kaltgasschicht entspricht der als „raucharm“ bezeichneten Schicht im Sinne dieser Richtlinie. Der Plume wird als zusätzliche Zone betrachtet.

9 Dimensioning of smoke-exhaust ventilation systems using zone models

9.1 Introduction

Zone models are numerical calculation models allowing the simulation of the development over time of smoke-spread processes in rooms and open room structures. Essentially, these models serve for numerical evaluation of the mass and energy balances. In the case of single- or multiple-room multiple-zone models, the equation for conservation of momentum is taken into account additionally in specific zones (e.g. in the plume).

Similar to the calculation methods for simple geometries as per Section 8, these models are based on the idea that within the room to be evaluated, the smoke gases rising above the seat of fire will spread in a zone underneath the ceiling, the so-called hot-gas layer. The zone underneath, containing but little smoke, is called cold-gas layer. The cold-gas layer corresponds to the layer designated “smokeless” layer for the purpose of this guideline. The plume is regarded as an additional zone.

Innerhalb der Heißgas- und der Kaltgasschicht werden jeweils räumlich homogene physikalische Bedingungen angenommen. Dies gilt auch für die angrenzenden Umfassungsbauteile der zu bewertenden Räume. Wärmeübergänge z.B. von der Heißgasschicht zu den Umfassungsbauteilen werden auf Basis der anzugebenden Stoffdaten für diese Bauteile in vielen Zonenmodellen berücksichtigt.

Es gibt eine Vielzahl von Zonenmodellen, die sich untereinander hauptsächlich unterscheiden durch die verwendeten Plumenmodelle, die implementierten Verbrennungsmodelle, die maximale Anzahl von miteinander zu verbindenden Räumen, die Möglichkeit der Anordnung von Räumen übereinander und die Möglichkeit der Modellierung des Ansprechverhaltens und der Wirkung von Entrauchungs- und Sprinkleranlagen.

Einfache Zonenmodelle sind in der Lage, für einzelne Räume unter Berücksichtigung der Rauchabzugsmaßnahmen den zeitlichen Verlauf der Rauchschichtdicke sowie der mittleren Temperatur der Rauchschicht zu berechnen. Andere Zonenmodelle bieten Ansätze zur Berechnung des zeitlichen Verlaufs der Rauchschichtdicke in mehreren miteinander in offener Verbindung stehenden Räumen. Weiterhin besteht die Möglichkeit, die Konzentrationen von toxiologisch relevanten Brandgasen wie CO und HCN oder die Sichtweitenbeschränkung innerhalb der Heißgas- und der Kaltgasschicht zu berechnen und darzustellen.

9.2 Anwendungsvoraussetzungen und Anwendungsgrenzen

Bei der Anwendung von Zonenmodellen gilt es zu berücksichtigen, dass der Stoff-, Energie- und Impulsaustausch zwischen den einzelnen Zonen durch vereinfachte Beziehungen (z.B. Plumeformeln) dargestellt wird. Strömungstechnische Vorgänge, die zu einem zusätzlichen Austausch zwischen den Zonen beitragen (z.B. Zuluftstrahlen oder die Umströmung von Einbauten) gehen nicht in die Berechnung ein.

Bei der Verwendung von Zonenmodellen ist vom Anwender grundsätzlich zu entscheiden und zu begründen, ob und inwiefern einzelne strömungstechnische Einflüsse vernachlässigt werden können, bzw. warum sie für die untersuchten Rauchausbreitungsvorgänge nicht relevant sind.

Die Ergebnisse von Zonenmodellberechnungen lassen u.a. dann eine risikogerechte Dimensionierung der Entrauchungsanlage zu, wenn

- die Raumgeometrie mit einer ausreichenden Ähnlichkeit abgebildet werden kann,

The physical conditions inside the hot-gas and cold-gas layers are each assumed to be spatially homogeneous. This also applies to the adjacent enclosing building elements of the rooms to be evaluated. Heat transmissions, e.g. from the hot-gas layer to the enclosing building elements, are taken into account in many zone models on the basis of the materials data to be entered for these building elements.

A multitude of zone models are available which mainly differ in the plume models used, the combustion models implemented, the maximum number of rooms to be interconnected, the possibility of arranging rooms on top of each other and the option of modelling the response and effect of smoke-removal and sprinkler systems.

Simple zone models allow calculating the development over time of smoke-layer thickness and mean temperature of the smoke layer for individual rooms, taking into account the smoke-exhaust measures taken. Other zone models offer approaches to calculating the development over time of the smoke-layer thickness in several interconnected open rooms. They furthermore allow calculating and representing the concentrations of toxicologically relevant fire gases such as CO and HCN or of the restriction of the sight distance within the hot-gas and cold-gas layers.

9.2 Application requirements and application limits

When applying zone models, it must be noted that the exchanges of materials, energy and momentum between the individual zones are represented by simplified relations (e.g. plume formulae). Flow processes contributing to an additional exchange between the zones (e.g. inlet-air jets or the flow around fittings) are not considered in the calculation.

When using zone models, the user must always decide and justify whether, and to what extent, individual flow effects can be neglected, and why they are irrelevant to the smoke-spread processes examined.

The results of zone-model calculations allow risk-compliant dimensioning of the smoke-removal system, if, among other things,

- the room geometry can be emulated to sufficient similarity,

- der Plume über dem Brandherd ungestört bis zum Eindringen in die Rauchschiicht (Heißgasschiicht) aufsteigen kann,
- nach der Brandentstehungsphase die mittlere Temperatur in der Rauchschiicht mindestens 1 K über der mittleren Temperatur der darunter liegenden Kaltgasschiicht liegt (siehe Abschnitt 6),
- vorausgesetzt werden kann, dass die Zuluftführung keinen negativen Einfluss auf den Plume bzw. dessen Ausbreitung hat (impulsarme bodennahe Zuluftführung, vgl. Anhang A),
- die Zuluftstrahlen mit der Grenze der Rauchschiicht nicht interagieren (vgl. Anhang A),
- thermisch bedingte Einflüsse, z.B. Kaltluftabfälle an Glasfassaden, Kühldecken etc., ausgeschlossen werden können,
- die Raumluftströmung im Brandfall nicht durch raumlufttechnische Anlagen beeinflusst wird,
- Windeinflüsse nicht negativ wirken,
- das Seitenverhältnis der einzelnen Räume einen Wert von 1,5 nicht überschreitet,
- das Zonenmodell verifiziert und validiert ist.

Sobald einer der vorgenannten Sachverhalte auf den jeweils betrachteten Raum bzw. Raumverbund nicht zutrifft, ist die Bemessung eines Entrauchungssystems mit einem Zonenmodell nicht zu empfehlen, und es sind andere geeignete Ingenieurmethoden wie CFD-Modelle oder die Durchführung von Modellversuchen zur Bemessung anzuwenden.

Zur Bestimmung maximal möglicher Rauchabschnittsflächen größer als 1600 m² ist die Verwendung eines Zonenmodells in der Regel als ungeeignet einzustufen, da die Strömungsvorgänge nur unzureichend berücksichtigt werden. Dies gilt insbesondere für die in der Brandentstehungsphase dominierenden Strömungsprozesse. Hier empfiehlt sich eine Validierung z.B. durch CFD-Rechnungen oder Modellversuche.

Die Berechnung der Rauchübertragung zwischen horizontal verbundenen Räumen ist, mit den erläuterten Einschränkungen für Einzelräume, möglich. Die Unterteilung von großflächigen oder lang gestreckten Räumen mittels sogenannter virtueller Rauchabschnitte beschreibt die Rauchausbreitung dagegen nur unzureichend.

Die Rauchausbreitung in vertikal miteinander verbundenen Räumen kann mit Zonenmodellen nicht ausreichend abgebildet werden, da bei der vertikalen Durchströmung der oberen Räume die sich einstellenden Einmischvorgänge keine Berücksichtigung finden.

- the plume can rise above the seat of fire undisturbed until penetrating the smoke layer (hot-gas layer),
- after the initial stage of fire, the mean temperature in the smoke layer exceeds by at least 1 K the mean temperature of the cold-gas layer underneath (see Section 6),
- it can be assumed that the inlet-air routing will have no adverse effect on the plume and its spread (low-momentum inlet air close to the floor, see Annex A),
- the inlet-air jets do not interact with the smoke-layer interface (see Annex A),
- thermally induced effects such as downdraughts of cold air at glass facades, chilled ceilings, etc., can be excluded,
- the flow pattern of the room air is not influenced by air-conditioning equipment in the event of fire,
- no adverse wind effects prevail,
- the aspect ratio of the individual rooms does not exceed a value of 1,5,
- the zone model has been verified and validated.

Whenever one of the above facts does not apply to the room, or interconnected rooms, in question, it is not recommended to use a zone model for dimensioning of a smoke-exhaust ventilation system. Instead, other appropriate engineering methods such as CFD models shall be used, or simulation tests performed.

As a rule, using a zone model must be considered inappropriate for the determination of the maximum possible smoke-zone surfaces in excess of 1600 m², given the fact that flow processes are taken into account but insufficiently. This holds, in particular, for the flow processes dominating at the initial stage of a fire. A validation is recommended here, e.g. by means of CFD calculations or simulation tests.

The calculation of smoke transmission between horizontally interconnected rooms is possible, with the application limits explained for single rooms applying here as well. However, the subdivision of large-surface or elongate rooms by means of so-called virtual smoke zones provides but an insufficient description of the smoke spread.

The smoke spread in vertically interconnected rooms cannot sufficiently be emulated using zone models, as the merging processes occurring during vertical flow in the upper rooms are not taken into account.

9.3 Beschreibung der Anwendungssoftware

Bei der Durchführung von Brandsimulationsrechnungen mit Zonenmodellen sind Angaben in Bezug auf die angewendete Software und die wesentlichen theoretischen Grundlagen erforderlich. Die Beschreibung der Software muss zumindest folgende Angaben enthalten:

- Bezeichnung des Modells und Versionsnummer
- Software-Hersteller
- Modelltyp (z.B. Einzonenmodell, Mehrraum-Mehrzonenmodell)

In Bezug auf die theoretischen Grundlagen der einzelnen Zonenmodelle sind folgende wesentliche physikalische Modellansätze einschließlich der Eingangsparameter zu benennen und zu erläutern, sofern sie bei der Berechnung zur Anwendung kommen:

- rechnerischer Ansatz zur Berechnung der Rauchgasmassenströme im Bereich Flamme/intermittierende Zone/Plume
- Berechnungsmodell zur Bestimmung der Flammenhöhe
- Berechnungsmodell für Geschwindigkeit und Temperatur im Bereich des Staupunkts (impingement point) zur Bestimmung der Sprinklerauslösung, Aktivierung von Wärmemeldern etc.
- Berechnungsmodell zur Bestimmung des Wärmeabflusses durch Bauteile
- Kriterium zur Anwendung der Einzonenmodellierung
- Kriterien zur Flash-over-Berechnung
- Kriterien zur Berechnung des Brandverlaufs bei Unterventilation
- Verbrennungsmodell
- Modell zur Berechnung der Sichtweite (Einzonenmodellierung)

9.4 Darstellung und Bewertung der Simulationsergebnisse

Die ermittelten Simulationsergebnisse bedürfen einer Analyse und Bewertung. Diese erfolgt in Zusammenhang mit den in Abschnitt 7 definierten Bewertungsgrößen. Folgende Rechenergebnisse sind anzugeben und grafisch darzulegen:

- Darstellung der zeitlichen Entwicklung der raucharmen Schicht in allen Räumen
- Darstellung der zeitlichen Entwicklung der mittleren Temperatur in der Rauchschiicht
- Darstellung der zeitlichen Entwicklung der Raumtemperatur in der raucharmen Schicht

Es ist nachzuweisen, dass die Beurteilungskriterien aus Abschnitt 7 für die Funktionsdauer des geplanten

9.3 Description of the application software

When performing fire-simulation calculations using zone models, details must be given regarding the software used and the essential theoretical background. The description of the software must contain the following minimum information:

- designation of the model and number of release
- software manufacturer
- type of model (e.g. one-zone model, multiple-room multiple-zone model)

With regard to the theoretical background of the individual zone models, state and explain the following essential physical assumptions of the model including the input parameters where these are used in the calculation:

- calculation approach for the smoke-gas mass flows in the ranges of flame/intermittent zone/plume
- calculation model for determination of the flame height
- calculation model for velocity and temperature near the impingement point, for determination of sprinkler activation, activation of heat detectors, etc.
- calculation model for determination of the heat drain through building elements
- criterion for application of the one-zone model
- criteria for flash-over calculation
- criteria for calculation of the fire development in case of underventilation
- combustion model
- model for calculation of the sight distance (one-zone model)

9.4 Representation and evaluation of the simulation results

The simulation results need to be analysed and evaluated. To this end, the evaluation parameters defined in Section 7 shall be referred to. The following calculation results shall be stated and represented graphically:

- representation of the development over time of the smokeless layer in all rooms
- representation of the development over time of the mean temperature in the smoke layer
- representation of the development over time of the room temperature in the smokeless layer

Proof shall be furnished that the evaluation criteria as per Section 7 are fulfilled throughout the functioning

Entrauchungssysteme eingehalten werden. Sofern das verwendete Zonenmodell die mittlere Raumtemperatur in der raucharmen Schicht nicht berechnen kann, darf das Nachweisverfahren nach Abschnitt 8.9 herangezogen werden.

Zusätzliche Beurteilungskriterien können herangezogen werden, wenn die entsprechenden Eingangsparameter einschließlich der implizierten physikalischen Modelle formuliert und aus brandschutztechnischer Sicht begründet werden.

9.5 Allgemeine Hinweise zur Nachweisführung

Die im Nachweisverfahren einfließenden Annahmen, Randbedingungen und Simulationsergebnisse sind transparent und nachvollziehbar darzustellen. Dies ermöglicht eine vereinfachte Plausibilitätsprüfung.

In Anhang B ist ein Datenblatt zur Dokumentation von Brandsimulationen mit Zonenmodellen beigelegt. Das Ausfüllen dieses Datenblatts ist erforderlich. Je detaillierter die Angaben im Datenblatt gemacht werden, desto besser kann die damit dokumentierte Zonenmodell-Simulation und ihre Qualität und Zuverlässigkeit beurteilt werden.

10 Dimensionierung von Entrauchungssystemen mit CFD-Rechnungen

10.1 Einleitung

Im Rahmen von CFD-Rechnungen können Strömungsfelder in beliebigen Raumgeometrien unter festgelegten Randbedingungen berechnet werden. Die Basis dieser Methode bilden die Erhaltungsgleichungen für Masse, Impuls und Energie. Dieser Satz von gekoppelten, partiellen Differenzialgleichungen wird zur numerischen Behandlung zunächst mithilfe von Diskretisierungsansätzen in ein System von algebraischen Gleichungen überführt. Hierbei kommen Methoden der finiten Differenzen, finiten Volumen und finiten Elemente zum Einsatz. Diesen Methoden ist gemeinsam, dass der interessierende Strömungsbereich durch ein „Rechengitter“ unterteilt wird. Die kontinuierliche Verteilung von Strömungsgrößen, z. B. Druck, Temperatur, Geschwindigkeit und Konzentrationen, wird dann durch Werte an diskreten Stellen (Rechenpunkten) im Raum zu bestimmten Zeitpunkten dargestellt. Die Strömungsgrößen zwischen diesen diskreten Stellen werden interpoliert.

Die mathematische Lösung von Differenzialgleichungen setzt die Vorgabe von Anfangs- und Randbedingungen voraus. Diese Bedingungen sind auch bei einer numerischen Lösung der Gleichungen zu definieren. Als Anfangsbedingung dient der Zustand des betrachteten Strömungsfelds zu Beginn der Si-

life of the planned smoke-exhaust ventilation system. Where the zone model used does not allow calculating the mean room temperature in the smokeless layer, the verification procedure as per Section 8.9 may be used.

Using additional evaluation criteria is permissible provided that the respective input parameters including the implied physical models are stated, and justified from the viewpoint of fire protection.

9.5 General notes regarding verification

The assumptions, boundary conditions and simulation results incorporated in the verification procedure shall be described in a transparent and reproducible manner. This will facilitate plausibility checking.

A data sheet for the documentation of fire simulations using zone models is attached in Annex B; its completion is mandatory. The more detailed the information supplied in the data sheet, the better will it be possible to evaluate the zone-model simulation thus documented, including its quality and reliability.

10 Dimensioning of smoke-exhaust ventilation systems using CFD calculations

10.1 Introduction

CFD calculations allow calculating flow fields in arbitrary room geometries under specified boundary conditions. The equations for conservation of mass, momentum and energy form the basis of this method. For numerical treatment, this set of coupled, partial differential equations is first converted to a system of algebraic equations by means of discretisation approaches. Finite-difference, finite-volume and finite-element methods are used to this end. All these methods use a “calculation grid” for subdividing the flow range of interest. The continuous distribution of the flow parameters such as pressure, temperature, velocity and concentrations is then represented by means of values at discrete points (calculation points) in the room at specified points in time. The flow parameters between these discrete points are interpolated.

The mathematical solution of differential equations requires the specification of initial and boundary conditions. These conditions shall also be defined for a numerical solution of the equations. The state of the flow field considered at the beginning of the simulation serves as the initial condition. Boundary condi-

mulation. Randbedingungen legen die Zustände am Rand des Strömungsfelds (z.B. an Wänden, Decken, Öffnungen etc.) als Funktion von Ort und Zeit fest.

10.2 Vorgehensweise bei der Berechnung

Die Ausführung einer CFD-Berechnung basiert auf folgendem systematischen Vorgehen:

- Festlegung des Simulationsbereichs
- Erstellung eines Geometriemodells
- Erzeugung eines Rechengitters
- Auswahl der mathematischen Modelle für die Simulation:
 - Turbulenzmodell
 - Verbrennungsmodell
 - Strahlungsmodell etc.
- Instationäre Berechnungen: Setzen der Simulationsdauer und der Zeitschrittweite
- Spezifikation von Anfangsbedingungen der Berechnung und von Randbedingungen:
 - Geschwindigkeiten
 - Drücke
 - Temperaturen
 - Konzentrationen
 - Turbulenzgrößen etc.
- Definition von Stoffwerten
- Auswahl von Diskretisierungsverfahren
- Spezifikation von Konvergenzkriterien
- Ausführung der Berechnung
- Auswertung der Ergebnisse:
 - Interpretation
 - Bewertung
 - Schlussfolgerungen
- Dokumentation

In Abschnitt 10.3 werden weitergehende Informationen zu den hier genannten Punkten sowie Vorgaben bzw. Empfehlungen für die praktische Anwendung der Verfahren gegeben. Ein Formblatt zur Dokumentation von Brandsimulationen mittels CFD-Methoden ist in Anhang C enthalten.

10.3 Vorgaben für die Anwendung von CFD-Verfahren

10.3.1 Mathematische Modelle

10.3.1.1 Turbulenzmodelle

Aufgrund der hohen Reynolds-Zahlen und der geometrischen Komplexität sind die Strömungsvorgänge bei der Rauchausbreitung in Gebäuden immer turbulent. Turbulente Strömungen sind stets dreidimensional und instationär und zeichnen sich durch ein Spektrum von Wirbelgrößen aus, was bei gebäudetypischen Reynolds-Zahlen drei bis vier Größenordnungen

specify the states at the boundaries of the flow field (e.g. at walls, ceilings, openings, etc.) as functions of space and time.

10.2 Calculation procedure

A CFD calculation is based on the following systematic procedure:

- specification of the simulation range
- design of a geometry model
- generation of a calculation grid
- selection of the mathematical models to be used for the simulation:
 - turbulence model
 - combustion model
 - radiation model, etc.
- transient calculations: setting of simulation period and time increments
- specification of initial conditions for the calculation and of boundary conditions:
 - velocities
 - pressures
 - temperatures
 - concentrations
 - turbulence parameters, etc.
- definition of materials data
- selection of discretisation methods
- specification of convergence criteria
- performance of the calculation
- analysis of the results:
 - interpretation
 - evaluation
 - conclusions
- documentation

Section 10.3 provides further information regarding the above items as well as requirements and recommendations for the practical application of the methods. Annex C contains a form for documentation of fire simulations using CFD methods.

10.3 Requirements for the application of CFD methods

10.3.1 Mathematical models

10.3.1.1 Turbulence models

Due to the high Reynolds numbers and the geometrical complexity, the flow processes occurring during smoke spread in buildings are always turbulent. Turbulent flows are always three-dimensional and transient and are characterised by a spectrum of eddy parameters that comprises three to four orders of magnitude in the case of building-typical Reynolds

gen umfasst. Um dieses Spektrum an Längenskalen in einer CFD-Rechnung numerisch vollständig auflösen zu können, sind auch bei einfachen Geometrien in jeder der drei Raumrichtungen mehr als 1000 Gitterpunkte/cm notwendig, was zu einem unrealistisch hohen Speicherplatz- und Rechenzeitbedarf führt. Zur Berechnung technisch relevanter turbulenter Strömungen wurden deshalb vereinfachte Ansätze, sogenannte Turbulenzmodelle eingeführt. Hierbei haben sich die Zweigleichungs-Turbulenzmodelle als besonders verlässlich erwiesen. Zu nennen sind z. B. das Standard- k - ε -Modell, das k - ω -SST-Modell, das RNG- und das Realizable- k - ε -Modell. Zur Berechnung der Rauchausbreitung in Räumen ist mindestens die Verwendung eines Zweigleichungs-Turbulenzmodells zwingend erforderlich.

Bei der Erstellung eines Simulationsmodells ist im Zusammenhang mit der Turbulenz besonderes Augenmerk auf wandnahe Bereiche zu richten. Wegen der Tatsache, dass das Fluid (Luft oder Luft-Rauchgemisch) an Wänden haftet, fallen die Strömungsgeschwindigkeiten in diesem Bereich, der als Grenzschicht bezeichnet wird, auf Null. Dies führt dazu, dass die Turbulenz in unmittelbarer Nähe von Oberflächen verschwindet. Geschwindigkeitsprofile an Oberflächen besitzen eine universelle Struktur, deren Verlauf direkt an der Oberfläche linear und mit zunehmender Entfernung zur Oberfläche logarithmisch ist (Bild 14).

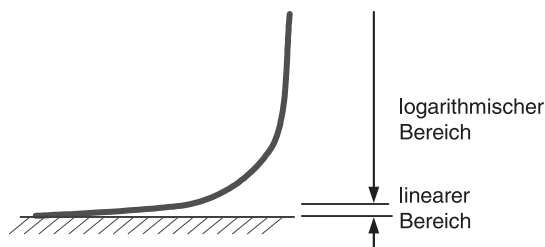


Bild 14. Geschwindigkeitsprofil an einer Oberfläche

Zweigleichungs-Turbulenzmodelle in CFD-Verfahren tragen diesem Umstand Rechnung durch die Überlagerung sogenannter Wandfunktionen, wobei in der Regel zwischen logarithmischen und linearen Wandfunktionen unterschieden wird. Die richtige Wahl der Wandfunktion hängt entscheidend von der Lage der wandnächsten Gitterpunkte ab, das heißt von der Dicke der an die Wand angrenzenden Zellschicht. Entsprechende Anwendungsregeln sind in den Dokumentationen der jeweiligen Simulationsprogramme zu finden.

Alternativ zur Anwendung eines Zweigleichungs-Turbulenzmodells und einer entsprechenden Wandfunktion kann bei Entrauchungssimulationen z. B. das Large Eddy Simulation (LES)- oder das Deta-

numbers. To allow complete numerical resolution of this spectrum of longitudinal scales in a CFD calculation, more than 1000 grid points per centimetre will be needed in each of the three spatial directions, even for simple geometries, requiring unrealistically large storage spaces and long calculation times. For this reason, simplified approaches, so-called turbulence models are introduced for the calculation of technically relevant turbulent flows. Among these, the two-equation turbulence models have proven to be particularly reliable. They include, e.g., the standard k - ε model, the k - ω -SST model, the RNG model and the realizable k - ε model. For the calculation of smoke spread in rooms, using at least one two-equation turbulence model is imperative.

When designing a simulation model, the near-wall areas must be particularly focused on in terms of turbulence. On account of the fact that the fluid (air or air-smoke mixture) adheres to walls, the flow velocities drop to zero in this area which is called boundary layer. As a consequence, turbulence vanishes in the immediate vicinity of surfaces. Velocity profiles at surfaces exhibit a universal structure whose pattern is linear directly at the surface and becomes logarithmic as the distance to the surface increases (Figure 14).

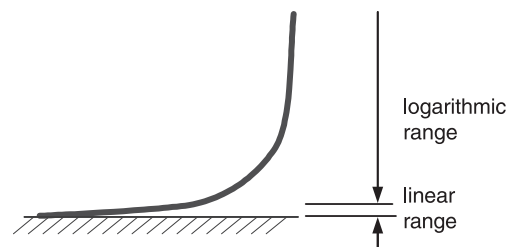


Figure 14. Velocity profile at a surface

Two-equation turbulence models used in CFD methods take this circumstance into account by superimposing so-called wall functions, usually distinguished into logarithmic and linear wall functions. Proper selection of the wall function decisively depends on the location of the grid points nearest the wall, i.e. on the thickness of the cell layer adjacent to the wall. Pertinent application rules can be found in the documentations of the respective simulation software.

As alternatives to a two-equation turbulence model and the respective wall function, smoke-removal simulations can be performed using, e.g., the Large Eddy Simulation (LES) or the Detached Eddy Simulation

ched Eddy Simulation (DES)-Verfahren zum Einsatz kommen. Bei diesen Verfahren werden großskalige Turbulenzstrukturen in der Berechnung aufgelöst, während kleine Wirbel durch ein einfaches Turbulenzmodell berücksichtigt werden. Es ist anzumerken, dass der Rechenaufwand für DES und LES um Größenordnungen höher liegt als bei der Verwendung von Zweigleichungs-Turbulenzmodellen, weil die Netze ausreichend fein sein müssen, damit nur die „kleinen“ Wirbel mit dem einfachen, sogenannten Smagorinsky-Ansatz modelliert werden müssen. Die Verwendung dieser Methoden auf zu groben Netzen oder mit zu großen Zeitschritten kann größere Fehler verursachen.

Vorgaben in Bezug auf die Feinheit von Rechnetzen werden in Abschnitt 10.3.3 gezeigt.

10.3.1.2 Auftriebsmodell

Der thermische Auftrieb innerhalb einer Strömung findet bei deren Berechnung Berücksichtigung im Auftriebsterm der Impulserhaltungsgleichung. Diese Beziehung beschreibt die Kräftebilanz innerhalb der Strömung:

$$\vec{F}_{Tr} = \vec{F}_{Druck} + \vec{F}_{Reib} + \vec{F}_{Auftrieb} \quad (31)$$

Dabei ist

\vec{F}_{Tr}	Trägheitskraft in N
\vec{F}_{Druck}	Druckkraft in N
\vec{F}_{Reib}	Reibungskraft (turbulente und viskose Reibung) in N
$\vec{F}_{Auftrieb}$	Auftriebs- bzw. Gewichtskraft in N

Von den Termen in Gleichung (31) sind neben der Auftriebskraft auch die Trägheits- und die Reibungskraft Funktionen der Dichte und damit auch der Temperatur. Eine mitunter verwendete Vereinfachung ist es, die Temperaturabhängigkeit der Dichte im Trägheits- und im Reibungsterm zu vernachlässigen (sogenannte Boussinesq-Approximation). Bei Temperaturdifferenzen im Strömungsfeld, die einen Wert von ca. $\Delta\vartheta \approx 50$ K überschreiten, ist die Verwendung dieser Vereinfachung zu vermeiden.

10.3.1.3 Verbrennungs- und Schadstoffmodelle

Zur Modellierung eines Brandherds innerhalb einer CFD-Rechnung sind verschiedene Ansätze denkbar. In der Regel werden

- volumetrische Modelle,
- flächenförmige Modelle oder
- detaillierte Verbrennungsmodelle

eingesetzt. Bei volumetrischen oder flächenförmigen Modellen wird die bei einem zu untersuchenden

(DES) method. These methods consist in resolving large-scale turbulence structures in the calculation while considering small eddies by means of a simple turbulence model. Note that the computing time required for the DES and LES methods exceeds that required for the application of two-equation turbulence models by orders of magnitude. This is due to the fact that the grids must be fine enough to ensure that only the “small” eddies have to be modelled using the simple, so-called Smagorinsky approach. Applying these methods to grids that are too rough or whose time increments are too long may cause major errors.

Specifications concerning the graininess of calculation grids are given in Section 10.3.3.

10.3.1.2 Thermal-updraught model

The thermal updraught within a flow is taken into account in the flow calculation by means of the thermal-updraught term of the equation for conservation of momentum. This relation describes the balance of forces within the flow:

$$\vec{F}_{Tr} = \vec{F}_{Druck} + \vec{F}_{Reib} + \vec{F}_{Auftrieb} \quad (31)$$

where

\vec{F}_{Tr}	inertial force, in N
\vec{F}_{Druck}	pressure force, in N
\vec{F}_{Reib}	friction force (turbulent and viscous friction), in N
$\vec{F}_{Auftrieb}$	thermal-updraught force or weight force, in N

Among the terms in Equation (31), in addition to the thermal-updraught force, also the inertial and friction forces are functions of density and, thus, of temperature. The equation is sometimes simplified by neglecting the temperature dependence of density in the inertia and friction terms (so-called Boussinesq approximation). For temperature differences in the flow field exceeding a value of approx. $\Delta\vartheta \approx 50$ K, this simplification shall be avoided by all means.

10.3.1.3 Combustion and contaminant models

Various approaches are conceivable for modelling a fire source. As a rule,

- three-dimensional models,
- two-dimensional models or
- detailed combustion models

are used. In three- and two-dimensional models, the heat released during a fire scenario to be examined is

Brandszenario freigesetzte Wärme in Form eines Quellterms innerhalb eines Volumens oder über eine Fläche modelliert. Flächenförmige Modelle finden Anwendung, wenn zu erwarten ist, dass der zu berücksichtigende Brandherd im Wesentlichen eine ebene Ausdehnung aufweist (z. B. Lachen- bzw. Flüssigkeitsbrände). Bei der Anwendung von volumetrischen Modellen gilt es zu berücksichtigen, dass das Volumen, innerhalb dessen die Wärmefreisetzung stattfindet, dem Volumen des darzustellenden Brands entspricht (z. B. Regal, Pkw).

Die durch den Quellterm zu berücksichtigenden Wärmefreisetzungsraten können den Brandverlaufskurven gemäß VDI 6019 Blatt 1 entnommen werden.

Neben dem Quellterm für die Wärmefreisetzung kann in volumetrische und flächenförmige (Brandherd-)Modelle auch ein Quellterm für ein „Tracergas“ eingearbeitet werden. Hierbei darf kein zusätzlicher Luftmassenstrom in das Modell eingebracht werden. Bei Verwendung eines solchen Quellterms kann aus den Simulationsergebnissen eine Aussage über die Konzentrationsverteilung dieses Gases im Raum gewonnen werden. Unter der Voraussetzung, dass die Schadstofffreisetzung des zu erwartenden Realbrands bekannt ist, kann mithilfe dieser Konzentrationsverteilung auf die Absolutwerte eines Schadstoffs im zu betrachtenden Raum geschlossen werden.

Detaillierte Verbrennungsmodelle basieren auf der Lösung von Transportgleichungen für Spezieskonzentrationen für Ein- oder Mehrschrittreaktionen (Eddy-Breakup- oder Eddy-Dissipation-Modelle gegebenenfalls kombiniert mit einem Arrhenius-Ansatz) oder darauf, die Spezieskonzentrationen, Temperaturen, Stoffwerte usw. als Funktion des Mischungsbruchs und ihre Varianz aus vorgefertigten Tabellen zu interpolieren (Flamelet- und Presumed-PDF-Modelle). Entsprechende Anwendungsregeln sind in den Dokumentationen der jeweiligen Simulationsprogramme zu finden.

Für die Verwendung eines solchen Verbrennungsmodells ist die genaue Kenntnis der Zusammensetzung des Brandguts erforderlich, um sinnvolle Ansätze für die Verbrennungsreaktion zu formulieren.

10.3.1.4 Strahlungsmodelle

Strahlung ist neben Konvektion und Wärmeleitung die dritte Art des Wärmetransports und muss in der Simulation berücksichtigt werden.

Der Strahlungswärmetransport kann in der CFD-Berechnung hinreichend genau beschrieben werden durch das P1-Modell (für einfache Modelle und Parameterstudien), den DTRM-Ansatz, das Monte-Carlo-Verfahren und das DO-Modell.

modelliert durch einen Quellterm innerhalb eines Volumens oder einer Fläche. Zwei-dimensionale Modelle werden verwendet, wenn die zu berücksichtigende Wärmequelle als im Wesentlichen ebene Ausdehnung (wie z. B. bei Flüssigkeitsbränden) betrachtet werden kann. Bei der Anwendung von drei-dimensionalen Modellen muss sichergestellt werden, dass das Volumen, in dem die Wärme freigesetzt wird, dem Volumen des zu simulierenden Brands entspricht (z. B. Regal, Pkw).

Die Wärmeabgaberate, die durch den Quellterm zu berücksichtigen sind, können den Brandverlaufskurven gemäß VDI 6019 Blatt 1 entnommen werden.

Neben dem Quellterm für die Wärmeabgabe kann in drei- und zwei-dimensionalen (Brandherd-)Modellen auch ein Quellterm für ein „Tracergas“ eingebracht werden. Hierbei darf kein zusätzlicher Luftmassenstrom in das Modell eingebracht werden. Bei Verwendung eines solchen Quellterms kann aus den Simulationsergebnissen eine Aussage über die Konzentrationsverteilung dieses Gases im Raum gewonnen werden. Unter der Voraussetzung, dass die Schadstoffabgabe des zu erwartenden Realbrands bekannt ist, kann mithilfe dieser Konzentrationsverteilung auf die Absolutwerte eines Schadstoffs im zu betrachtenden Raum geschlossen werden.

Detaillierte Verbrennungsmodelle basieren auf der Lösung von Transportgleichungen für Spezieskonzentrationen für Einzel- oder Mehrschrittreaktionen (Eddy-Breakup- oder Eddy-Dissipationsmodelle gegebenenfalls kombiniert mit einem Arrhenius-Ansatz) oder auf der Interpolation von Spezieskonzentrationen, Temperaturen, Stoffwerten usw. als Funktion des Mischungsbruchs und ihrer Varianz aus vorgefertigten Tabellen (Flamelet- und Presumed-PDF-Modelle). Entsprechende Anwendungsregeln sind in den Dokumentationen der jeweiligen Simulationsprogramme zu finden.

Für die Verwendung eines solchen Verbrennungsmodells ist die genaue Kenntnis der Zusammensetzung des Brandguts erforderlich, um sinnvolle Ansätze für die Verbrennungsreaktion zu formulieren.

10.3.1.4 Radiation models

Radiation is the third type of heat transport, in addition to convection and heat conduction, and must be taken into account in the simulation.

Radiant-heat transport can be described to sufficient accuracy in the CFD calculation by means of the P1 model (for simple models and parameter studies), the DTRM approach, the Monte-Carlo method and the DO model.

Zur Berechnung des Strahlungswärmetransports mit vorgenannten Modellen sind Emissions- und Absorptionskoeffizienten der beteiligten Oberflächen und Rauchgaskomponenten zu spezifizieren. Im Rahmen der Simulation kann hierbei auf eine wellenlängenabhängige Betrachtung verzichtet werden. Als Emissionskoeffizient für Rauchgase kann der (mittlere) Wert $\varepsilon_{\text{Rauch}} \approx 0,6$ verwendet werden.

Mit vorgenannten Modellierungsansätzen wird eine hinreichend hohe Genauigkeit bei der Vorhersage des Strahlungswärmetransports realisiert.

10.3.2 Geometrie

Zur Erstellung eines CFD-Gebäudemodells ist zunächst die Geometrie des zu untersuchenden Berechnungsgebiets (Raum, Gebäude, Umgebung) mithilfe eines CAD-Programms oder eines Preprozessors realitätsnah darzustellen. Hierbei müssen sämtliche, die Strömung wesentlich beeinflussende Bauteile (Balustraden, Geländer, in den Raum hineinragende Decken, Galerien etc.) maßstäblich abgebildet werden.

Die Ränder des betrachteten Gebiets, das heißt die Oberflächenstruktur von Böden, Wänden und Decken sowie Einbauten, sind maßstäblich zu berücksichtigen. Insbesondere sind gekrümmte Oberflächen stetig abzubilden.

Die Geometrie und später auch das Gitternetz sind dreidimensional auszuführen. Zweidimensionale CFD-Berechnungen werden den komplexen Strömungszuständen im Entrauchungsfall nicht gerecht.

10.3.3 Gitternetz

Die Aufgabe von Netzgenerierungsverfahren ist es, die bei Brandsimulationen auftretenden komplexen geometrischen Räume effizient in kleine Kontrollvolumina oder Elemente zu unterteilen. Dabei müssen je nach Rechenverfahren verschiedene Qualitätsanforderungen an die Elemente eingehalten werden. Darüber hinaus existieren Minimalanforderungen in Bezug auf die Zellenzahl, um die auftretenden Strömungsverhältnisse realitätsnah abbilden zu können.

Die am häufigsten verwendeten Elementtypen sind Hexaeder, Tetraeder, Prismen, Pyramiden und Polyeder. Beim Aufbau des Rechengitters aus diesen Elementen sind empirische Kriterien einzuhalten, um qualitativ hochwertige Gitter und CFD-Lösungen zu erhalten. Diese Kriterien sind für alle Elementtypen gültig. Folgende Kriterien sind zu nennen:

- Die Winkel zwischen Gitterlinien (Netzwinkel) sollen im Intervall $20^\circ < \alpha < 160^\circ$ liegen. Diese Winkel haben einen direkten Einfluss auf die Abbruchfehler der Diskretisierungsverfahren und die Diskretisierungsfehler der Lösung.

Calculating the radiant-heat transport using one of the aforementioned models requires emission and absorption coefficients of the surfaces involved and smoke-gas components to be specified. No wavelength-dependent approach need be taken during the simulation. The (mean) value of $\varepsilon_{\text{Rauch}} \approx 0,6$ can be used as emission coefficient for smoke gases.

These modelling approaches afford a sufficiently high degree of accuracy in the prediction of the radiant-heat transport.

10.3.2 Geometry

When designing a CFD building model, first the geometry of the area to be considered in the calculation (room, building, environment) must be realistically emulated using CAD software or another preprocessor. In doing so, all building elements having a considerable effect on the flow (balustrades, railings, ceilings protruding into the room, galleries, etc.) must be mapped to scale.

The boundaries of the area considered, i.e. the surface structures of floors, walls and ceilings as well as fittings shall be to scale. In particular, curved surfaces must be mapped continuously.

The geometry and, later on, also the grid shall be designed to be three-dimensional. Two-dimensional CFD calculations fail to give consideration to the complex flow conditions in the smoke-removal case.

10.3.3 Grid

Grid generation methods serve to efficiently subdivide the complex geometric rooms occurring in fire simulations into small control volumes, or elements. Depending on the calculation method, the elements must fulfil various quality requirements. Furthermore, minimum requirements are to be met with regard to the number of cells so as to allow a realistic simulation of the flow conditions.

The most commonly used types of elements are hexahedra, tetrahedra, prisms, pyramids and polyhedra. When composing the grid using these elements, empirical criteria must be observed for high-quality grids and CFD solutions to be obtained. These criteria are valid for all element types. The following criteria must be noted:

- The angles between grid lines (grid angles) shall, if possible, observe an interval of $20^\circ < \alpha < 160^\circ$. These angles have a direct impact on the truncation errors of the discretisation on methods and the discretisation errors of the solution.

- Die Expansionsrate des Rechengitters, das heißt das Verhältnis der Zellgrößen von jeweils zwei Nachbarzellen, beeinflusst die Abbruch- und die Diskretisierungsfehler. Es wird empfohlen, dieses Verhältnis kleiner als ca. 1,5 zu wählen.
- Rechengitter müssen in den Gebieten verfeinert werden, in denen sich die Strömungsgrößen stark ändern. Dies ist z. B. in der Nähe von Oberflächen oder im Auftriebsstrahl oberhalb des Brandherds der Fall.
- Ein gewisses Längen- zu Seitenverhältnis (Aspect Ratio) der einzelnen Zellen ist einzuhalten, da sonst das iterative Lösungsverfahren nicht mehr oder nur noch unzureichend konvergiert. Auch können bei zu hohem Aspect Ratio Rundungsfehler das Ergebnis negativ beeinflussen. Der einzuhaltende Zahlenwert für das Aspect Ratio ist dem Handbuch des genutzten CFD-Programms zu entnehmen.

Bei der Erzeugung des Rechengitters ist weiterhin darauf zu achten, dass der wandnächste Gitterknotenpunkt im Anwendungsbereich der genutzten Wandfunktion liegt (bei Verwendung eines Zweigleichungs-Turbulenzmodells: siehe Dokumentation des verwendeten Berechnungsprogramms).

Neben den vorgenannten Qualitätskriterien für die einzelne Zelle spielt die Anzahl und Positionierung der eingesetzten Zellen eine weitere zentrale Rolle für die Qualität der Berechnungsergebnisse.

Als Abschätzung für die notwendige Zellenanzahl N_{Zellen} hat sich die Formulierung

$$N_{\text{Zellen}} = 44,4 \cdot 10^3 V_{\text{Raum}}^{0,38} \quad (32)$$

bewährt, die grafisch in Bild 15 dargestellt ist (V_{Raum} = umbauter Raum des betrachteten Gebäudes in m^3).

Bei der Verteilung der Zellen im Strömungsgebiet ist auf folgende Kriterien zu achten:

- Strömungsrelevante Geometrien sind mit mindestens fünf Gitterpunkten je Kantenlänge abzubilden.
- Öffnungen und Durchlässe sind mit mindestens fünf Gitterpunkten auf der kurzen Achse abzubilden.
- Galerien sind in der Höhe mit mindestens zehn Gitterpunkten bzw. mit einer Kantenlänge $\leq 0,3$ m über die lichte Höhe abzubilden.
- Im Bereich der Konvektionsströmung oberhalb des Brandherds ist eine Kantenlänge von $0,15$ m der Gitterelemente nicht zu überschreiten.

Darüber hinaus ist das Rechenetz an die Kontur der Raumgeometrie anzupassen. Dies gilt insbesondere für schräge oder gekrümmte Flächen.

- The expansion rate of the grid, i.e. the ratio of the cell sizes of two each neighbouring cells, influences the truncation and discretisation errors. A ratio of less than approx. 1,5 is recommended.
- Grids must be refined in areas where the flow parameters change significantly. This is the case, e.g., near surfaces or in the thermal-updraught jet above the seat of fire.
- The individual cells shall observe a specific aspect ratio for otherwise, the iterative solution method will no longer, or only insufficiently, converge. Also, the result can be affected by rounding errors if the aspect ratio is too high. The numerical value to be observed for the aspect ratio shall be taken from the manual of the CFD software used.

In generating the grid, also make sure that the grid intersection point nearest the wall lies within the application range of the wall function used (when using a two-equation turbulence model: see documentation of the calculation software used).

Apart from the aforementioned quality criteria for the individual cell, the number and positioning of the cells used are a further important factor for the quality of the calculation results.

A proven estimate for the required number of cells, N_{Zellen} , is given by the formula

$$N_{\text{Zellen}} = 44,4 \cdot 10^3 V_{\text{Raum}}^{0,38} \quad (32)$$

which is graphically represented in Figure 15 (V_{Raum} = cubical content of the building considered, in m^3).

The following criteria shall be observed in distributing the cells over the flow range:

- Flow-relevant geometries shall be mapped using at least five grid points per edge length.
- Openings and passages shall be mapped using at least five grid points along the short axis.
- Gallery heights shall be mapped using at least ten grid points, or an edge length $\leq 0,3$ m, over the clear height.
- In the area of the convection flow above the seat of fire, the edge length of the grid elements shall not exceed $0,15$ m.

Furthermore, the grid shall be matched to the contour of the room geometry. This holds in particular for inclined or curved surfaces.

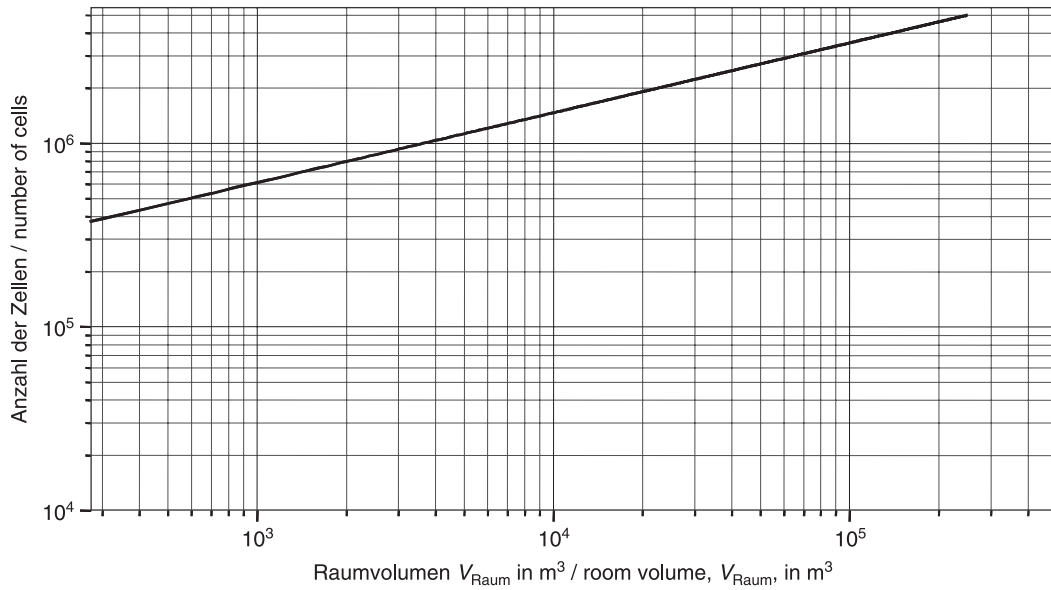


Bild 15. Notwendige Anzahl von Zellen bei der Anwendung von CFD-Verfahren

Figure 15. Number of cells required for the application of CFD methods

Bei Verwendung eines LES-Ansatzes ist die Anzahl der Zellen zu erhöhen. Es wird empfohlen, in strömungstechnisch relevanten Bereichen eine Kantenlänge von 0,15 m der Gitterelemente nicht zu überschreiten. In Bezug auf die oben aufgeführten Kriterien ist das Gitternetz zu verfeinern.

When using an LES approach, the number of cells must be increased. A maximum edge length of 0,15 m is recommended for grid elements in flow-relevant areas. As far as the above criteria are concerned, the grid is to be refined.

10.3.4 Diskretisierung

Nach der Aufteilung des Rechengebiets in Elemente bzw. Kontrollvolumina und der Definition der mathematischen Modelle müssen die Modellgleichungen diskretisiert, das heißt von Differenzialgleichungen in algebraische Gleichungen überführt werden.

10.3.4 Discretisation

After the area to be considered in the calculation has been subdivided into elements or control volumes and the mathematical model has been defined, the model equations must be discretised, i.e. converted from differential equations into algebraic equations.

Die hierfür eingesetzten Diskretisierungsverfahren weisen grundsätzlich Diskretisierungs- bzw. Abbruchfehler auf, wobei Verfahren mit Abbruchfehlern höherer Ordnung (das heißt höher als „Eins“) wesentlich geringere Diskretisierungsfehler als Verfahren mit Abbruchfehlern 1. Ordnung liefern.

As a matter of principle, the discretisation methods used to this end exhibit discretisation and truncation errors, methods with higher-order truncation errors (i.e. greater than unity) yielding considerably smaller discretisation errors than methods with first-order truncation errors.

Generell gilt:

As a general rule, the following holds:

- Nach Möglichkeit ist ein Diskretisierungsverfahren mit einem Abbruchfehler 2. oder höherer Ordnung im Raum und in der Zeit für alle Variablen zu verwenden.
- Nur wenn mit den obigen Verfahren keine Konvergenz erzielt werden kann, sollte auf Verfahren mit Abbruchfehlern 1. Ordnung zurückgegangen werden. Dabei empfiehlt es sich, diese Verfahren nur für die nicht konvergierende Variable zu verwenden. In diesem Fall ist eine gründliche Fehlerabschätzung notwendig.

- Where possible, use a discretisation method with a second- or higher-order truncation error in space and time for all variables.
- It is only where no convergence can be achieved using the above methods that methods with first-order truncation errors should be fallen back on. It is recommended, then, to use these methods but for the non-converging variable. A thorough error estimate will be necessary in this case.

10.3.5 Setzen der Simulationsdauer und des Zeitschritts

Die Simulationsdauer bei Entrauchungssimulationen muss mindestens den Zeitraum vom Ausbruch des Brands bis zum Erreichen relevanter Schlüsselereignisse, z.B. Abschluss der Entfluchtung, Beginn der Brandbekämpfung durch die Feuerwehr, umfassen.

Generell muss der Zeitschritt so klein gewählt werden, dass die physikalischen Effekte aufgelöst werden können. Typische Zeitschrittweiten zu Beginn der Simulation liegen bei 0,5 s. Im weiteren Verlauf kann der Zeitschritt sukzessive vergrößert werden.

Bei Verwendung eines LES-Ansatzes ist die Zeitschrittweite deutlich (z.B. um den Faktor 10) zu verringern.

10.3.6 Spezifikation von Anfangsbedingungen

Bei der Berechnung instationärer Strömungen, wie dies bei Entrauchungsstudien der Fall ist, sind die Anfangsbedingungen Teil des mathematischen Problems. Deswegen müssen diese besonders sorgfältig gewählt werden und physikalisch sinnvoll sein.

Die Anfangsbedingungen der instationären Berechnungen können z.B. ermittelt werden durch die vorgeschaltete Berechnung der Raumströmung vor Brandbeginn. Ebenfalls geeignet ist der „Start aus der Ruhe“. Beim Start aus der Ruhe gilt für die mittleren Geschwindigkeitskomponenten in den drei Raumrichtungen

- Druck,
- Temperatur und
- Konzentrationen:

$$\left. \begin{matrix} \vec{w} = 0 \\ p = p_0 \\ T = T_0 \\ c^n = c_0^n \end{matrix} \right\} = \text{für } t = 0 \tag{33}$$

Der Index „0“ steht jeweils für konstante Werte zu Beginn der Rechnung. Für die Turbulenzgrößen eines Zweigleichungs-Turbulenzmodells empfiehlt sich beim Start aus der Ruhe der folgende Wert für die turbulente kinetische Energie:

$$k = 1 \cdot 10^{-30} \text{ m}^2/\text{s}^2 \tag{34}$$

10.3.7 Spezifikation von Randbedingungen

Randbedingungen für Brandsimulationen sollen in der Regel von einer detaillierten Analyse der klimatischen und Lüftungstechnischen Situation im zu betrachtenden Gebäude abgeleitet werden. Dies führt typischerweise zu mehreren Sätzen von Randbedingungen.

10.3.5 Setting the simulation period and the time increment

The simulation period for smoke-removal simulations must cover at least the time period elapsing from the outbreak of fire to the reaching of relevant key events such as the completion of evacuation or the onset of firefighting by the fire brigade.

Generally, the time increment must be chosen small enough for the physical effects to be resolved. Typical time increments at the beginning of the simulation are about 0,5 s. During the further course of the simulation, the increment can be increased gradually.

When using an LES approach, the time increment shall be reduced considerably (e.g. by a factor of 10).

10.3.6 Specification of initial conditions

When calculating transient flows as is the case in smoke-removal studies, the initial conditions are Part of the mathematical problem. They must, therefore, be chosen with particular care, and must be physically reasonable.

The initial conditions of the transient calculations can be determined, e.g., by first calculating the flow in the room prior to the outbreak of fire. Another suitable method is the “start from rest”. When starting from rest, the following holds for the mean velocity components in the three spatial directions

- pressure,
- temperature and
- concentrations:

$$\left. \begin{matrix} \vec{w} = 0 \\ p = p_0 \\ T = T_0 \\ c^n = c_0^n \end{matrix} \right\} = \text{for } t = 0 \tag{33}$$

The subscript “0” in each case denotes constant values at the beginning of the calculation. As for the turbulence parameters of a two-equation turbulence model, the following value for turbulent kinetic energy is recommended for a start from rest:

$$k = 1 \cdot 10^{-30} \text{ m}^2/\text{s}^2 \tag{34}$$

10.3.7 Specification of boundary conditions

As a rule, boundary conditions for fire simulations shall, if possible, be derived from a detailed analysis of the climatic and ventilation situation in the building to be considered. This will typically yield several sets of boundary conditions.

Auf den Oberflächen des Berechnungsgebiets müssen entweder zeitlich konstante Werte der abhängigen Variablen (Geschwindigkeitskomponenten, Drücke, Temperaturen, Wärmeströme, Konzentrationen) oder deren zeitlicher Verlauf vorgegeben werden.

On the surfaces of the area to be considered in the calculation, either time-invariant values of the dependent variables (velocity components, pressures, temperatures, heat flows, concentrations) or their development over time shall be specified.

10.4 Darstellung und Bewertung der Simulationsergebnisse

10.4 Representation and evaluation of the simulation results

In Anhang C ist ein Datenblatt zur Dokumentation von Brandsimulationen mit CFD-Verfahren beigelegt. Das Ausfüllen dieses Datenblatts ist erforderlich. Je detaillierter die Angaben im Datenblatt gemacht werden, desto besser kann die damit dokumentierte CFD-Simulation und deren Qualität und Zuverlässigkeit beurteilt werden.

A data sheet for the documentation of fire simulations using CFD methods is attached in Annex C; its completion is mandatory. The more detailed the information supplied in the data sheet, the better will it be possible to evaluate the CFD simulation thus documented, including its quality and reliability.

Es ist eine Kontrolle von

With regard to

- Iterationsfehler,
- Diskretisierungsfehler und
- Rundungsfehler

- iteration errors,
- discretisation errors and
- rounding errors

entsprechend der Dokumentation des Softwareherstellers durchzuführen.

a check shall be made in accordance with the software manufacturer’s documentation.

In der Dokumentation der Ergebnisse ist eine Plausibilitätskontrolle durchzuführen. Hierzu kann z. B. die Ausbreitung des Plumes bewertet oder die Umströmung von Gebäudekanten, z. B. im Bereich von Galerien, geprüft werden.

In documenting the results, a plausibility check shall be made. For instance, the spread of the plume can be evaluated, or the flow around building edges, e. g. in the area of galleries, can be checked to this end.

Die Rauchschichtgrenze kann identifiziert werden in der Höhe, in der die Temperatur und/oder die (Tracer-)Gaskonzentration die größte Änderung erfährt. Beispielhaft ist der Temperaturverlauf $\vartheta = f(z)$ über die Höhe eines Raums in Bild 16 dargestellt (durchgezogene Linie). Darüber hinaus zeigt diese Abbildung den Verlauf des Temperaturgradienten $d\vartheta/dz = f'(z)$. Die Schichtgrenze ergibt sich für die betrachtete Position als absolutes Maximum des Temperaturgradienten:

The smoke-layer boundary can be identified at the height where temperature and/or (tracer) gas concentration exhibit the greatest change. By way of example, Figure 16 shows the development of temperature over room height, $\vartheta = f(z)$ (solid line). Furthermore, this figure shows the curve of the temperature gradient, $d\vartheta/dz = f'(z)$. The layer boundary for the position considered is, then, the absolute maximum of the temperature gradient:

$$d\vartheta/dz = (d\vartheta/dz)_{\max}$$

$$d\vartheta/dz = (d\vartheta/dz)_{\max}$$

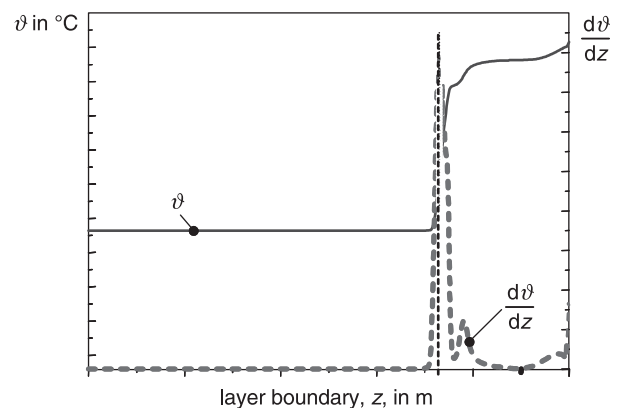
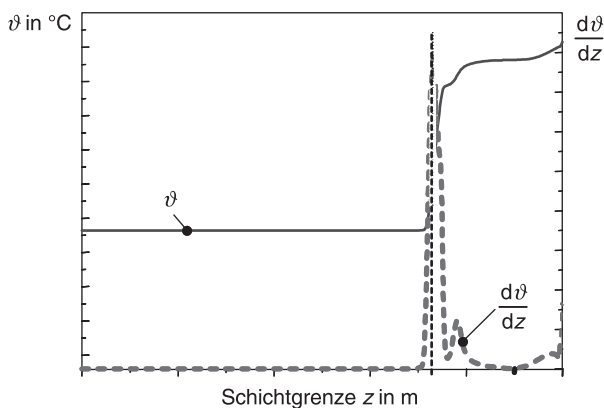


Bild 16. Temperaturverlauf ϑ und Temperaturgradientenverlauf $d\vartheta/dz$ in vertikaler Raumrichtung

Figure 16. Temperature curve, ϑ , and temperature-gradient curve, $d\vartheta/dz$, in the vertical spatial direction

Zur Bewertung der Schichthöhe sind die für das Schutzziel maßgebenden Positionen zu betrachten.

Sofern keine ausgeprägte Schichtgrenze aus den Berechnungsergebnissen abzuleiten ist, ist davon auszugehen, dass eine Schichtbildung nicht stattfindet.

11 Modellversuche

11.1 Einleitung

Die Dimensionierung von Entrauchungssystemen im Rahmen von Modelluntersuchungen beruht auf der Tatsache, dass unter bestimmten Bedingungen Ähnlichkeit besteht zwischen den Strömungsvorgängen in einem Originalbaukörper und den Verhältnissen in einem Modell dieses Baukörpers. Die notwendigen Bedingungen für die Gleichartigkeit der Strömungen werden durch die sogenannten Ähnlichkeitskennzahlen definiert.

11.2 Modellgesetzmäßigkeiten (Ähnlichkeitskennzahlen)

Zwei physikalische Vorgänge sind ähnlich, wenn sie physikalisch gleichartig sind und wenn alle Größen, die die betrachteten Vorgänge beeinflussen, also auch die Randbedingungen, ähnlich sind.

Die einzuhaltenden Bedingungen für die Durchführung von Modellversuchen gewinnt man aus den Größenbeziehungen, die den betrachteten physikalischen Vorgang beschreiben; bei anisothermen, turbulenten Strömungen sind dies folgende Differenzialgleichungen:

- Bewegungsgleichung
- Energiegleichung
- Wärmeübergangsgleichung

Die Bewegungsgleichung gibt das Gleichgewicht der auf eine Volumeneinheit bezogenen Kräfte wieder.

In der Energiegleichung ist das Gleichgewicht der durch Transport und Leitung übertragenen Wärmeleistungen pro Volumeneinheit dargestellt, und in der Wärmeübergangsgleichung entspricht die pro Flächeneinheit übertragene Leistung dem durch die laminare Grenzschicht an Wänden transportierten Wärmestrom.

Für turbulente, anisotherme Strömungen lassen sich aus der Bewegungsgleichung folgende Ähnlichkeitskennzahlen ableiten:

Reynolds-Zahl:

$$Re = \frac{L_B U_B}{\nu_B} \quad (35)$$

For an evaluation of the layer height, the positions relevant to the protection goal are to be considered.

Where no significant layer boundary can be derived from the calculation results, it can be assumed that layer formation does not occur.

11 Simulation tests

11.1 Introduction

The dimensioning of smoke-exhaust ventilation systems by means of simulation tests is based on the fact that, under specified conditions, a similarity exists between the flow processes in an original structure and the conditions in a model of that structure. The necessary conditions for the similarity of the flows are defined by the so-called similarity characteristics.

11.2 Laws governing simulation (similarity characteristics)

Two physical processes are similar if they are physically similar and if all parameters influencing the processes considered, including the boundary conditions, are similar.

The conditions to be fulfilled for the performance of simulation tests ensue from the parameter relations describing the physical process considered; in the case of anisothermal turbulent flows, these are the following differential equations:

- equation of motion
- equation of energy
- equation of heat transmission

The equation of motion describes the equilibrium of the forces for a unit volume.

The equation of energy describes the equilibrium of the thermal outputs transmitted by heat transport and conduction per unit volume, and in the equation of heat transmission, the output transmitted per unit area corresponds to the heat flow transported through the laminar boundary layer at walls.

For turbulent, anisothermal flows, the following similarity characteristics can be derived from the equation of motion:

Reynolds number:

$$Re = \frac{L_B U_B}{\nu_B} \quad (35)$$

Euler-Zahl:

$$Eu = \frac{\Delta p_B}{U_B^2 \rho_B} \quad (36)$$

Archimedes-Zahl:

$$Ar = \frac{g_B L_B \Delta \vartheta_B}{T_B U_B^2} \quad (37)$$

Strouhal-Zahl:

$$Sr = \frac{L_B}{U_B t_B} \quad (38)$$

Dabei ist

- L_B Bezugslänge in m
- U_B Bezugsgeschwindigkeit in m/s
- ν_B Bezugsviskosität in m²/s
- Δp_B Bezugsdruckdifferenz in Pa
- ρ_B Bezugsdichte in kg/m³
- g_B Bezugserdbeschleunigung in m/s²
- $\Delta \vartheta_B$ Bezugstemperaturdifferenz in K
- T_B Bezugstemperatur in K
- t_B Bezugszeit in s

Aus der Energiegleichung folgt im Wesentlichen die Prandtl-Zahl:

$$Pr = \frac{c_{p,B} \eta_B}{\lambda_B} \quad (39)$$

Dabei ist

- $c_{p,B}$ Bezugswärmekapazität in kJ/(kg K)
- η_B Bezugsviskosität in Pa·s
- λ_B Bezugswärmeleitfähigkeit in W/(m K)

Darüber hinaus sind weitere Ähnlichkeitskennzahlen ableitbar, z. B. *Nu*, *Gr*, *Ec* etc. Da in maßstäblich verkleinerten Modellen nicht alle Kennzahlen gleichzeitig einzuhalten sind, werden die den physikalischen Vorgang bestimmenden Kennzahlen gewählt. Ähnlichkeitskennzahlen, die von untergeordneter Bedeutung für die Strömungsvorgänge sind, werden vernachlässigt.

So ist bei freien, turbulenten Strömungen z. B. *Re* ohne Einfluss auf die Ähnlichkeit zwischen Modell und Original, sodass die den Strömungsvorgang im Wesentlichen beschreibenden Größen *Ar* und *Eu* einzuhalten sind. Darüber hinaus ist bei instationären Strömungsvorgängen die Strouhal-Zahl *Sr* zu berücksichtigen. Die Prandtl-Zahl ist bei Verwendung des Mediums Luft im Modell gleich der im Original vorhandenen.

11.3 Modellmaßstab

Eine notwendige Bedingung für Untersuchungen von Strömungsprozessen in Modellen mit verkleinertem Maßstab ist, dass die Strömungen sowohl in der Na-

Euler number:

$$Eu = \frac{\Delta p_B}{U_B^2 \rho_B} \quad (36)$$

Archimedes number:

$$Ar = \frac{g_B L_B \Delta \vartheta_B}{T_B U_B^2} \quad (37)$$

Strouhal number:

$$Sr = \frac{L_B}{U_B t_B} \quad (38)$$

where

- L_B reference length, in m
- U_B reference velocity, in m/s
- ν_B reference viscosity, in m²/s
- Δp_B reference pressure differential, in Pa
- ρ_B reference density, in kg/m³
- g_B reference gravitational acceleration, in m/s²
- $\Delta \vartheta_B$ reference temperature difference, in K
- T_B reference temperature, in K
- t_B reference time, in s

The energy equation mainly yields the Prandtl number:

$$Pr = \frac{c_{p,B} \eta_B}{\lambda_B} \quad (39)$$

where

- $c_{p,B}$ reference heat capacity, in kJ/(kgK)
- η_B reference viscosity, in Pa·s
- λ_B reference thermal conductivity, in W/(mK)

Further similiary characteristics can be derived, such as *Nu*, *Gr*, *Ec*, etc. Due to the fact that all characteristics cannot be observed at the same time in scaled-down models, the ones determining the physical process are selected. Similarity characteristics of secondary importance to the flow processes are neglected.

In free turbulent flows, e. g., *Re* has no effect on the similarity between model and original. Consequently, the parameters *Ar* and *Eu*, which essentially describe the flow process, shall be observed. For transient flow processes, the Strouhal number, *Sr*, is to be considered additionally. The Prandtl number is the same for the model and the original if the medium used is air.

11.3 Scale of model

A fully-developed turbulent pattern of the flows, both in nature and in the model, is one necessary condition for studies of flow processes using scaled-down mod-

tur als auch im Modell voll ausgebildet turbulent ablaufen. Nur unter dieser Voraussetzung gilt die Vereinfachung, dass die Reynolds-Zahl ohne Einfluss bleibt. Um diese Bedingung zu erfüllen, müssen die Modelle zur Untersuchung von Innenraumströmungen möglichst groß gewählt sein. Als Erfahrungswerte haben sich Modellmaßstäbe in der Größenordnung von $\geq 1:20$ (für sehr große Gebäude $1:30$) bewährt, wobei die Mindestraumhöhe im Modell 300 mm nicht unterschreiten soll. Bei kleineren Maßstäben sind Abweichungen zwischen Original- und Modellströmung zu erwarten.

Eine Ausnahme bildet die Strömungssituation bei der Gebäudeaerodynamik, da durch Ablöseffekte an scharfkantigen Gebäudemodellen die Gesamtströmung im Windkanal als ausgebildet turbulent betrachtet werden kann. Um z. B. Druckbeiwerte an Nachström- bzw. RA-Flächen zu ermitteln, müssen Modelluntersuchungen in einem Grenzschichtwindkanal durchgeführt werden. Typische Modellmaßstäbe sind $1:50$ bis $1:200$ für sehr große Gebäude.

11.4 Modellgestaltung

Modelle sind so auszubilden, dass alle die Strömung beeinflussenden Details maßstabsgetreu abgebildet werden. Dies betrifft insbesondere auch die Geometrie des zu simulierenden Brands.

Es wird empfohlen, ein Versuchsmodell so aufzubauen, dass eine ungehinderte Einsicht auf alle relevanten Raumbereiche möglich ist.

11.5 Umrechnungen physikalischer Größen

Die Umrechnung der einzelnen physikalischen Größen erfolgt auf der Basis der Ähnlichkeitsfaktoren. Wie in Abschnitt 11.2 bereits dargestellt, ist die maßgebliche Kennzahl für anisotherme Raumströmungen die Archimedes-Zahl Ar . Die wesentliche Bedingung zur Durchführung von Modellversuchen derartiger Strömungsformen lautet demnach

$$Ar_O = Ar_M \quad (40)$$

das heißt, die Archimedes-Zahlen im Original (Index O in Gleichung (40)) müssen den Archimedeszahlen im Modell (Index M in Gleichung (40)) entsprechen.

Anmerkung: An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass es nicht eine einzige Archimedes-Zahl für die zu betrachtende Strömung gibt. Vielmehr ist diese Kennzahl eine skalare Feldgröße, ähnlich der Temperatur oder dem Druck innerhalb des Strömungsfelds.

Mit Gleichung (37) kann für Gleichung (40) geschrieben werden:

$$\frac{\xi_{B,O} L_{B,O} \Delta \vartheta_{B,O}}{T_{B,O} U_{B,O}^2} = \frac{\xi_{B,M} L_{B,M} \Delta \vartheta_{B,M}}{T_{B,M} U_{B,M}^2} \quad (41)$$

els. It is on this condition only that the simplification of the Reynolds number remaining without effect will hold. In order to fulfil this condition, the models for investigating indoor flows shall be chosen as large as possible. Proven empirical values are model scales of about $\geq 1:20$ (or $1:30$ for very large buildings), with the minimum height of rooms in the model being no less than 300 mm. For smaller scales, deviations between the original and model flows are to be expected.

The flow situation in building aerodynamics is an exception here, as the overall flow in the wind tunnel can be regarded as developed turbulent flow due to breakaway effects at sharp-edged building models. To determine, e. g., pressure coefficients at smoke-removal or make-up air opening surfaces, simulation tests must be performed in a boundary-layer wind tunnel. Typical model scales range from $1:50$ to $1:200$ for very large buildings.

11.4 Model design

Models shall be designed in such a manner that all details influencing the flow are mapped true-to-scale. This also holds, in particular, for the geometry of the fire to be simulated.

It is recommended to set up a test model in such a manner as to allow an unimpeded view into all relevant room areas.

11.5 Conversion of physical quantities

The conversion of the individual physical quantities is performed on the basis of the similarity factors. As already explained in Section 11.2, the Archimedes number, Ar , is the characteristic relevant to anisothermal room flows. The basic condition for performing simulation tests of such types of flow is, thus,

$$Ar_O = Ar_M \quad (40)$$

i. e., the Archimedes numbers in the original (subscript O in Equation (40)) must correspond to the Archimedes numbers in the model (subscript M in Equation (40)).

Note: Here it must be pointed that the Archimedes number for the flow considered is not a single number but rather a scalar field quantity, similar to the temperature or the pressure within the flow field.

Using Equation (37), Equation (40) can be re-written as:

$$\frac{\xi_{B,O} L_{B,O} \Delta \vartheta_{B,O}}{T_{B,O} U_{B,O}^2} = \frac{\xi_{B,M} L_{B,M} \Delta \vartheta_{B,M}}{T_{B,M} U_{B,M}^2} \quad (41)$$

und hieraus

$$\frac{\frac{g_{B,M}}{g_{B,O}} \frac{L_{B,M}}{L_{B,O}} \frac{\Delta \vartheta_{B,M}}{\Delta \vartheta_{B,O}}}{\frac{T_{B,M}}{T_{B,O}} \left(\frac{U_{B,M}}{U_{B,O}} \right)^2} = 1 \quad (42)$$

Die einzelnen Quotienten der linken Seite von Gleichung (42) stellen dabei die Maßstabsfaktoren der jeweiligen physikalischen Größen dar, also:

Längenmaßstab (geometrischer Maßstab):

$$f_L = \frac{L_{B,M}}{L_{B,O}} \quad (43)$$

Maßstab für die Erdbeschleunigung:

$$f_g = \frac{g_{B,M}}{g_{B,O}} \quad (44)$$

Maßstab für Temperaturdifferenzen:

$$f_{\Delta \vartheta} = \frac{\Delta \vartheta_{B,M}}{\Delta \vartheta_{B,O}} \quad (45)$$

Maßstab für die Bezugstemperatur:

$$f_T = \frac{T_{B,M}}{T_{B,O}} \quad (46)$$

Maßstab für die Strömungsgeschwindigkeit:

$$f_U = \frac{U_{B,M}}{U_{B,O}} \quad (47)$$

Mit diesen Abkürzungen lautet Gleichung (42)

$$\frac{f_g f_L f_{\Delta \vartheta}}{f_T f_U^2} = 1 \quad (48)$$

Zwei der genannten Maßstabsfaktoren liegen in der Regel naturgemäß fest, nämlich $f_g = 1$ (die Erdbeschleunigungen im Original und im Modell sind gleich groß) und $f_T = 1$ (als Bezugstemperatur wählt man üblicherweise die Umgebungstemperatur, in Kelvin, die gewöhnlich im Original und im Modell denselben Wert annimmt, z.B. 20 °C bzw. 293 K). f_L entspricht dem Modellmaßstab. Von den beiden übrigen Maßstäben $f_{\Delta \vartheta}$ und f_U ist nun einer frei wählbar. In der Regel wird dabei eine Vorgabe für den Temperaturdifferenzmaßstab gemacht, um eine für das Modell zerstörungsfreie Untersuchung durchführen zu können. Mit diesen Randbedingungen lässt sich aus Gleichung (42) der für die Modellversuche einzuhaltende Geschwindigkeitsmaßstab durch

$$f_U = \sqrt{\frac{f_g f_L f_{\Delta \vartheta}}{f_T}} \quad (49)$$

and, hence,

$$\frac{\frac{g_{B,M}}{g_{B,O}} \frac{L_{B,M}}{L_{B,O}} \frac{\Delta \vartheta_{B,M}}{\Delta \vartheta_{B,O}}}{\frac{T_{B,M}}{T_{B,O}} \left(\frac{U_{B,M}}{U_{B,O}} \right)^2} = 1 \quad (42)$$

The individual quotients on the left-hand side of Equation (42) are the scale factors of the respective physical quantities, thus:

Length scale (geometrical scale):

$$f_L = \frac{L_{B,M}}{L_{B,O}} \quad (43)$$

Scale for gravitational acceleration:

$$f_g = \frac{g_{B,M}}{g_{B,O}} \quad (44)$$

Scale for temperature differences:

$$f_{\Delta \vartheta} = \frac{\Delta \vartheta_{B,M}}{\Delta \vartheta_{B,O}} \quad (45)$$

Scale for the reference temperature:

$$f_T = \frac{T_{B,M}}{T_{B,O}} \quad (46)$$

Scale for the flow velocity:

$$f_U = \frac{U_{B,M}}{U_{B,O}} \quad (47)$$

Entering these abbreviations, Equation (42) reads

$$\frac{f_g f_L f_{\Delta \vartheta}}{f_T f_U^2} = 1 \quad (48)$$

As a rule, two of the above scale factors are naturally fixed, namely $f_g = 1$ (the gravitational accelerations are the same in the original and in the model) and $f_T = 1$ (the reference temperature commonly chosen is the ambient temperature, in Kelvin, which usually assumes the same value both in the original and the model, e.g. 20 °C or 293 K). f_L corresponds to the scale of the model. Of the two remaining scales, $f_{\Delta \vartheta}$ and f_U , one can be chosen arbitrarily. As a rule, the scale for temperature difference is specified to allow testing without destroying the model. Applying these boundary conditions to Equation (42), the velocity scale to be observed for the simulation tests can be determined as

$$f_U = \sqrt{\frac{f_g f_L f_{\Delta \vartheta}}{f_T}} \quad (49)$$

ermitteln, der sich mit $f_T = 1$ und $f_g = 1$ vereinfacht zu $f_U = \sqrt{f_L f_{\Delta g}}$.

Aus den vorliegenden Maßstabsfaktoren lassen sich nun abgeleitete strömungsmechanische Größen ermitteln, z. B.

Maßstab für Volumenströme:

$$f_{\dot{V}} = \frac{\dot{V}_M}{\dot{V}_O} = \frac{A_M U_M}{A_O U_O} = f_L^2 f_U \quad (50)$$

Maßstab für Wärmeströme:

$$f_{\dot{Q}} = \frac{\dot{Q}_M}{\dot{Q}_O} = \frac{\dot{V}_M \rho_{\infty, M} c_{p, M} \Delta \vartheta_M}{\dot{V}_O \rho_{\infty, O} c_{p, O} \Delta \vartheta_O} = f_{\dot{V}} f_{\Delta g} \quad (51)$$

Anmerkung: Für die Ermittlung des Wärmestrommaßstabs werden die Dichten bei der Bezugstemperatur $T_{B,O}$ bzw. $T_{B,M}$ zugrunde gelegt, wobei für $f_T = 1$ auch $f_{\rho_{\infty}} = 1$ folgt.

Üblicherweise werden bei Modellversuchen Brandverlaufskurven z. B. gemäß der Richtlinie VDI 6019 Blatt 1 berücksichtigt. Daraus folgt, dass die zu betrachtende Strömung instationären Charakter besitzt. Der hierbei zu berücksichtigende Zeitmaßstab f_t ergibt sich aus der Bedingung gleicher Strouhal-Zahlen im Original und im Modell:

$$Sr_O = Sr_M \quad (52)$$

Mit Gleichung (38) folgt hieraus

$$f_t = \frac{f_L}{f_U} \quad (53)$$

Mit den sich aus den Ähnlichkeitskennzahlen ergebenden Maßstabsfaktoren können die aus den Modellversuchen durch Messung gewonnenen Größen auf das Original umgerechnet werden. So folgt z. B. für den Absaugvolumenstrom eines mechanisch entrauchten Raums $\dot{V}_O = \dot{V}_M / f_{\dot{V}}$, wenn \dot{V}_M der im Modellversuch gemessene Entrauchungsvolumenstrom ist.

11.6 Dokumentation der Ergebnisse

In der Dokumentation der Ergebnisse sind die den Versuchsdurchführungen zugrunde liegenden Maßstabsfaktoren anzugeben. Darüber hinaus sind die Versuchsrandbedingungen – insbesondere in Bezug auf die Modellierung des Brandherds – darzustellen.

Zur Dokumentation der durchgeführten Versuche sind zunächst Videoaufzeichnungen oder Fotos anzufertigen, aus denen der zeitliche Verlauf der Rauchausbreitung deutlich wird. Die Bestimmung der Rauchsichtgrenze erfolgt durch eine Vermessung der raucharmen Schichthöhe.

Der Nachweis in Bezug auf die zulässige Raumtemperatur in der raucharmen Schicht gemäß Ab-

Entering $f_T = 1$ and $f_g = 1$, this is simplified to give $f_U = \sqrt{f_L f_{\Delta g}}$.

From the available scale factors, derived fluid-mechanical quantities can now be determined, such as

Scale for volume flows:

$$f_{\dot{V}} = \frac{\dot{V}_M}{\dot{V}_O} = \frac{A_M U_M}{A_O U_O} = f_L^2 f_U \quad (50)$$

Scale for heat flows:

$$f_{\dot{Q}} = \frac{\dot{Q}_M}{\dot{Q}_O} = \frac{\dot{V}_M \rho_{\infty, M} c_{p, M} \Delta \vartheta_M}{\dot{V}_O \rho_{\infty, O} c_{p, O} \Delta \vartheta_O} = f_{\dot{V}} f_{\Delta g} \quad (51)$$

Note: The heat-flow scale is determined on the basis of the densities at the reference temperature, $T_{B,O}$ and $T_{B,M}$. For $f_T = 1$, this also means $f_{\rho_{\infty}} = 1$.

Simulation tests usually take into account fire curves, e. g. those in accordance with the guideline VDI 6019 Part 1. Consequently, the flow to be studied is transient. The time scale, f_t , to be considered here ensues from the requirement of identical Strouhal numbers in the original and in the model:

$$Sr_O = Sr_M \quad (52)$$

From Equation (38), it follows, then, that

$$f_t = \frac{f_L}{f_U} \quad (53)$$

Using the scale factors resulting from the similarity characteristics, the quantities measured in the simulation tests can be converted to the original. Thus, e. g., the extraction volume flow of a room from which smoke was removed mechanically, is $\dot{V}_O = \dot{V}_M / f_{\dot{V}}$, if \dot{V}_M is the smoke-removal volume flow measured in the simulation test.

11.6 Documentation of results

The scale factors on the basis of which the tests were performed shall be stated in the documentation of the results. Additionally, the boundary conditions of the tests, particularly with regard to the modelling of the fire source, shall be described.

For documenting the tests performed, video recordings or photos shall first be taken in order to illustrate the development of smoke spread over time. The smoke-layer boundary is determined by measuring the height of the smokeless layer.

Verification of the permissible room temperature in the smokeless layer as per Section 7.2 can be per-

schnitt 7.2 kann messtechnisch oder analytisch nach Abschnitt 8.9 geführt werden.

formed by measurement or analytically as described in Section 8.9.

Anhang A Ergänzende Hinweise für Zuluftöffnungen

Annex A Supplementary information concerning inlet-air openings

Die über die Zuluftöffnungen in den Raum eintretende Nachströmluft bildet Luftstrahlen aus, die das Strömungsverhalten beeinflussen. Unerwünschte Effekte sind z. B.

The make-up air flowing into the room through the inlet-air openings forms air jets that influence the flow behaviour. Undesirable effects include, e.g.,

- Ausspülungen aus dem Plume in der raucharmen Schicht
- Umlenkungen des Zuluftstrahls nach oben, verbunden mit einer Einströmung in die Rauchschiicht
- Rückströmungen aus der Rauchschiicht in die raucharne Schicht durch Strahlinduktion

- washout from the plume in the smokeless layer
- upward diversion of the inlet-air jet, combined with an inflow into the smoke layer
- backflow from the smoke layer into the smokeless layer due to jet induction

Ursache für die genannten Effekte sind in der Regel hohe Strömungsgeschwindigkeiten.

High flow velocities are the common cause for the above effects.

Als Ausspülung wird der Anteil des in den Raum freigesetzten Massenstroms an Verbrennungsprodukten bezeichnet, der durch Querströmungen in die raucharne Schicht eingetragen wird (Bild A1). Dieser Anteil kann definiert werden durch den Ausspülgrad

The washout designates that fraction of the mass flow of combustion products released into the room, which is entrained into the smokeless layer due to cross-flows (Figure A1). This fraction can be defined as the washout rate

$$a_s = \frac{\dot{m}_{ASP}}{\dot{m}_{VP}} \tag{A1}$$

$$a_s = \frac{\dot{m}_{ASP}}{\dot{m}_{VP}} \tag{A1}$$

Dabei ist

where

- a_s Ausspülgrad
- \dot{m}_{ASP} Ausspülung
- \dot{m}_{VP} Verbrennungsprodukt

- a_s washout rate
- \dot{m}_{ASP} washout
- \dot{m}_{VP} combustion product

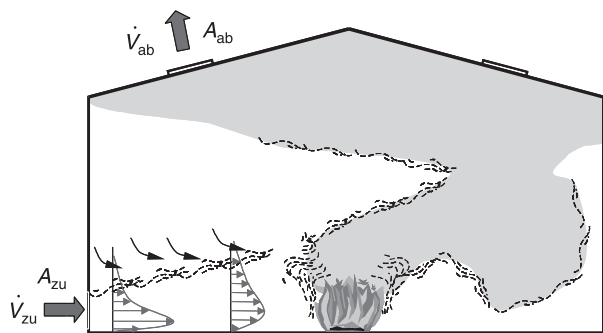


Bild A1. Ausspülungen aus dem Plume

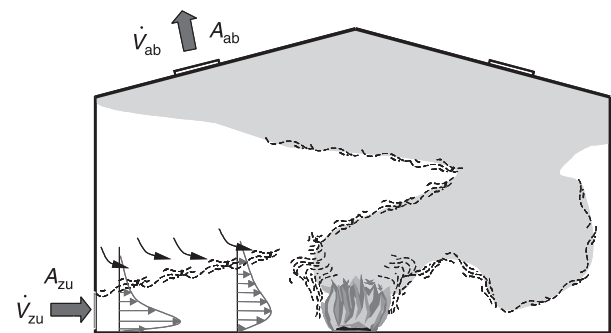


Figure A1. Effects of washout from the plume

Querströmungen im Raum werden durch die Zuluftströmung oder durch den Luftaustausch im Gebäude bei geöffneten Türen u. Ä. verursacht. Man beobachtet bereits bei sehr niedrigen Querströmungsgeschwindigkeiten eine Beeinflussung der Thermik. Bei hohen Querströmungsgeschwindigkeiten kann die Auftriebsströmung (Plume) vollständig zerstört

Cross-flows in the room are caused by the inlet-air flow or by the air exchange within the building through open doors, etc. Even very low cross-flow velocities are observed to have an impact on the thermal. At high cross-flow velocities, the thermal up-draught (plume) can be destroyed completely. Reference values for washout rates can be taken from the

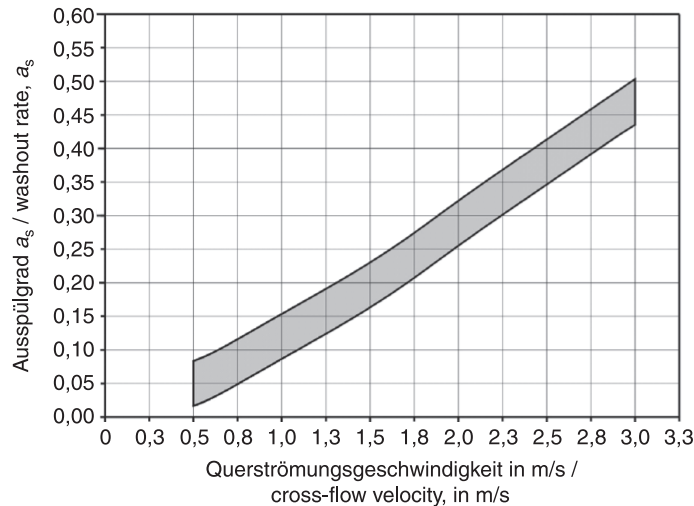


Bild A2. Ausspülgrad in Abhängigkeit der Querströmungsgeschwindigkeit für eine Gesamt-Wärmefreisetzungsrate von 1,0 MW, Brandherdfläche 2,0 m²

Figure A2. Washout rate as a function of cross-flow velocity for a total heat release rate of 1,0 MW, area of seat of fire 2,0 m²

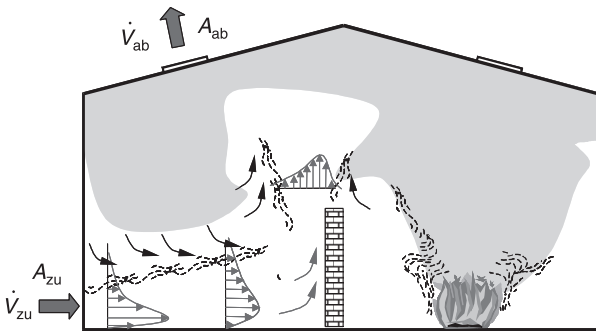


Bild A3. Umlenkung des Zuluftstrahls an einem Hindernis

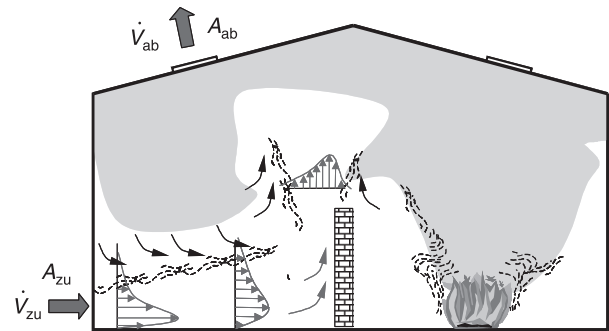


Figure A3. Diversion of an inlet-air jet around an obstacle

werden. Anhaltswerte für Ausspülgrade können beispielhaft Bild A2 entnommen werden.

Trifft ein Zuluftstrahl auf eine Versperrung im Strömungsweg, so erfolgt eine Strahlumlenkung auch in vertikaler Richtung. Im Bereich des Vertikalstrahls kann es zur Stabilitätsminderung der Rauchschicht kommen (siehe Bild A3).

Durch hohe Strömungsgeschwindigkeiten in der Nachströmöffnung und/oder durch einen geringen Abstand der Nachströmöffnung zur Rauchschicht kann durch Strahlinduktion Rauch in den Zuluftstrahl eingemischt und in die raucharme Schicht zurückgeführt werden (Bild A4). Die Rückmischung vergrößert sich mit steigender Einströmgeschwindigkeit.

example given in Figure A2.

When an inlet-air jet encounters an obstacle in the path of flow, the jet will be diverted also in the vertical direction. In the range of the vertical jet, the stability of the smoke layer may be reduced (see Figure A3).

Due to high flow velocities in the make-up air opening and/or a short distance between the make-up air opening and the smoke layer, smoke may become mixed with the inlet-air jet by means of jet induction and may be redirected to the smokeless layer (Figure A4). The re-mixing effect increases with the inflow velocity.

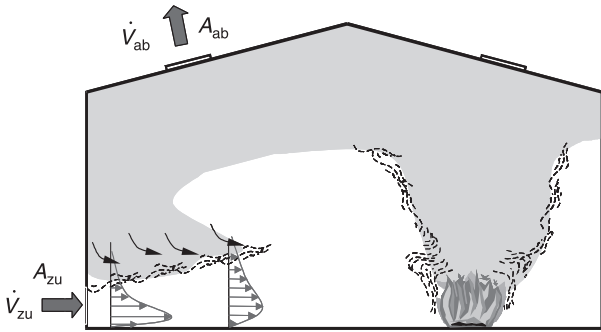


Bild A4. Induktion des Zuluftstrahls aus der Rauchschicht

Um die vorgenannten nachteiligen Strömungseffekte zu minimieren, soll die Strömungsgeschwindigkeit in den Nachströmlflächen $w_{zu} \leq 1,0$ m/s betragen (vgl. Abschnitt 8.8.1). Höhere Strömungsgeschwindigkeiten können unter folgenden Randbedingungen gewählt werden:

- bei ausreichender Entfernung des Brandherds zur Nachströmöffnung
- bei ausreichender Entfernung einer Versperung zur Nachströmöffnung
- bei ausreichendem Abstand zwischen der Oberkante der Nachströmöffnung und der Rauchschichtgrenze
- bei Nachweisführung durch numerische und/oder experimentelle Untersuchungen

Es sollte sichergestellt sein, dass am Brandherd bzw. an einer möglichen Versperung die Geschwindigkeit des Zuluftstrahls $w \leq 1,0$ m/s beträgt. Eine Abschät-

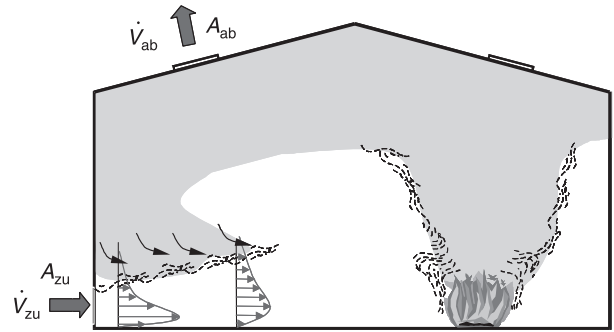


Figure A4. Induction of an inlet-air jet from the smoke layer

In order to minimise the aforementioned adverse effects on the flow, the flow velocities in the make-up air opening surfaces shall, if possible, be $w_{zu} \leq 1,0$ m/s (see Section 8.8.1). Higher flow velocities can be chosen under the following boundary conditions:

- sufficient distance of the seat of fire from the inlet-air opening
- sufficient distance of any obstacle from the inlet-air opening
- sufficient distance between the upper edge of the inlet-air opening and the smoke-layer boundary
- verification by numerical and/or experimental investigations

It should be ensured that, near the seat of fire or near any obstacle, the velocity of the inlet-air jet is $w \leq 1,0$ m/s. The decrease in velocity over the inlet-

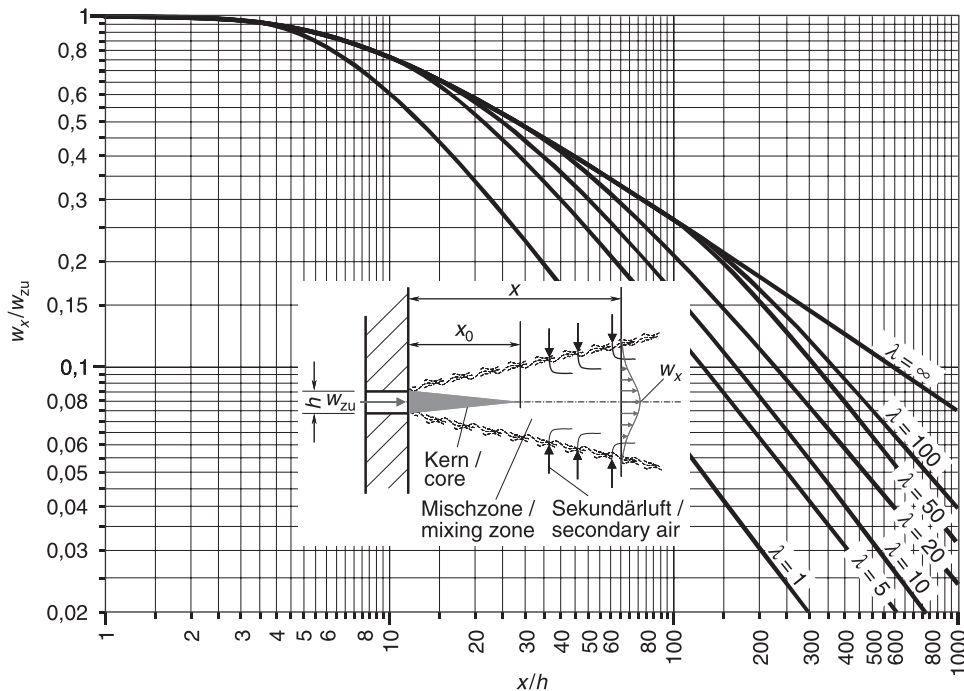


Bild A5. Geschwindigkeitsabnahme bei Rechteckstrahlen (Seitenverhältnis $\lambda = b/h$, Mischzahl $m = 0,2$)

Figure A5. Velocity decrease in rectangular jets (aspect ratio $\lambda = b/h$, mixing ratio $m = 0,2$)

zung des Geschwindigkeitsabbaus im Zuluftstrahl kann unter Anwendung der Strahltheorie (vgl. [7]) vorgenommen werden. Anhaltswerte für die Geschwindigkeitsabnahme von Zuluftstrahlen aus rechteckigen Nachströmöffnungen können Bild A5 entnommen werden.

Die Anfangsgeschwindigkeit bleibt nur in einem kegelförmigen Teil der Strömung, dem Kern, erhalten. Die Länge der Kernzone x_0 ist abhängig vom Turbulenzgrad des Strahls. Bei kleiner Turbulenz ist die Kernzone länger als bei großer Turbulenz. Vom Ende des Kerns an vermindert sich die axiale Luftgeschwindigkeit w_x nach einem kurzen Übergangsbereich gemäß Bild A5 durch Induktion von Umgebungsluft. Hieraus ist erkennbar, dass ein merklicher Geschwindigkeitsabbau erst ab einer Entfernung $x/h \geq 10$ stattfindet. Für ein Fenster oder eine Tür mit einer Höhe von $h = 2$ m bedeutet dies, dass die Geschwindigkeit nach einem Strahlweg von $x = 20$ m noch 70 % der Geschwindigkeit in der Öffnungsfläche beträgt.

air jet can be estimated applying the jet theory (see [7]). Reference values for the velocity decrease in inlet-air jets exiting rectangular make-up air openings can be taken from Figure A5.

The initial velocity is maintained but within a conical Part of the flow, the flow core. The length of the core region, x_0 , depends on the degree of turbulence of the jet. The core region is longer for low turbulence than it is for high turbulence. From the end of the core onwards, after a short transition, the axial air velocity, w_x , is reduced, as shown in Figure A5, due to induction of surrounding air. A noticeable decrease in velocity does not occur until a distance $x/h \geq 10$. For a window or door having a height of $h = 2$ m, this means that, after a jet travel of $x = 20$ m, the velocity still amounts to 70 % of the velocity in the opening surface.

Anhang B Datenblatt – Dimensionierung von Entrauchungssystemen mit Zonenmodellen

Allgemeine Angaben:
Bezeichnung des Objekts:
Bauort:
Bauherr (BH):
Entwurfsverfasser (EV):
Nachweisführender (NF):
Brandschutzdienststelle (BDS):
Bauaufsichtsbehörde (BOA):
Abstimmungsprotokolle:
Beschreibung des Schutzziels (Personenschutz, Brandbekämpfung, Sachschutz, Nachbarschutz etc.):
Angaben zum Zonenmodell:
Bezeichnung des Modells/Version:
Modelltyp:
Softwarehersteller:
Relevante physikalische Modellansätze:
Plume-Modell:
Berechnungsmodell Flammenhöhe:
Berechnungsmodell Geschwindigkeit/Temperatur am Staupunkt (Sprinklerauslösung):
Berechnungsmodell Wärmetransport durch Bauteile:
Kriterien Anwendung Einzonenmodell:
Kriterien flash over Berechnung
Kriterien Berechnung Wärmefreisetzungsrate bei Unterventilation:
Modell Sichtweitenberechnung:
Die Beschreibung der übrigen relevanten physikalischen Modellansätze erfolgt gesondert.
Modellierung der Raumgeometrie:
Anzahl der in Verbindung stehenden Räume:
Höhe der einzelnen Räume in m:
Grundfläche der einzelnen Räume in m ² :
Höhe und Lage der Öffnungen zwischen den Räumen in m:
Fläche der Öffnungen zwischen den Räumen in m ² :
Art der Umfassungsbauteile:
Wände (Baustoffe, Dicke in m):
Decke/Dach (Baustoffe, Dicke in m):
Anzahl, Lage und Größe aller Öffnungen in Außenflächen (außer Rauchabzüge):
Brandverlaufskurven:
<input type="checkbox"/> Nach VDI 6019 Blatt 1 <input type="checkbox"/> Abbrand-/Verbrennungsmodell: <input type="checkbox"/> Sonstiges:

Annex B Data sheet – Dimensioning of smoke-exhaust ventilation systems using zone models

General data:
Designation of object:
Building site:
Building owner (BH):
Designer (EV):
Person verifying (NF):
Fire protection inspectorate (BDS):
Building supervisory board (BOA):
Coordination records:
Description of protection goal (protection of persons, firefighting, protection of property, neighbourhood protection, etc.):
Data regarding the zone model:
Designation of model/release:
Model type:
Software manufacturer:
Relevant physical model approaches:
Plume model:
Calculation model flame height:
Calculation model velocity/temperature near impingement point (sprinkler activation):
Calculation model heat transport through building elements:
Criteria for application of one-zone model:
Criteria for flash-over calculation
Criteria for calculation of heat release rate in case of underventilation:
Model sight-distance calculation:
Further relevant physical model approaches are described on separate sheets.
Modelling of room geometry:
Number of interconnected rooms:
Height of individual rooms, in m:
Floor space of individual rooms, in m ² :
Height and position of openings between rooms, in m:
Surface area of openings between rooms, in m ² :
Type of enclosing building elements:
Walls (building materials; thickness, in m):
Ceiling/roof (building materials; thickness, in m):
Number, position and size of all openings in outer surfaces (except for smoke exhausts):
Fire curves:
<input type="checkbox"/> As per VDI 6019 Part 1 <input type="checkbox"/> Combustion model: <input type="checkbox"/> Other:

Kennwerte des Bemessungsbrands/der Bemessungsbrände:	
Brandintensitätskoeffizient:	
Max. spezifische Wärmefreisetzungsrate in kW/m ² :	
Brandausbreitungsgeschwindigkeit in m/s:	
Anteil der Strahlungsleistung in %:	
Max. Wärmefreisetzungsrate in kW:	
Max. Brandfläche in m ² :	
Rauchkennwerte:	
Kennwerte des Abbrandmodells:	
Sonstiges:	
Die Darstellung der Brandverlaufskurven erfolgt gesondert.	
Brandschutztechnische Infrastruktur:	
Sprinkleranlagen:	
RTI in $\sqrt{m \times s}$:	Abstand zwischen Plumeachse und Sprinklerkopf in m: Abstand zwischen Brandherd und Decke in m: Auslösezeitpunkt in s:
Nennauslösetemperatur in °C:	
Spezifische Wasserbeaufschlagung in mm/s:	
Brandmeldeanlagen:	
Brandkenngröße:	
Zeitpunkt Detektion in s:	
Sonstiges:	
Rauchabzugsanlagen:	
NRA:	MRA:
Aerodynamische Öffnungsfläche in m ² :	Gesamtvolumenstrom an den Absaugstellen in m ³ /s:
Wirksame Zuluftfläche in m ² :	wirksame Zuluftfläche in m ² :
Mittlere Zuluftgeschwindigkeit in m/s:	mittlere Zuluftgeschwindigkeit in m/s:
Auslösezeitpunkt Abluft in s:	Auslösezeitpunkt Abluft in s:
Auslösezeitpunkt Zuluft in s:	Auslösezeitpunkt Zuluft in s:
Art der Auslösung:	Art der Auslösung:
Klassifizierung der NRWG:	Klassifizierung der Brandgasventilatoren:
Sonstiges	Sonstiges:
Die Lage der Zuluftflächen sowie der Abluftflächen bzw. der Absaugstellen wird gesondert dargestellt.	
Bei Mischsystemen sind die relevanten Kenndaten der Rauchabzugsanlage sinngemäß zu bestimmen und gesondert aufzuführen.	
Innere Randbedingungen:	
<input type="checkbox"/> Raumgeometrie wird mit ausreichender Ähnlichkeit abgebildet <input type="checkbox"/> Plume kann ungehindert in Rauchschiicht eindringen <input type="checkbox"/> Nach Brandentstehungsphase liegt mittlere Rauchgastemperatur 1 K über Umgebungstemperatur. <input type="checkbox"/> Impulsarme bodennahe Zuluftführung liegt vor ($w_{zu} \leq 1,0$ m/s). <input type="checkbox"/> Zuluftstrahlen interagieren nicht mit Rauchschiicht. <input type="checkbox"/> Kaltluftabfälle sind nicht zu erwarten. <input type="checkbox"/> Keine negativen Auswirkungen durch Lüftungsanlagen zu erwarten <input type="checkbox"/> Keine negativen Windeinwirkungen zu erwarten <input type="checkbox"/> Max. Rauchabschnittsfläche ≤ 1600 m ²	

Characteristics of design fire(s):	
Fire intensity coefficient:	
Max. specific heat release rate, in kW/m ² :	
Fire propagation speed, in m/s:	
Fraction of radiation output, in %:	
Max. heat release rate, in kW:	
Max. area on fire, in m ² :	
Smoke characteristics:	
Characteristics of combustion model:	
Other:	
The fire curves are given on separate sheets.	
Fire-protection infrastructure:	
Sprinkler systems:	
RTI in $\sqrt{m \times s}$:	distance between plume centreline and sprinkler head, in m: distance between seat of fire and ceiling, in m: activation time, in s:
Nominal activation temperature, in °C:	
Specific water application, in mm/s:	
Fire detection and alarm systems:	
Fire characteristic:	
Detection time, in s:	
Other:	
Smoke-exhaust ventilation systems:	
Natural smoke-exhaust ventilation systems:	Mechanical smoke-exhaust ventilation systems:
Aerodynamic free area, in m ² :	total volume flow at the exhausts, in m ³ /s:
Effective inlet-air opening surface area, in m ² :	effective inlet-air opening surface area, in m ² :
Mean inlet-air velocity, in m/s:	mean inlet-air velocity, in m/s:
Activation time, extract air, in s:	activation time, extract air, in s:
Activation time, inlet air, in s:	activation time, inlet air, in s:
Type of activation:	type of activation:
Classification of natural smoke- and heat-exhaust ventilators:	classification of ventilator:
Other:	other:
The position of inlet air and extract-air outlets or exhausts is shown on separate sheets.	
For mixed systems, the relevant characteristics of the smoke-exhaust ventilation system shall be determined analogously, and listed separately.	
Interior boundary conditions:	
<input type="checkbox"/> Room geometry is mapped to sufficient similarity. <input type="checkbox"/> Plume can enter smoke layer unimpeded. <input type="checkbox"/> After initial stage of fire, mean smoke-gas temperature exceeds ambient temperature by 1 K. <input type="checkbox"/> Inlet air is supplied at low momentum, near the floor ($w_{zu} \leq 1,0$ m/s). <input type="checkbox"/> Inlet-air jets do not interact with smoke layer. <input type="checkbox"/> No downdraughts of cold air to be expected. <input type="checkbox"/> No adverse effects from ventilation systems to be expected. <input type="checkbox"/> No adverse wind effects to be expected. <input type="checkbox"/> Max. smoke-zone surface area ≤ 1600 m ² .	

Whenever one of the above interior boundary conditions is not fulfilled, the verification shall furnish justification in this respect.
Initial temperatures:
Ambient temperature in the room at outbreak of fire, in °C:
Inlet-air temperature, in °C:
Fire-protection interactions:
The relevant fire-protection interactions are described on separate sheets (e.g. in the form of a time bar).
Other:
Simulation results:
The simulation results are evaluated and given on separate sheets.

Anhang C Datenblatt – Dimensionierung von Entrauchungssystemen mit CFD-Rechnungen

Allgemeine Angaben:
Bezeichnung des Objekts:
Bauort:
Bauherr (BH):
Entwurfsverfasser (EV):
Nachweisführender (NF):
Brandschutzdienststelle (BDS):
Bauaufsichtsbehörde (BOA):
Abstimmungsprotokolle:
Beschreibung des Schutzziels (Personenschutz, Brandbekämpfung, Sachschutz, Nachbarschutz etc.):
Angaben zum CFD-Modell:
Bezeichnung des Modells/Version:
Modelltyp:
Softwarehersteller:
Beschreibung der Objektmodellierung
Netzgenerierung:
Art des verwendeten Netzes:
Anzahl der Netzelemente:
Anfangs- und Randbedingungen:
Anfangsbedingung aller im Modell definierten Oberflächen und Volumen: ⇒ Beiblatt
Randbedingung aller im Modell definierten Oberflächen: ⇒ Beiblatt
Simulationsdauer:
Zeitschrittweite:
Definition der Fluideigenschaften
Dichte:
Viskosität:
Wärmeleitfähigkeit:
Wärmekapazität:
Physikalische/chemische Modelle
Turbulenzmodell – Feld:
Turbulenzmodell – Wand:
Verbrennungsmodell:
Strahlungsmodell:

Annex C Data sheet – Dimensioning of smoke-exhaust ventilation systems using CFD calculations

General data:
Designation of object:
Building site:
Building owner (BH):
Designer (EV):
Person verifying (NF):
Fire protection inspectorate (BDS):
Building supervisory board (BOA):
Coordination records:
Description of protection goal (protection of persons, firefighting, protection of property, neighbourhood protection, etc.):
Data regarding the CFD model:
Designation of model/release:
Model type:
Software manufacturer:
Description of object modelling
Grid generation:
Type of grid used:
Number of grid elements:
Initial and boundary conditions:
Initial condition of all surfaces and volumes defined in the model: ⇒ separate sheet
Boundary condition of all surfaces defined in the model: ⇒ separate sheet
Simulation period:
Time increment:
Definition of fluid properties
Density:
Viscosity:
Thermal conductivity:
Heat capacity:
Physical/chemical models
Turbulence model – field:
Turbulence model – wall:
Combustion model:
Radiation model:

Numerisches Verfahren	
Diskretisierung:	
Verwendete Ortsdiskretisierungsmethode <input type="checkbox"/> FDM <input type="checkbox"/> FVM <input type="checkbox"/> FEM <input type="checkbox"/> andere:	
Diskretisierungsansatz: Ordnung des Diskretisierungsansatzes:	
Verwendete Zeitdiskretisierungsmethode Diskretisierungsansatz: Ordnung des Diskretisierungsansatzes:	
Konvergenzkriterien:	
Brandverlaufskurven:	
<input type="checkbox"/> Nach VDI 6019 Blatt 1 <input type="checkbox"/> Abbrand-/Verbrennungsmodell: <input type="checkbox"/> Sonstiges:	
Kennwerte des Bemessungsbrands/der Bemessungsbrände:	
Brandintensitätskoeffizient:	
Max. spezifische Wärmefreisetzungsrate in kW/m ² :	
Brandausbreitungsgeschwindigkeit in m/s:	
Anteil der Strahlungsleistung in %:	
Max. Wärmefreisetzungsrate in kW:	
Max. Brandfläche in m ² :	
Rauchkennwerte:	
Kennwerte des Abbrandmodells:	
Sonstiges:	
Die Darstellung der Brandverlaufskurven erfolgt gesondert.	
Brandschutztechnische Infrastruktur:	
Sprinkleranlagen:	
RTI in $\sqrt{m \times s}$: Nennauslösetemperatur in °C: Spezifische Wasserbeaufschlagung in mm/s:	Abstand zwischen Plumeachse und Sprinklerkopf in m: Abstand zwischen Brandherd und Decke in m: Auslösezeitpunkt in s:
Brandmeldeanlagen:	
Brandkenngröße: Zeitpunkt Detektion in s: Sonstiges:	
Rauchabzugsanlagen:	
NRA:	MRA:
Aerodynamische Öffnungsfläche in m ² :	Gesamtvolumenstrom an den Absaugstellen in m ³ /s:
Wirksame Zuluftfläche in m ² :	wirksame Zuluftfläche in m ² :
Mittlere Zuluftgeschwindigkeit in m/s:	mittlere Zuluftgeschwindigkeit in m/s:
Auslösezeitpunkt Abluft in s:	Auslösezeitpunkt Abluft in s:
Auslösezeitpunkt Zuluft in s:	Auslösezeitpunkt Zuluft in s:

Numerical method	
Discretisation:	
Space discretisation method used <input type="checkbox"/> FDM <input type="checkbox"/> FVM <input type="checkbox"/> FEM <input type="checkbox"/> other: Discretisation approach: Order of discretisation approach:	
Time discretisation method used Discretisation approach: Order of discretisation approach:	
Convergence criteria:	
Fire curves:	
<input type="checkbox"/> As per VDI 6019 Part 1 <input type="checkbox"/> Combustion model: <input type="checkbox"/> Other:	
Characteristics of design fire(s):	
Fire intensity coefficient:	
Max. specific heat release rate, in kW/m ² :	
Fire propagation speed, in m/s:	
Fraction of radiation output, in %:	
Max. heat release rate, in kW:	
Max. area on fire, in m ² :	
Smoke characteristics:	
Characteristics of combustion model:	
Other:	
The fire curves are given on separate sheets.	
Fire-protection infrastructure	
Sprinkler systems:	
RTI in $\sqrt{m \times s}$: Nominal activation temperature, in °C: Specific water application, in mm/s:	distance between plume centreline and sprinkler head, in m: distance between seat of fire and ceiling, in m: activation time, in s:
Fire detection and alarm systems:	
Fire characteristic: Detection time, in s: Other:	
Smoke-exhaust ventilation systems:	
Natural smoke-exhaust ventilation systems:	Mechanical smoke-exhaust ventilation systems:
Aerodynamic free area, in m ² :	total volume flow , in m ³ /s:
Effective inlet-air opening surface area, in m ² :	effective inlet-air opening surface area, in m ² :
Mean inlet-air velocity, in m/s:	mean inlet-air velocity, in m/s:
Activation time, extract air, in s:	activation time, extract air, in s:
Activation time, inlet air, in s:	activation time, inlet air, in s:

Art der Auslösung:	Art der Auslösung:
Klassifizierung der NRWG:	Klassifizierung der Brandgasventilatoren:
Sonstiges	Sonstiges:
Die Lage der Zuluftflächen sowie der Abluftflächen bzw. der Absaugstellen wird gesondert dargestellt.	
Bei Mischsystemen sind die relevanten Kenndaten der Rauchabzugsanlage sinngemäß zu bestimmen und gesondert aufzuführen.	
Brandschutztechnische Interaktionen:	
Die Beschreibung der relevanten brandschutztechnischen Interaktionen erfolgt gesondert (z. B. mit einem Zeitstrahl).	
Sonstiges:	
Simulationsergebnisse:	
Die Auswertung und Darstellung der Simulationsergebnisse erfolgt gesondert.	

Type of activation:	type of activation:
Classification of natural smoke- and heat-exhaust ventilator:	classification of ventilator:
Other:	other:
The position of inlet air and extract-air outlets or exhausts is shown on separate sheets.	
For mixed systems, the relevant characteristics of the smoke-exhaust ventilation system shall be determined analogously, and listed separately.	
Fire-protection interactions:	
The relevant fire-protection interactions are described on separate sheets (e. g. in the form of a time bar).	
Other:	
Simulation results:	
The simulation results are evaluated and given on separate sheets.	

Anhang D Anwendungsbeispiele

Nachfolgend wird an einem Beispiel die Bemessung eines Entrauchungssystems mit den in dieser Richtlinie vorgestellten rechnerischen Verfahren aufgezeigt. Die verwendete Geometrie wurde so gewählt, dass die Anwendungsgrenzen der drei rechnerischen Verfahren eingehalten werden.

Beispiel: Natürliche Entrauchung einer Halle

Die zu betrachtende Halle mit Flachdach besitzt eine quadratische Grundfläche von $A_{\text{Grund}} = 800 \text{ m}^2$. Die Hallenhöhe beträgt 9 m. Die Wand- und Deckenflächen bestehen aus Beton, Dicke $s = 0,3 \text{ m}$.

Für die Halle sind die Zu- und Abströmflächen zu dimensionieren für ein auf dem Hallenboden gelegenes Brandereignis mit einer maximalen Gesamt-Wärme-freisetzungsrate von $\dot{Q} = 6 \text{ MW}$ (Brandherdfläche $A_{\text{Br}} = 12 \text{ m}^2$). Die Höhe der raucharmen Schicht soll 4,5 m betragen. Die vorgesehenen Rauchabzugselemente besitzen einen Durchflussbeiwert von $\bar{c}_{v0,ab} = 0,7$. Für die Zuluftelemente sollen Kippflügel-fenster mit einem Öffnungswinkel von $\alpha = 90^\circ$ vorgesehen werden. Die Umgebungstemperatur beträgt 20°C .

D1 Handkalkulationsverfahren

Schritt 1: Ermittlung des Plumemassenstroms

Wegen $\frac{Y_{\text{eff}}}{\sqrt{A_{\text{Br}}}} = \frac{4,5}{3,46} < 2$ folgt der Plumemassenstrom aus Gleichung (5):

$$\dot{m}_{\text{Pl}} = C_1 \cdot \sqrt{4 \cdot A_{\text{Br}} \cdot \pi} \cdot Y_{\text{eff}}^{1,5}$$

Annex D Case studies

The example below illustrates the dimensioning of a smoke-exhaust ventilation system using the calculation methods presented in this guideline. The geometry used was chosen to comply with the application limits of all three calculation methods.

Example: Natural smoke-exhaust ventilator from a hall

The hall to be considered features a flat roof and a square floor space of $A_{\text{Grund}} = 800 \text{ m}^2$, the hall height being 9 m. The wall and ceiling surfaces are made of concrete, with a thickness $s = 0,3 \text{ m}$.

Problem: Dimension the inlet- and extract-air opening surfaces required for the hall, assuming a fire occurring on the hall floor with a maximum total heat release rate of $\dot{Q} = 6 \text{ MW}$ (area on fire $A_{\text{Br}} = 12 \text{ m}^2$). The target height of the smokeless layer is 4,5 m. The intended smoke-exhaust ventilation elements have a flow coefficient of $\bar{c}_{v0,ab} = 0,7$. The intended inlet-air elements are tilt windows with an opening angle of $\alpha = 90^\circ$. The ambient temperature is 20°C .

D1 Manual calculation method

Step 1: Determination of plume mass flow

Given $\frac{Y_{\text{eff}}}{\sqrt{A_{\text{Br}}}} = \frac{4,5}{3,46} < 2$, the plume mass flow is obtained from Equation (5) as:

$$\dot{m}_{\text{Pl}} = C_1 \cdot \sqrt{4 \cdot A_{\text{Br}} \cdot \pi} \cdot Y_{\text{eff}}^{1,5}$$

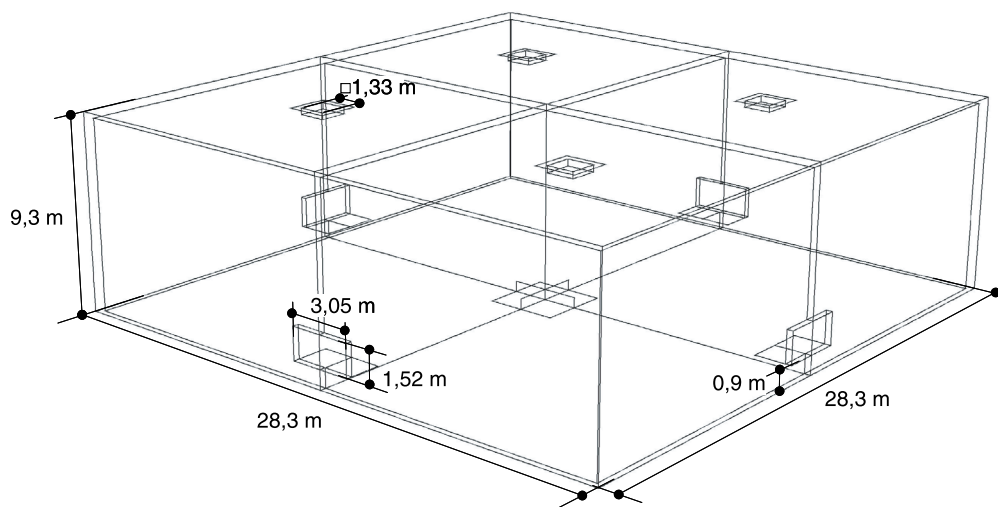


Bild D1. Geometrisches Modell der Halle (Die angegebenen Abmessungen für die NRA und Nachströmflächen werden aus dem Handkalkulationsverfahren ermittelt.)

Figure D1. Geometric model of the hall (The dimensions given for the natural smoke-exhaust ventilation system and for inlet-air opening surfaces were determined using the manual calculation method.)

mit $C_1 = 0,19 \text{ kg}/(\text{m}^{5/2} \text{ s})$

$$\dot{m}_{\text{Pl}} = 0,19 \cdot \sqrt{4 \cdot 12 \text{ m}^2} \cdot \pi(4,5 \text{ m})^{1,5} = 22,27 \text{ kg/s}$$

Schritt 2: Ermittlung der Rauchsichttemperatur mit Gleichung (16)

$$T_{\text{RS}} = \frac{(1 - \delta)\dot{Q}_{\text{konv}}}{\dot{m}_{\text{Pl}} c_{p,\text{Rauch}} + \sum_i U_{i,\text{eff}} A_i} + T_{\text{zu}}$$

mit $\delta = 0,288$ aus Gleichung (15) oder Bild 4 und $\sum_i U_{i,\text{eff}} A_i = 2,5 \sum_i U_i A_i$ (vgl. Gleichung (12)) aus nachstehender Tabelle

Wandnummer <i>i</i> / Wall number <i>i</i>	Bezeichnung / Designation	Fläche A_i / Area, A_i in m^2	U_i in $\text{W}/(\text{m}^2 \text{ K})$	$U_i A_i$ in W/K
1	Decke / ceiling	800,0	3,25	2600,0
2	Nordwand / North wall	127,3	3,25	413,7
3	Ostwand / East wall	127,3	3,25	413,7
4	Südwand / South wall	127,3	3,25	413,7
5	Westwand / West wall	127,3	3,25	413,7
$\sum_i U_i A_i$				4254,8

Die Werte in Spalte 4 wurden berechnet nach Gleichung (13) mit

$$\alpha_{\text{innen},i} = 8 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$$

und

$$\alpha_{\text{außen},i} = 25 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$$

Für $\sum_i U_{i,\text{eff}} A_i$ ergibt sich damit:

$$\sum_i U_{i,\text{eff}} A_i = 2,5 \sum_i U_i A_i = 10,6 \text{ kW/K}$$

Hieraus folgt

$$T_{\text{RS}} = \frac{(1 - 0,288) 4200 \text{ kW}}{22,27 \text{ kg/s} \cdot 101 \text{ kJ}/(\text{kg K}) + 10,6 \text{ kW/K}} + 293,15 \text{ K} = 383,51 \text{ K}$$

Für den konvektiven Anteil der Brandlast wird $\dot{Q}_{\text{konv}} = 0,7 \dot{Q}$ verwendet (vgl. Gleichung (8)).

Schritt 3: Ermittlung des abzuführenden Rauchgasvolumenstroms nach Gleichung (17)

$$\dot{V}_{\text{ab}} = \dot{m}_{\text{Pl}} \frac{T_{\text{RS}}}{T_{\text{zu}} \rho_{\text{zu}}}$$

$$\dot{V}_{\text{ab}} = 22,27 \text{ kg/s} \frac{383,51 \text{ K}}{353,18 \text{ (kg K)}/\text{m}^3} = 24,2 \text{ m}^3/\text{s}$$

where $C_1 = 0,19 \text{ kg}/(\text{m}^{5/2} \text{ s})$

$$\dot{m}_{\text{Pl}} = 0,19 \cdot \sqrt{4 \cdot 12 \text{ m}^2} \cdot \pi(4,5 \text{ m})^{1,5} = 22,27 \text{ kg/s}$$

Step 2: Determination of smoke-layer temperature using Equation (16)

$$T_{\text{RS}} = \frac{(1 - \delta)\dot{Q}_{\text{konv}}}{\dot{m}_{\text{Pl}} c_{p,\text{Rauch}} + \sum_i U_{i,\text{eff}} A_i} + T_{\text{zu}}$$

where $\delta = 0,288$ as per Equation (15) or Figure 4 and $\sum_i U_{i,\text{eff}} A_i = 2,5 \sum_i U_i A_i$ (see Equation (12)) obtained from the table below

The values in column 4 were calculated using Equation (13) where

$$\alpha_{\text{innen},i} = 8 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$$

and

$$\alpha_{\text{außen},i} = 25 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$$

For $\sum_i U_{i,\text{eff}} A_i$, then:

$$\sum_i U_{i,\text{eff}} A_i = 2,5 \sum_i U_i A_i = 10,6 \text{ kW/K}$$

Consequently:

$$T_{\text{RS}} = \frac{(1 - 0,288) 4200 \text{ kW}}{22,27 \text{ kg/s} \cdot 101 \text{ kJ}/(\text{kg K}) + 10,6 \text{ kW/K}} + 293,15 \text{ K} = 383,51 \text{ K}$$

For the convective fraction of the fire load, $\dot{Q}_{\text{konv}} = 0,7 \dot{Q}$ is used (see Equation (8)).

Step 3: Determination of smoke-gas volume flow to be removed using Equation (17)

$$\dot{V}_{\text{ab}} = \dot{m}_{\text{Pl}} \frac{T_{\text{RS}}}{T_{\text{zu}} \rho_{\text{zu}}}$$

$$\dot{V}_{\text{ab}} = 22,27 \text{ kg/s} \frac{383,51 \text{ K}}{353,18 \text{ (kg K)}/\text{m}^3} = 24,2 \text{ m}^3/\text{s}$$

Schritt 4: Ermittlung der Nachström- und Rauchabzugsfläche nach Gleichung (19) und Gleichung (20)

Gewählte max. Zuluftgeschwindigkeit:

$$w_{zu} = 1,0 \text{ m/s}$$

Nachströmfläche

$$A_{zu} = \frac{\dot{m}_{pl}}{\rho_{zu} w_{zu}} = \frac{22,27 \text{ kg/s}}{1,2 \text{ kg/m}^3 \cdot 1,0 \text{ m/s}} = 18,56 \text{ m}^2$$

Rauchabzugsfläche

$$A_w = A_{ab} \cdot \bar{c}_{v0,ab} = \dot{V}_{ab} \cdot \sqrt{\frac{T_{zu}}{2 g (T_{RS} - T_{zu})(h_{eff} - Y_{eff}) - \frac{1}{\bar{c}_{v0,zu}^2} w_{zu}^2 T_{RS}}}$$

Mit $\bar{c}_{v0,zu} = 0,63$ aus Tabelle 4 mit $h/b = 1:2$ folgt

$$A_w = 24,2 \text{ m}^3/\text{s} \sqrt{\frac{293,15 \text{ K}}{19,62 \text{ m/s}^2 (383,51 - 293,15) \text{ K}(9 - 4,5) \text{ m} - \frac{1}{0,63^2} 1,0^2 \text{ m}^2/\text{s}^2 383,51 \text{ K}}}$$

bzw.

$$A_{ab} = \frac{A_w}{c_{v0,ab}} = \frac{4,95 \text{ m}^2}{0,7} = 7,07 \text{ m}^2$$

Schritt 5: Ermittlung der mittleren Temperatur in der raucharmen Schicht nach Abschnitt 8.9:

$T_{RS} = 110 \text{ °C} < 150 \text{ °C} \rightarrow$ Bedingung bezüglich Temperatur in raucharmer Schicht ist erfüllt!

Schritt 6: Berechnungsnachweis für niedrig-energetische Brände gemäß Abschnitt 6

Zulässige Sichtweite S_{zul}

Die maximale Fluchtweglänge wird angenommen als Abstand zwischen Raummittelpunkt und einer Raumecke, das heißt:

$$S_{zul} = \sqrt{2 \cdot \left(\frac{\sqrt{800 \text{ m}^2}}{2}\right)^2} = 20 \text{ m}$$

Vorhandene Sichtweite S_{vorh}

$$S_{vorh} = \frac{E}{K}$$

Step 4: Determination of the surface areas of inlet-air and smoke-exhaust openings using Equation (19) and Equation (20)

Max. inlet-air velocity chosen:

$$w_{zu} = 1,0 \text{ m/s}$$

Inlet-air opening surface area

$$A_{zu} = \frac{\dot{m}_{pl}}{\rho_{zu} w_{zu}} = \frac{22,27 \text{ kg/s}}{1,2 \text{ kg/m}^3 \cdot 1,0 \text{ m/s}} = 18,56 \text{ m}^2$$

Smoke-exhaust ventilator opening surface area

Entering $\bar{c}_{v0,zu} = 0,63$ as per Table 4 for $h/b = 1:2$, then

or

Step 5: Determination of mean temperature in the smokeless layer as per Section 8.9:

$T_{RS} = 110 \text{ °C} < 150 \text{ °C} \rightarrow$ Condition regarding temperature in the smokeless layer is fulfilled!

Step 6: Verification calculation for low-energy fires as per Section 6

Permissible sight distance, S_{zul}

The distance between room centre and one room corner is assumed to be the maximum length of escape route, i.e.:

$$S_{zul} = \sqrt{2 \cdot \left(\frac{\sqrt{800 \text{ m}^2}}{2}\right)^2} = 20 \text{ m}$$

Actual sight distance, S_{vorh}

$$S_{vorh} = \frac{E}{K}$$

mit $E = 5$ (hinterleuchtete Sicherheitszeichen am Ausgang der Halle)

$$K = \sigma_s \frac{m_{\text{Rauch}}}{V_{\text{Raum}}} \quad (\text{gemäß Gleichung (2)})$$

Es wird eine hohe Rauchpartikelfreisetzung angenommen mit $H_{\text{eff}} = 10 \text{ kJ/g}$, $y_{\text{Rauch}} = 0,1 \text{ g/g}$ und $\sigma_s = 10 \text{ m}^2/\text{g}$ gemäß Tabelle 1. Für die Entfluchtungszeit wird $\tau_E = 300 \text{ s}$ abgeschätzt. Damit folgt aus Gleichung (3) für die im Raum freigesetzte Rauchpartikelmasse

$$\begin{aligned} m_{\text{Rauch}} &= \frac{1}{600} \cdot \dot{Q}_{\text{max}} \cdot \frac{y_{\text{Rauch}}}{H_{\text{eff}}} \cdot \tau_E^2 \\ m_{\text{Rauch}} &= \frac{1}{600} \cdot \dot{Q}_{\text{max}} \cdot \frac{y_{\text{Rauch}}}{H_{\text{eff}}} \cdot \tau_E^2 \\ &= \frac{1}{600} \cdot 100 \text{ kW} \cdot \frac{0,1 \text{ g/g}}{10 \text{ kJ/g}} \cdot 300^2 \text{ s}^2 \\ &= 150 \text{ g} \end{aligned}$$

$$A_w = 4,95 \text{ m}^2$$

Mit dem Raumvolumen der Halle

$$V_{\text{Raum}} = (800 \cdot 9) \text{ m}^3 = 7200 \text{ m}^3$$

folgt

$$\begin{aligned} K &= 10 \text{ m}^2/\text{g} \frac{150 \text{ g}}{7200 \text{ m}^3} = 0,208 \text{ m}^{-1} \leq 0,25 \text{ m}^{-1} \\ \Rightarrow S_{\text{vorh}} &= \frac{5}{0,208 \text{ m}^{-1}} = 24 \text{ m} \end{aligned}$$

Die Bedingung $S_{\text{vorh}} \geq S_{\text{zul}}$ (Abschnitt 6.1, Gleichung (1)) ist erfüllt.

D2 Zonenmodellrechnung:

Randbedingungen

Geometrie

Hallenabmessungen: 28,3 m × 28,3 m

Hallenhöhe: 9 m

Umfassungsbauteile:
Beton 30 cm (Dach und Wände)

Lufttechnische Randbedingungen:
 $\bar{c}_{v0,zu} = 0,7$; $\bar{c}_{v0,ab} = 0,7$

Brandverlaufskurven

Gesamt-Wärmefreisetzungsrate: maximal 6 MW (fortentwickelte und konstante Brandphase nach VDI 6019 Blatt 1 mit $\alpha = 0,047 \text{ kW/s}^2$)

Konvektiver Anteil: 70 %

Spezifische Wärmefreisetzungsrate: 500 kW/m²

Brandfläche: 12 m²

where $E = 5$ (back-lit safety signs at hall exit)

$$K = \sigma_s \frac{m_{\text{Rauch}}}{V_{\text{Raum}}} \quad (\text{as per Equation (2)})$$

A high release of smoke particles is assumed, where $H_{\text{eff}} = 10 \text{ kJ/g}$, $y_{\text{Rauch}} = 0,1 \text{ g/g}$ and $\sigma_s = 10 \text{ m}^2/\text{g}$ as per Table 1. The evacuation time is estimated to be $\tau_E = 300 \text{ s}$. Therefore, Equation (3) yields the smoke-particle mass released in the room as

$$\begin{aligned} m_{\text{Rauch}} &= \frac{1}{600} \cdot \dot{Q}_{\text{max}} \cdot \frac{y_{\text{Rauch}}}{H_{\text{eff}}} \cdot \tau_E^2 \\ m_{\text{Rauch}} &= \frac{1}{600} \cdot \dot{Q}_{\text{max}} \cdot \frac{y_{\text{Rauch}}}{H_{\text{eff}}} \cdot \tau_E^2 \\ &= \frac{1}{600} \cdot 100 \text{ kW} \cdot \frac{0,1 \text{ g/g}}{10 \text{ kJ/g}} \cdot 300^2 \text{ s}^2 \\ &= 150 \text{ g} \end{aligned}$$

$$A_w = 4,95 \text{ m}^2$$

Given the room volume of the hall

$$V_{\text{Raum}} = (800 \cdot 9) \text{ m}^3 = 7200 \text{ m}^3$$

it follows:

$$\begin{aligned} K &= 10 \text{ m}^2/\text{g} \frac{150 \text{ g}}{7200 \text{ m}^3} = 0,208 \text{ m}^{-1} \leq 0,25 \text{ m}^{-1} \\ \Rightarrow S_{\text{vorh}} &= \frac{5}{0,208 \text{ m}^{-1}} = 24 \text{ m} \end{aligned}$$

The condition $S_{\text{vorh}} \geq S_{\text{zul}}$ (Section 6.1, Equation (1)) is fulfilled.

D2 Zone-model calculation:

Boundary conditions

Geometry

Hall dimensions: 28,3 m × 28,3 m

Hall height: 9 m

Enclosing building elements:
concrete, 30 cm (roof and walls)

Fluid-mechanical boundary conditions:
 $\bar{c}_{v0,zu} = 0,7$; $\bar{c}_{v0,ab} = 0,7$

Fire curves

Total heat release rate: maximum 6 MW (developing and constant fire stage nach VDI 6019 Part 1, where $\alpha = 0,047 \text{ kW/s}^2$)

Convective fraction: 70 %

Specific heat release rate: 500 kW/m²

Area on fire: 12 m²

Schutzziel		Protection goal	
Höhe der raucharmen Schicht:	4,5 m	Height of smokeless layer:	4,5 m
Raumtemperatur in der raucharmen Schicht:	< 70 °C	Room temperature in smokeless layer:	< 70 °C
Ergebnis der Bemessung		Dimensioning result	
Aerodynamisch wirksame Fläche der NRWG:	4,9 m ² ; → A _{geo} = 7,1 m ²	Aerodynamically effective area of natural smoke- and heat-exhaust ventilator:	4,9 m ² ; → A _{geo} = 7,1 m ²
Zuluftflächen (geometrisch):	18,0 m ²	Inlet-air opening surface area (geometrical):	18,0 m ²
Massenstrom:	21,5 kg/s	Mass flow:	21,5 kg/s

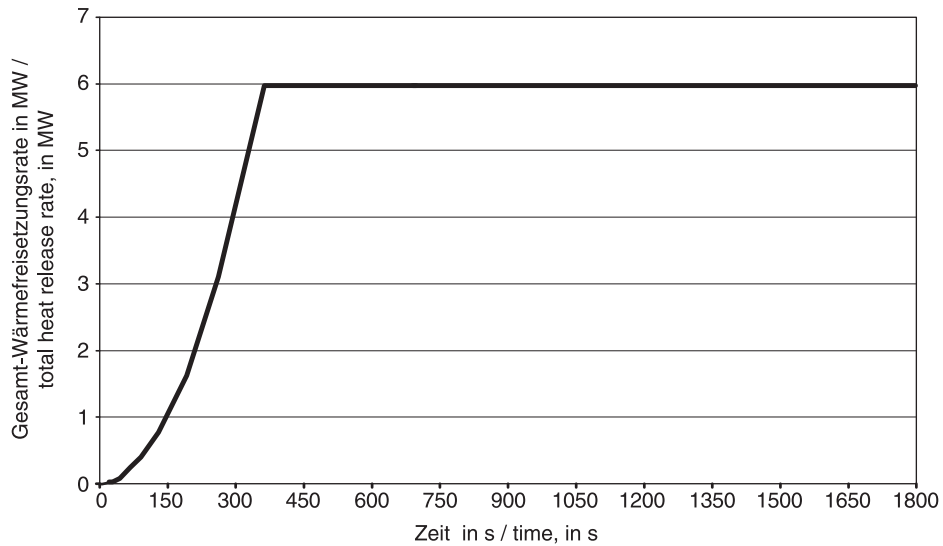


Bild D2. Gesamtwärmefreisetzungsrate

Figure D2. Total heat release rate

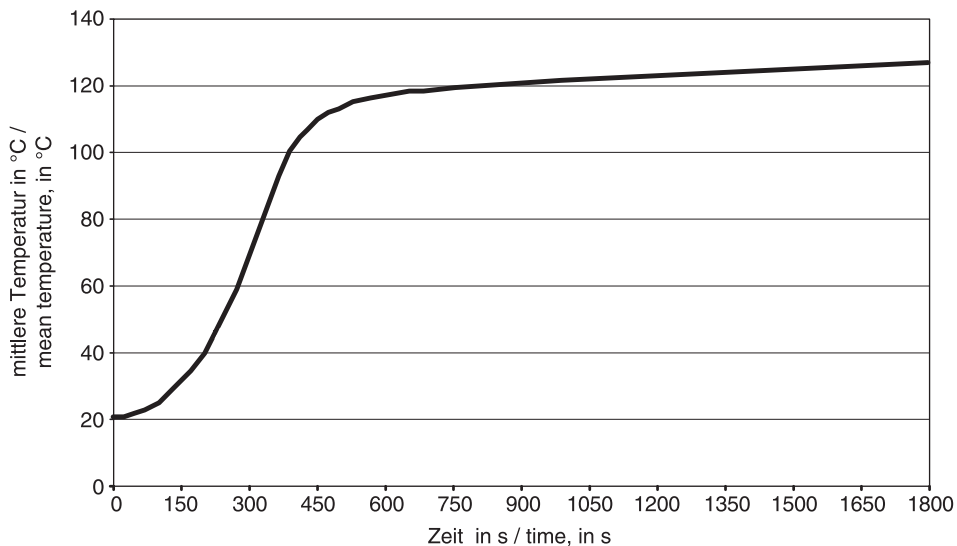


Bild D3. Mittlere Rauchsichttemperatur

Figure D3. Mean smoke-layer temperature

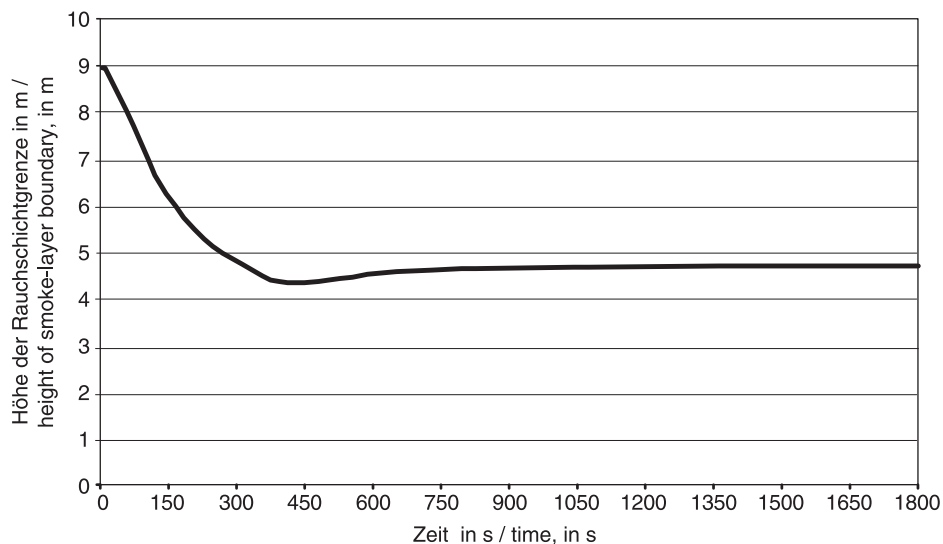


Bild D4. Höhe der raucharmen Schicht

Figure D4. Height of smokeless layer

Zusammenfassende Darstellung der Randbedingungen und Ergebnisse (Datenblatt)

Allgemeine Angaben:
Bezeichnung des Objekts: VDI-Testbeispiel
Bauort: Musterort
Bauherr (BH): Muster-Bauherr
Entwurfsverfasser (EV): Muster-Entwurfsverfasser
Nachweisführender (NF): Muster-Brandschutzplaner
Brandschutzdienststelle (BDS): Muster-Brandschutzdienststelle
Bauaufsichtsbehörde (BOA): Muster-Bauordnungsamt
Abstimmungsprotokolle:
Beschreibung des Schutzziels (Personenschutz, Brandbekämpfung, Sachschutz, Nachbarschutz etc.): Aufrechterhaltung einer raucharmen Schicht von 4,5 m zur Gewährleistung der Brandbekämpfung
Angaben zum Zonenmodell:
Bezeichnung des Modells/Version: Muster-Zonenmodell
Modelltyp: Mehrraum-Mehrzonemodell
Softwarehersteller: Muster-Zonenmodellhersteller
Relevante physikalische Modellansätze:
Plume-Modell: nach Mc Caffrey
Berechnungsmodell Flammenhöhe: nach Heskestad
Berechnungsmodell Geschwindigkeit/Temperatur am Staupunkt (Sprinklerauslösung): nach Alpert
Berechnungsmodell Wärmetransport durch Bauteile: 1-D-Wärmetransportmodell
Kriterien Anwendung Einzonemodell: Temperatur in jet stream > 10 K gegenüber Umgebungstemperatur, mittlere Rauchsichttemperatur > 0,3 K gegenüber Umgebungstemperatur
Kriterien Flash-Over-Berechnung: hier nicht relevant
Kriterien Berechnung Wärmefreisetzungsrate bei Unterventilation: hier nicht relevant
Modell Sichtweitenberechnung:
Die Beschreibung der übrigen relevanten physikalischen Modellansätze erfolgt gesondert.
Modellierung der Raumgeometrie:
Anzahl der in Verbindung stehenden Räume: 1
Höhe der einzelnen Räume in m: 9
Grundfläche der einzelnen Räume in m ² : 800
Höhe und Lage der Öffnungen zwischen den Räumen in m:
Fläche der Öffnungen zwischen den Räumen in m ² :
Art der Umfassungsbauteile:
Wände (Baustoffe, Dicke in m): Beton, d = 30 cm
Decke/Dach (Baustoffe, Dicke in m): Beton, d = 30 cm
Anzahl, Lage und Größe aller Öffnungen in Außenflächen (außer Rauchabzüge): 4 Zuluftöffnungen gleichmäßig verteilt in Außenwänden mit einer Größe von je 4,5 m²
Brandverlaufskurven:
<input checked="" type="checkbox"/> Nach VDI 6019 Blatt 1 <input type="checkbox"/> Abbrand-/Verbrennungsmodell: <input type="checkbox"/> Sonstiges:

Synopsis of boundary conditions and results (data sheet)

General data:
Designation of object: VDI test example
Building site: example site
Building owner (BH): example building owner
Designer (EV): example designer
Person verifying (NF): example fire-protection planner
Fire protection inspectorate (BDS): example fire-protection inspectorate
Building supervisory board (BOA): example building authority
Coordination records:
Description of protection goal (protection of persons, firefighting, protection of property, neighbourhood protection, etc.): Maintain a smokeless layer of 4,5 m in order to ensure firefighting
Data regarding the zone model:
Designation of model/release: example zone model
Model type: multi-room multi-zone model
Software manufacturer: example zone-model manufacturer
Relevant physical model approaches:
Plume model: according to Mc Caffrey
Calculation model flame height: according to Heskestad
Calculation model velocity/temperature near impingement point (sprinkler activation): according to Alpert
Calculation model heat transport through building elements: 1-D heat transport model
Criteria for application of one-zone model: temperature in jet stream > 10 K compared to ambient temperature, mean smoke-layer temperature > 0,3 K compared to ambient temperature
Criteria for flash-over calculation: not applicable
Criteria for calculation of heat release rate in case of underventilation: not applicable
Model sight distance calculation:
Further relevant physical model approaches are described on separate sheets.
Modelling of room geometry
Number of interconnected rooms: 1
Height of individual rooms, in m: 9
Floor space of individual rooms, in m ² : 800
Height and position of openings between rooms, in m:
Surface area of openings between rooms, in m ² :
Type of enclosing building elements:
Walls (building materials, thickness, in m): Concrete, d = 30 cm
Ceiling/roof (building materials, thickness, in m): Concrete, d = 30 cm
Number, position and size of all openings in outer surfaces (except for smoke exhausts): 4 inlet-air openings evenly distributed over outer walls, 4,5 m² each
Fire curves:
<input checked="" type="checkbox"/> As per VDI 6019 Part 1 <input type="checkbox"/> Combustion model: <input type="checkbox"/> Other:

Kennwerte des Bemessungsbrands/der Bemessungsbrände:	
Brandintensitätskoeffizient: 0,047 kW/s²	
Max. spezifische Wärmefreisetzungsrate in kW/m ² : 500	
Brandausbreitungsgeschwindigkeit in m/s: 0,0097	
Anteil der Strahlungsleistung in %: 30	
Max. Wärmefreisetzungsrate in kW: 6000	
Max. Brandfläche in m ² : 12	
Rauchkennwerte: hier nicht relevant	
Kennwerte des Abbrandmodells: hier nicht relevant	
Sonstiges:	
Die Darstellung der Brandverlaufskurven erfolgt gesondert.	
Brandschutztechnische Infrastruktur:	
Sprinkleranlagen:	
RTI in $\sqrt{m \times s}$:	Abstand zwischen Plume-Achse und Sprinklerkopf in m: Abstand zwischen Brandherd und Decke in m: Auslösezeitpunkt in s:
Nennauslösetemperatur in °C:	
Spezifische Wasserbeaufschlagung in mm/s:	
Brandmeldeanlagen:	
Brandkenngröße:	
Zeitpunkt Detektion in s:	
Sonstiges:	
Rauchabzugsanlagen:	
NRA:	MRA:
Aerodynamische Öffnungsfläche in m ² : 4,9	Gesamtvolumenstrom an den Absaugstellen in m ³ /s:
Wirksame Zuluftfläche in m ² : 18,0	wirksame Zuluftfläche in m ² :
Mittlere Zuluftgeschwindigkeit in m/s: 1,0	mittlere Zuluftgeschwindigkeit in m/s:
Auslösezeitpunkt Abluft in s: 120	Auslösezeitpunkt Abluft in s:
Auslösezeitpunkt Zuluft in s: 120	Auslösezeitpunkt Zuluft in s:
Art der Auslösung:	Art der Auslösung:
Klassifizierung der NRWG: nach DIN 18232-2	Klassifizierung der Brandgasventilatoren:
Sonstiges	Sonstiges:
Die Lage der Zuluftflächen sowie der Abluftflächen bzw. der Absaugstellen wird gesondert dargestellt.	
Bei Mischsystemen sind die relevanten Kenndaten der Rauchabzugsanlage sinngemäß zu bestimmen und gesondert aufzuführen.	
Innere Randbedingungen:	
<ul style="list-style-type: none"> x Raumgeometrie wird mit ausreichender Ähnlichkeit abgebildet. x Plume kann ungehindert in Rauchsicht eindringen. x Nach Brandentstehungsphase liegt mittlere Rauchgastemperatur 1 K über Umgebungstemperatur. x Impulsarme bodennahe Zuluftführung liegt vor ($w_{zu} \leq 1,0$ m/s). x Zuluftstrahlen interagieren nicht mit Rauchsicht. x Kaltluftabfälle sind nicht zu erwarten. x Keine negativen Auswirkungen durch Lüftungsanlagen zu erwarten x Keine negativen Windeinwirkungen zu erwarten x Max. Rauchabschnittsfläche ≤ 1600 m² 	

Characteristics of design fire(s):	
Fire intensity coefficient: 0,047 kW/s²	
Max. specific heat release rate, in kW/m ² : 500	
Fire propagation speed, in m/s: 0,0097	
Fraction of radiation output, in %: 30	
Max. heat release rate, in kW: 6000	
Max. area on fire, in m ² : 12	
Smoke characteristics: not applicable	
Characteristics of combustion model: not applicable	
Other:	
The fire curves are given on separate sheets.	
Fire-protection infrastructure:	
Sprinkler systems:	
RTI in $\sqrt{m \times s}$:	distance between plume centreline and sprinkler head, in m:
Nominal activation temperature, in °C:	distance between seat of fire and ceiling, in m:
Specific water application, in mm/s:	activation time, in s:
Fire detection and alarm systems:	
Fire characteristic:	
Detection time, in s:	
Other:	
Smoke-exhaust ventilation systems:	
Natural smoke-exhaust ventilation systems:	Mechanical smoke-exhaust ventilation systems:
Aerodynamic free area, in m ² : 4,9	total volume flow, in m ³ /s:
Effective inlet-air opening surface area, in m ² : 18,0	effective inlet-air opening surface area, in m ² :
Mean inlet-air velocity, in m/s: 1,0	mean inlet-air velocity, in m/s:
Activation time, extract air, in s: 120	activation time, extract air, in s:
Activation time, inlet air, in s: 120	activation time, inlet air, in s:
Type of activation:	type of activation:
Classification of natural smoke- and heat-exhaust ventilator: as per DIN 18232-2	classification of ventilator:
Other:	other:
The position of inlet air and extract-air outlets or exhausts is shown on separate sheets.	
For mixed systems, the relevant characteristics of the smoke removal system shall be determined analogously, and listed separately.	
Interior boundary conditions:	
<ul style="list-style-type: none"> x Room geometry is mapped to sufficient similarity. x Plume can enter the smoke layer unimpeded. x After initial stage of fire, mean smoke-gas temperature exceeds ambient temperature by 1 K. x Make-up air is supplied at low momentum, near the floor ($w_{zu} \leq 1,0$ m/s). x Inlet-air jets do not interact with smoke layer. x No downdraughts of cold air to be expected x No adverse effects from ventilation systems to be expected x No adverse wind effects to be expected x Max. smoke-reservoir surface area ≤ 1600 m² 	

Sofern mindestens einer der o.g. inneren Randbedingungen nicht zutrifft, muss die durchgeführte Nachweisführung diesbezüglich begründet werden.
Ausgangstemperaturen:
Umgebungstemperatur im Raum bei Brandbeginn in °C: 20
Zulufttemperatur in °C: 20
Brandschutztechnische Interaktionen:
Die Beschreibung der relevanten brandschutztechnischen Interaktionen erfolgt gesondert (z. B. mit einem Zeitstrahl).
Sonstiges:
Simulationsergebnisse:
Die Auswertung und Darstellung der Simulationsergebnisse erfolgt gesondert.

D3 FD-Verfahren

Schritt 1: Erstellen des Geometriemodells

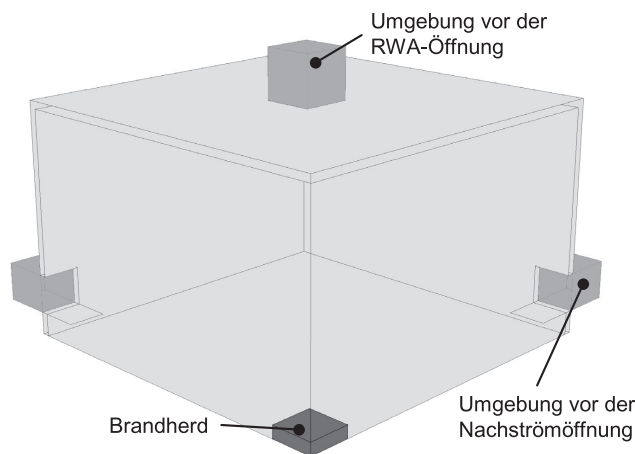


Bild D5. Geometriemodell der Halle (Viertelschnitt)

Schritt 2: Erstellen des Gitters

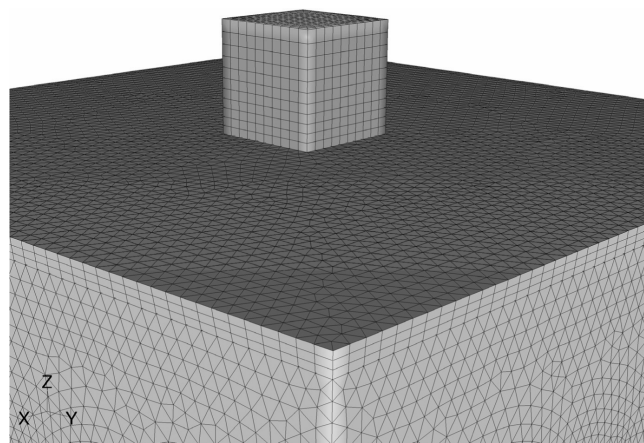


Bild D6. Gittermodell

Whenever one of the above interior boundary conditions is not fulfilled, the verification shall furnish justification in this respect.
Initial temperatures:
Ambient temperature in the room at outbreak of fire, in °C: 20
Inlet-air temperature, in °C: 20
Fire-protection interactions:
The relevant fire-protection interactions are described on separate sheets (e.g. in the form of a time bar).
Other:
Simulation results:
The simulation results are evaluated and given on separate sheets.

D3 CFD method

Step 1: Generation of geometry model

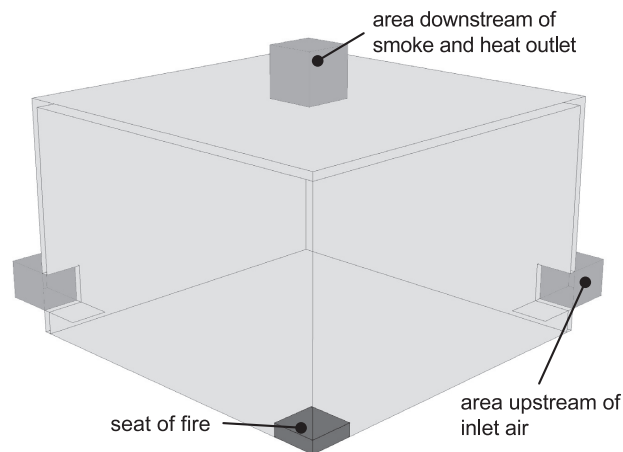


Figure D5. Geometry model of hall (quarter section)

Step 2: Generation of grid

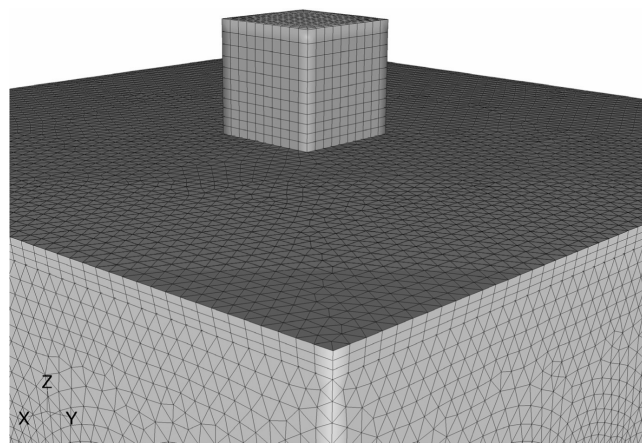


Figure D6. Grid model

Schritt 3: Randbedingungen/Modelle

Allgemeine Angaben:
Bezeichnung des Objekts: VDI-Testbeispiel
Bauort: Musterort
Bauherr (BH): Muster-Bauherr
Entwurfsverfasser (EV): Muster-Entwurfsverfasser
Nachweisführender (NF): Muster-Brandschutzplaner
Brandschutzdienststelle (BDS): Muster-Brandschutzdienststelle
Bauaufsichtsbehörde (BOA): Muster-Bauordnungsamt
Abstimmungsprotokolle:
Beschreibung des Schutzziels (Personenschutz, Brandbekämpfung, Sachschutz, Nachbarschutz etc.): Aufrechterhaltung einer raucharmen Schicht von 4,5 m zur Gewährleistung der Brandbekämpfung
Angaben zum CFD-Modell:
Bezeichnung des Modells/Version: Muster-CFD-Modell
Modelltyp: 6.3.9
Softwarehersteller: Muster-CFD-Hersteller
Beschreibung der Objektmodellierung
Netzgenerierung:
Art des verwendeten Netzes: hybrides Rechennetz aus Hexaedern, Pyramiden, Prismen und Tetraedern
Anzahl der Netzelemente 670.719
Anfangs- und Randbedingungen:
Anfangsbedingung aller im Modell definierten Oberflächen und Volumen: Alle Größen gleich null, $T = 20\text{ °C}$, $TKE = 1e^{-3}$, $EPS = 1e^{-4}$
Randbedingung aller im Modell definierten Oberflächen: Alle Öffnungen pressure outlet, $T = 20\text{ °C}$, Turbulenzintensität = 3 %, Viskositätsverhältnis = 3, Rauchgas = 0, Differenzdruck = 0 Außenwände: konvektiver Wärmestrom über $\alpha = 25\text{ W/m}^2\text{ K}$, $T_{\text{Umgebung}} = 20\text{ °C}$ Baustoff der Wände: Beton mit $c_p = 1,0\text{ kJ/kgK}$, $\lambda = 82 - 0,0017 \cdot T$ (in °C) · W/mK, $\rho = 2300\text{ kg/m}^3$ Brandherd: 4,2 MW konstant (6 MW · 80 %, 20 % ausgekoppelt durch Rußstrahlung)
Simulationsdauer: 10 min
Zeitschrittweite: 1 s
Definition der Fluideigenschaften
Dichte: ideales Gasgesetz
Viskosität: $1,72e^{-5}\text{ kg/ms}$
Wärmeleitfähigkeit: 0,0454 W/mK
Wärmekapazität: 1006,43 J/kg K
Physikalische/chemische Modelle
Turbulenzmodell – Feld: Realizable-k-eps-Modell
Turbulenzmodell – Wand: Standard Wall Function
Verbrennungsmodell: –
Strahlungsmodell: Discrete Ordinate Model (DOM)

Step 3: Boundary conditions/models

General data:
Designation of object: VDI test example
Building site: example site
Building owner (BH): example building owner
Designer (EV): example designer
Person verifying (NF): example fire-protection planner
Fire protection inspectorate (BDS): example fire-protection inspectorate
Building supervisory board (BOA): example building authority
Coordination records:
Description of protection goal (protection of persons, firefighting, protection of property, neighbourhood protection, etc.): Maintain a smokeless layer of 4,5 m in order to ensure firefighting
Data regarding the CFD model:
Designation of model/release: example CFD model
Model type: 6.3.9
Software manufacturer: example CFD manufacturer
Description of object modelling
Grid generation:
Type of grid used: hybrid calculation grid made up of hexahedra, pyramids, prisms and tetrahedra
Number of grid elements 670.719
Initial and boundary conditions:
Initial condition of all surfaces and volumes defined in the model: All dimensions equal to zero, $T = 20\text{ °C}$, $TKE = 1e^{-3}$, $EPS = 1e^{-4}$
Boundary condition of all surfaces defined in the model: All pressure outlet openings, $T = 20\text{ °C}$, turbulence intensity = 3 %, viscosity ratio = 3, smoke gas = 0, differential pressure = 0 Outer walls: convective heat flow at $\alpha = 25\text{ W/m}^2\text{ K}$, $T_{\text{Umgebung}} = 20\text{ °C}$ Building material of walls: Concrete with $c_p = 1,0\text{ kJ/kgK}$, $\lambda = 82-0,0017 \cdot T$ (in °C) · W/mK, $\rho = 2300\text{ kg/m}^3$ Fire source: 4,2 MW constant (6 MW · 80 %, 20 % coupled out due to soot radiation)
Simulation period: 10 min
Time increment: 1 s
Definition of fluid properties
Density: ideal gas law
Viscosity: $1,72e^{-5}\text{ kg/ms}$
Thermal conductivity: $0,0454\text{ W/mK}$
Heat capacity: $1006,43\text{ J/kg K}$
Physical/chemical models
Turbulence model – field: Realizable-k-eps model
Turbulence model – wall: Standard wall function
Combustion model: –
Radiation model: Discrete ordinate model (DOM)

Numerisches Verfahren	
Diskretisierung:	
Verwendete Ortsdiskretisierungsmethode <input type="checkbox"/> FDM <input checked="" type="checkbox"/> FVM <input type="checkbox"/> FEM <input type="checkbox"/> andere: Diskretisierungsansatz: QUICK Ordnung des Diskretisierungsansatzes: annähernd 3. Ordnung	
Verwendete Zeitdiskretisierungsmethode Diskretisierungsansatz: implicit Ordnung des Diskretisierungsansatzes: 1. Ordnung	
Konvergenzkriterien: für alle Gleichungen $1e^{-4}$ außer Energie und DOM, dort $1e^{-6}$	
Brandverlaufskurven:	
<input type="checkbox"/> nach VDI 6019 Blatt 1 <input type="checkbox"/> Abbrand-/Verbrennungsmodell: <input checked="" type="checkbox"/> Sonstiges: konstant 6 MW Gesamt-Wärmefreisetzungsrate	
Kennwerte des Bemessungsbrands/der Bemessungsbrände:	
Brandintensitätskoeffizient:	
Max. spezifische Wärmefreisetzungsrate in kW/m ² : 500	
Brandausbreitungsgeschwindigkeit in m/s:	
Anteil der Strahlungsleistung in %: 80	
Max. Wärmefreisetzungsrate in kW: 6000	
Max. Brandfläche in m ² : 12	
Rauchkennwerte:	
Kennwerte des Abbrandmodells: hier nicht relevant	
Sonstiges:	
Die Darstellung der Brandverlaufskurven erfolgt gesondert.	
Brandschutztechnische Infrastruktur:	
Sprinkleranlagen:	
RTI in $\sqrt{m \times s}$: Nennauslösetemperatur in °C: Spezifische Wasserbeaufschlagung in mm/s:	Abstand zwischen Plume-Achse und Sprinklerkopf in m: Abstand zwischen Brandherd und Decke in m: Auslösezeitpunkt in s:
Brandmeldeanlagen:	
Brandkenngröße: – Zeitpunkt Detektion in s: – Sonstiges: –	
Rauchabzugsanlagen:	
NRA:	MRA:
Aerodynamische Öffnungsfläche in m ² : 7,08 (geometrisch!)	Gesamtvolumenstrom an den Absaugstellen in m ³ /s:
Wirksame Zuluftfläche in m ² : 18,55	wirksame Zuluftfläche in m ² :
Mittlere Zuluftgeschwindigkeit in m/s:	mittlere Zuluftgeschwindigkeit in m/s:
Auslösezeitpunkt Abluft in s: 0	Auslösezeitpunkt Abluft in s:
Auslösezeitpunkt Zuluft in s: 0	Auslösezeitpunkt Zuluft in s:
Art der Auslösung: –	Art der Auslösung:

Numerical method	
Discretisation:	
Space discretisation method used <input type="checkbox"/> FDM <input checked="" type="checkbox"/> FVM <input type="checkbox"/> FEM <input type="checkbox"/> other:	
Discretisation approach: QUICK Order of discretisation approach: approximately 3rd order	
Time discretisation method used Discretisation approach: implicit Order of discretisation approach: 1st order	
Convergence criteria: 1e⁻⁴ for all equations, but 1e⁻⁶ for energy and DOM	
Fire curves:	
<input type="checkbox"/> as per VDI 6019 Part 1 <input type="checkbox"/> combustion model X other: constant 6 MW total heat release rate	
Characteristics of design fire(s):	
Fire intensity coefficient:	
Max. specific heat release rate, in kW/m ² : 500	
Fire propagation speed, in m/s:	
Fraction of radiation output, in %: 80	
Max. heat release rate, in kW: 6000	
Max. area on fire, in m ² : 12	
Smoke characteristics:	
Characteristics of combustion model: not applicable	
Other:	
The fire curves are given on separate sheets	
Fire-protection infrastructure:	
Sprinkler systems:	
RTI in $\sqrt{m \times s}$:	distance between plume centreline and sprinkler head, in m:
Nominal activation temperature, in °C:	distance between seat of fire and ceiling, in m:
Specific water application, in mm/s:	activation time, in s:
Fire detection and alarm systems:	
Fire characteristic: –	
Detection time, in s: –	
Other: –	
Smoke-exhaust ventilation systems:	
Natural smoke-exhaust ventilation systems:	Mechanical smoke-exhaust ventilation systems:
Aerodynamic free area, in m ² : 7,08 (geometrical area!)	total volume flow, in m ³ /s:
Effective inlet-air opening surface area, in m ² : 18,55	effective inlet-air opening surface area, in m ² :
Mean inlet-air velocity, in m/s:	mean inlet-air velocity, in m/s:
Activation time, extract air, in s: 0	activation time, extract air, in s:
Activation time, inlet air, in s: 0	activation time, inlet air, in s:
Type of activation: –	type of activation:

Klassifizierung der NRWG: –	Klassifizierung der Brandgasventilatoren:
Sonstiges:	Sonstiges:
Die Lage der Zuluftflächen sowie der Abluftflächen bzw. der Absaugstellen wird gesondert dargestellt.	
Bei Mischsystemen sind die relevanten Kenndaten der Rauchabzugsanlage sinngemäß zu bestimmen und gesondert aufzuführen.	
Brandschutztechnische Interaktionen:	
Die Beschreibung der relevanten brandschutztechnischen Interaktionen erfolgt gesondert (z. B. mit einem Zeitstrahl).	
Sonstiges:	
Simulationsergebnisse:	
Die Auswertung und Darstellung der Simulationsergebnisse erfolgt gesondert.	

Schritt 4: Ergebnisse

Die Berechnungen werden exemplarisch zu einem Zeitpunkt 10 min nach Beginn der Wärmefreisetzung ausgewertet.

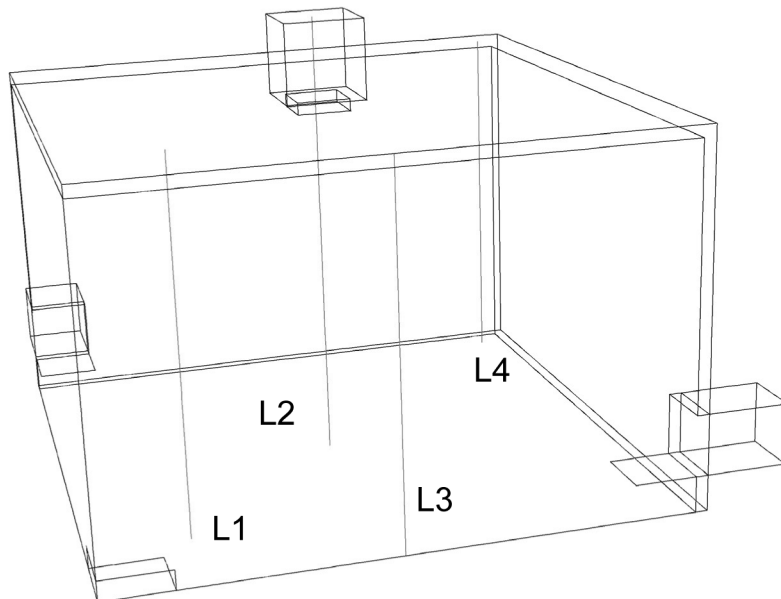


Bild D7. Definition der Auswertepositionen (im Viertelschnitt)

Classification of natural smoke- and heat-exhaust ventilator : –	Classification of ventilator:
Other:	Other:
The position of inlet air and extract-air outlets or exhausts is shown on separate sheets.	
For mixed systems, the relevant characteristics of the smoke removal system shall be determined analogously, and listed separately.	
Fire-protection interactions:	
The relevant fire-protection interactions are described on separate sheets (e.g. in the form of a time bar).	
Other:	
Simulation results:	
The simulation results are evaluated and given on separate sheets.	

Step 4: Results

By way of example, the calculations are evaluated at a point in time when 10 minutes have elapsed since the onset of heat release.

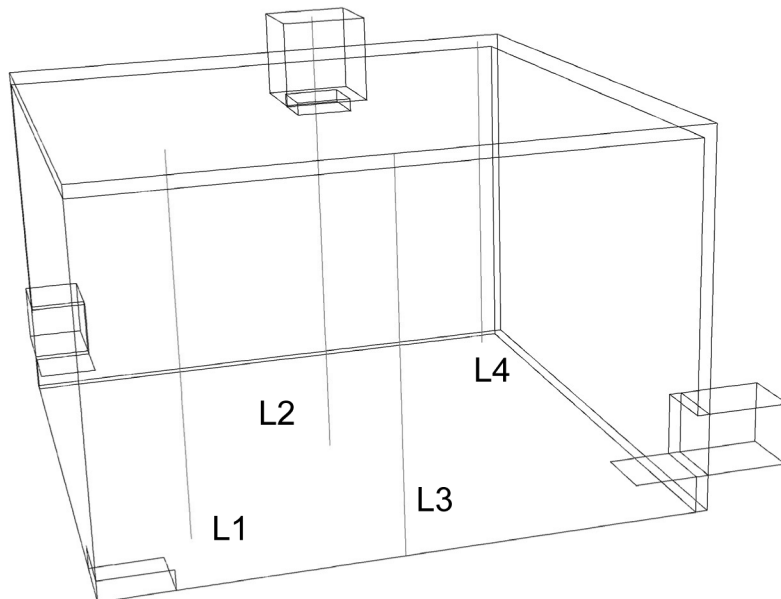


Figure D7. Definition of evaluation positions (in the quarter section)

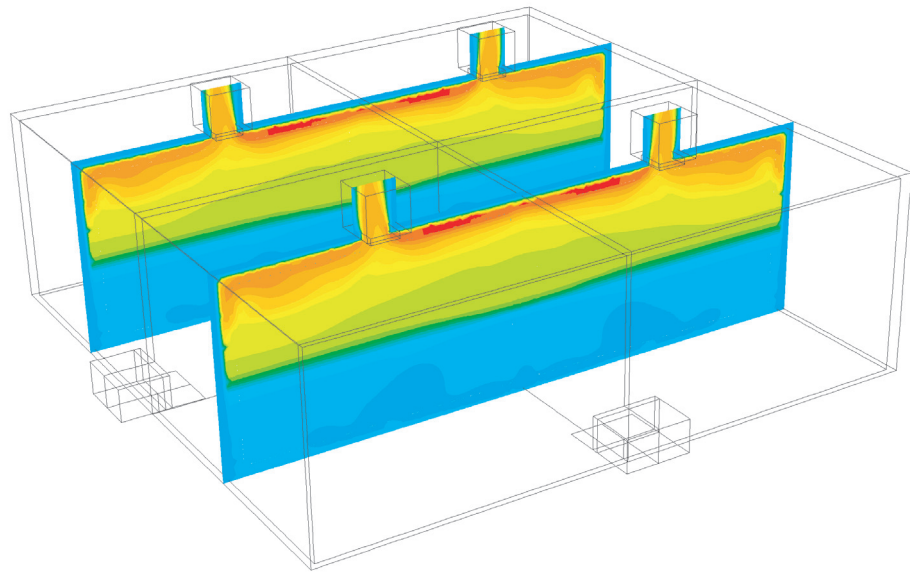
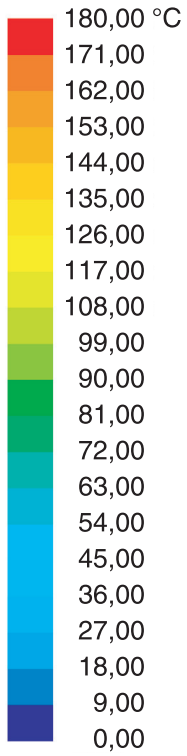


Bild D8. Temperaturverteilung

Figure D8. Temperature distribution

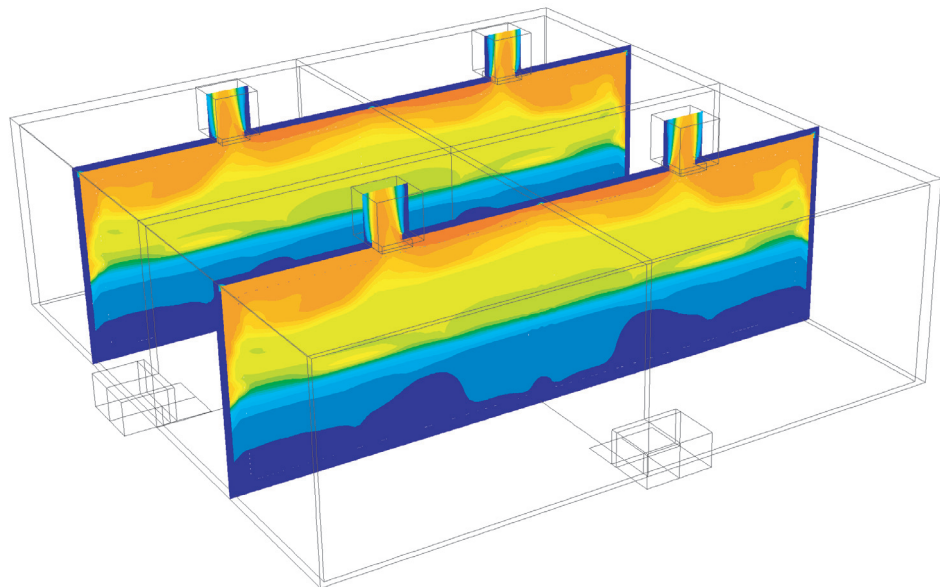
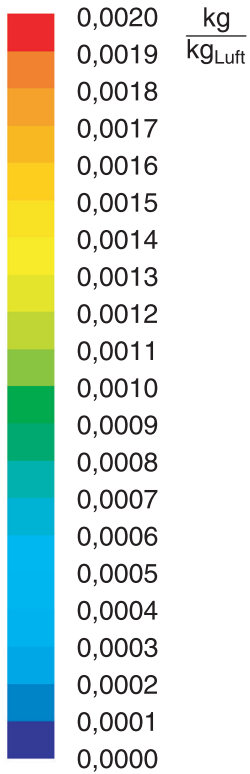


Bild D9. Konzentrationsverteilung

Figure D9. Concentration distribution

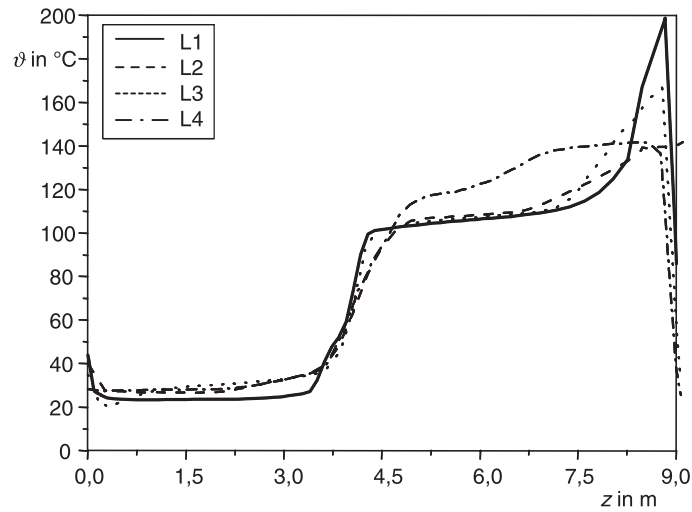


Bild D10. Temperaturprofile an den Auswertepositionen

Figure D10. Temperature profiles at the evaluation positions

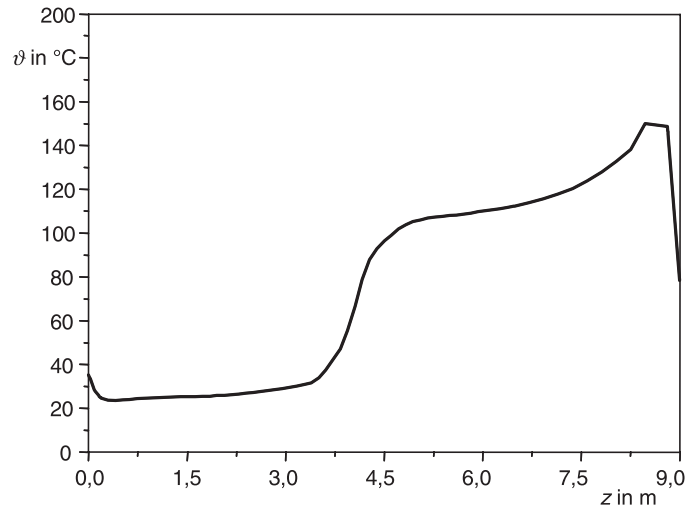


Bild D11. Gemittelter Temperaturverlauf

Figure D11. Averaged temperature curve

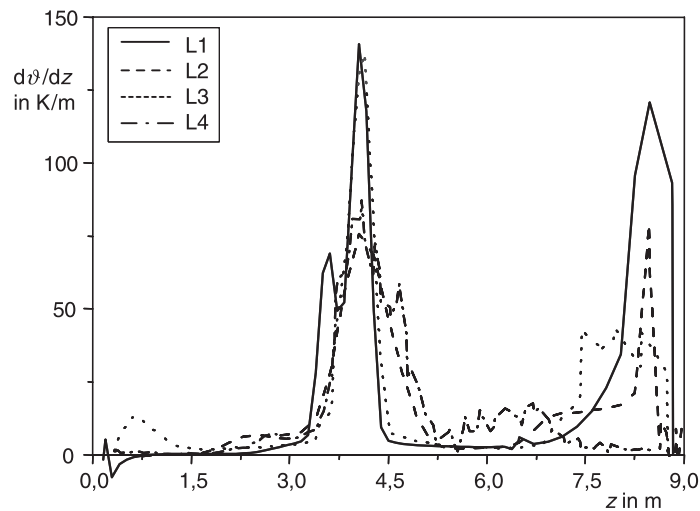


Bild D12. Temperaturgradienten an den Auswertepositionen

Figure D12. Temperature gradients at the evaluation positions

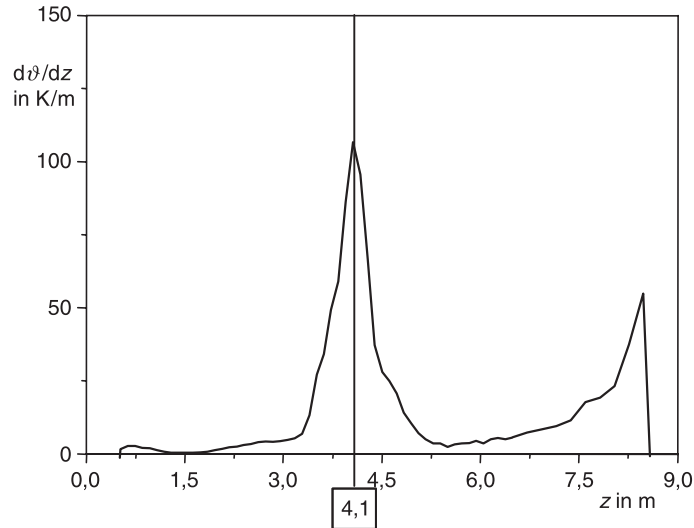


Bild D13. Gemittelter Temperaturgradient

Figure D13. Averaged temperature gradient

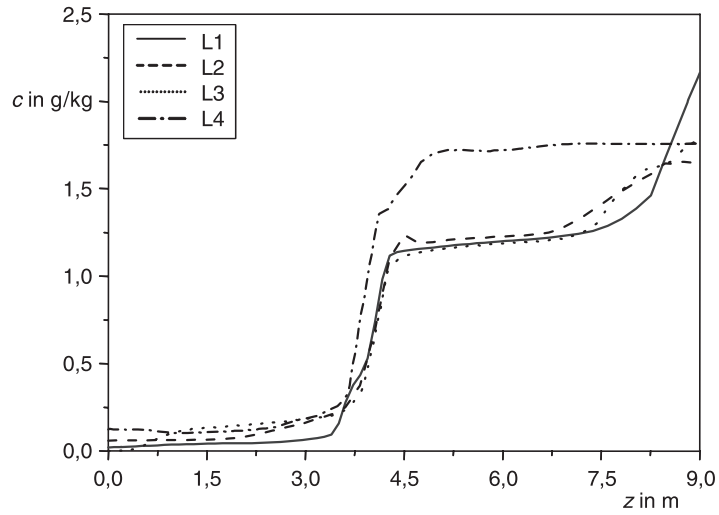


Bild D14. Konzentrationsprofile an den Auswertepositionen

Figure D14. Concentration profiles at the evaluation positions

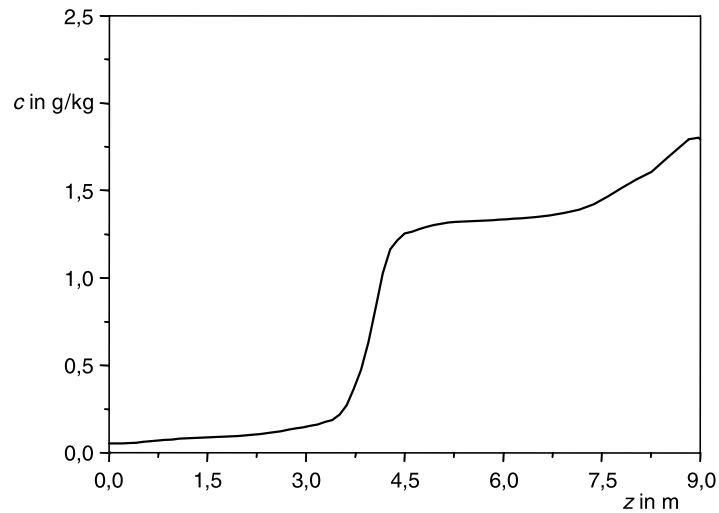


Bild D15. Gemittelter Konzentrationsverlauf

Figure D15. Averaged concentration curve

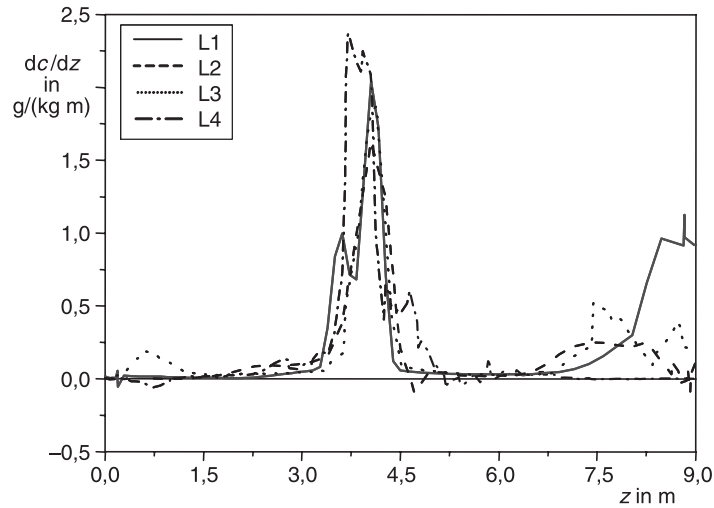


Bild D16. Konzentrationsgradienten an den Auswertepositionen

Figure D16. Concentration gradients at the evaluation positions

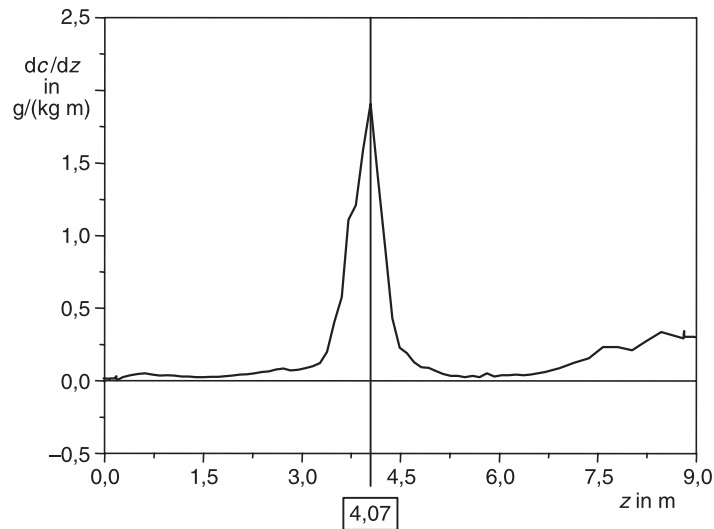


Bild D17. Gemittelter Konzentrationsgradient

Figure D17. Averaged concentration gradient

D4 Bewertung der Ergebnisse

Die Ergebnisse der drei verwendeten Berechnungsverfahren zur Dimensionierung der notwendigen Flächen zur Entrauchung der Halle zeigen im Rahmen der verfahrensbedingten Genauigkeiten eine gute Übereinstimmung.

D4 Evaluation of results

The results of the three calculation methods used for dimensioning the opening surfaces required for smoke removal from the hall show good agreement within the method-inherent accuracies.

Schrifttum / Bibliography

Technische Regeln / Technical rules

- DIN 4108 Wärmeschutz im Hochbau (Thermal insulation in buildings). Berlin: Beuth Verlag
- DIN 4844-1:2005-05 Grafische Symbole; Sicherheitsfarben und Sicherheitszeichen; Teil 1: Gestaltungsgrundlagen für Sicherheitszeichen zur Anwendung in Arbeitsstätten und in öffentlichen Bereichen (ISO 3864-1:2002 modifiziert) (Graphical symbols; Safety colours and safety signs; Part 1: Design principles for safety signs in workplaces and public areas (ISO 3864-1:2002 modified)). Berlin: Beuth Verlag
- DIN 4844-2:2001-02 Sicherheitskennzeichnung; Teil 2: Darstellung von Sicherheitszeichen (Safety marking; Part 2: Overview of safety signs). Berlin: Beuth Verlag
- DIN 4844-2/A1:2004-05 Sicherheitskennzeichnung; Teil 2: Darstellung von Sicherheitszeichen; Änderung A1 (Safety identification; Part 2: Overview of safety signs; Amendment A1). Berlin: Beuth Verlag
- DIN 4844-3:2003-09 Sicherheitskennzeichnung; Teil 3: Flucht- und Rettungspläne (Safety marking; Part 3: Escape- and rescue plan). Berlin: Beuth Verlag
- DIN V 18151-100:2005-10 Hohlblöcke aus Leichtbeton; Teil 100: Hohlblöcke mit besonderen Eigenschaften (Lightweight concrete hollow blocks; Part 100: Hollow blocks with specific properties). Berlin: Beuth Verlag
- DIN 18180:2007-01 Gipsplatten; Arten und Anforderungen (Gypsum plasterboards; Types and requirements). Berlin: Beuth Verlag
- DIN 18232-2:2007-11 Rauch- und Wärmefreihaltung; Teil 2: Natürliche Rauchabzugsanlagen (NRA); Bemessung, Anforderungen und Einbau (Smoke and heat control systems; Part 2: Natural smoke and heat exhaust ventilators; Design, requirements and installation). Berlin: Beuth Verlag
- DIN 18232-5:2003-04 Rauch- und Wärmefreihaltung; Teil 5: Maschinelle Rauchabzugsanlagen (MRA); Anforderungen, Bemessung (Smoke and heat control installations; Part 5: Powered smoke exhaust systems; Requirements, design). Berlin: Beuth Verlag
- DIN V 18550:2005-04 Putz und Putzsysteme; Ausführung (Plastering/rendering and plastering/rendering systems; Execution). Berlin: Beuth Verlag
- DIN EN 12101-1:2006-06 Rauch- und Wärmefreihaltung; Teil 1: Bestimmungen für Rauchschränke; Deutsche Fassung EN 12101-1:2005 + A1:2006 (Smoke and heat control systems; Part 1: Specification for smoke barriers; German version EN 12101-1:2005 + A1:2006). Berlin: Beuth Verlag
- DIN EN 13162:2009-02 Wärmedämmstoffe für Gebäude; Werkmäßig hergestellte Produkte aus Mineralwolle (MW); Spezifikation; Deutsche Fassung EN 13162:2008 (Thermal insulation products for buildings; Factory made mineral wool (MW) products; Specification; German version EN 13162:2008). Berlin: Beuth Verlag
- DIN EN ISO 6946:2008-04 Bauteile; Wärmedurchlasswiderstand und Wärmedurchgangskoeffizient; Berechnungsverfahren (ISO 6946:2007); Deutsche Fassung EN ISO 6946:2007 (Building components and building elements; Thermal resistance and thermal transmittance; Calculation method (ISO 6946:2007); German version EN ISO 6946:2007). Berlin: Beuth Verlag

DIN EN ISO 10456:2008-06 Baustoffe und -produkte; Wärme- und feuchtetechnische Eigenschaften; Tabellierte Bemessungswerte und Verfahren zur Bestimmung der wärmeschutztechnischen Nenn- und Bemessungswerte (ISO 10456:2007); Deutsche Fassung EN ISO 10456:2007 (Building materials and products; Hygrothermal properties; Tabulated design values and procedures for determining declared and design thermal values (ISO 10456:2007); German version EN ISO 10456:2007). Berlin: Beuth Verlag

ISO 13571:2007-06 Life-threatening components of fire; Guidelines for the estimation of time available for escape using fire data (Lebensbedrohende Bestandteile von Feuer; Leitlinien zur Abschätzung der für die Flucht zur Verfügung stehenden Zeit unter Berücksichtigung von brandschutzrelevanten Messwerten). Genf: ISO

VDI 1000:2006-10 Richtlinienarbeit; Grundsätze und Anleitungen (Establishing guidelines; Principles and procedures). Berlin: Beuth Verlag

VDI 3819 Brandschutz in der Gebäudetechnik (Fire protection in building services). Berlin: Beuth Verlag

VDI 6019 Blatt 1:2006-05 Ingenieurverfahren zur Bemessung der Rauchableitung aus Gebäuden; Brandverläufe, Überprüfung der Wirksamkeit (Engineering procedure for the dimensioning of the smoke derivative from buildings; Fire curves, verification of the effectiveness). Berlin: Beuth Verlag

Literatur / Literature

- [1] *Morgan, H.P.* et al.: Design methodologies for smoke and heat exhaust ventilation. BRE publication BR 368, Constr. Res. Com. Ltd, London, June 1999
- [2] *Brein, D.*: Anwendungsbereiche und -grenzen für praxisrelevante Modellansätze zur Bewertung der Rauchausbreitung in Gebäuden (Plume-Formeln), Vers. 1.2, Forschungsstelle für Brandschutztechnik, Universität Karlsruhe
- [3] *Dietze, L.*: Freie Lüftung von Industriegebäuden, VEB Verlag für Bauwesen, Berlin, 1987
- [4] *Seader, J.D.*; *I.N. Einhorn*: 16th Symp. (Int) on Combustion, Pittsburgh, 1976
- [5] *Recknagel, H.*; *E. Sprenger*; *E.R. Schramek*: Taschenbuch für Heizung + Klimatechnik 03/04, Oldenbourg Industrieverlag, München, 2003
- [6] *Karlsson, B.*; *J.G. Quintiere*: Enclosure Fire Dynamics, CRC Press Boca Raton, 2000
- [7] *Regenscheit, B.*: KI 1/74, Seite 9/16 und Klima-Kälte-Tech. 6/7/8, 1975, ferner HLH 4/76, Seite 122/6
- [8] *Tewarson, A.*: Generation of Heat and Chemical Compounds in Fires, SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, 3rd Edition, NFPA, Quincy, Massachusetts, 2002
- [9] *Purser, D.A.*: Toxicity Assessment of Combustion Products, SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, 3rd Edition, NFPA, Quincy, Massachusetts, 2002
- [10] *Jin, T.*: Visibility and Human Behaviour in Fire Smoke, SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, 3rd Edition, NFPA, Quincy, Massachusetts, 2002
- [11] *Gall, D.*; *K. Bieske*; *S. Kokoschka*: Evaluierung von Sicherheitsleitsystemen in Rauchsituationen, Abschlussbericht, TU Ilmenau 2003