

Allgemeine Lufttechnik



Sicherheit in Gebäuden und Infrastruktureinrichtungen

Grundlagenpapier Entrauchung und Rauchfreihaltung

Unterstützende Maßnahmen für Selbst- und Fremdrettung,
Löschangriff und Sachschutz

2. Auflage 2024-12



Sicherheit in Gebäuden und Infrastruktureinrichtungen

Grundlagenpapier Entrauchung und Rauchfreihaltung

Unterstützende Maßnahmen für Selbst- und Fremdrettung,
Löschangriff und Sachschutz



Vorwort

Vorwort

Für die Sicherheit in Gebäuden und Infrastruktureinrichtungen nimmt der vorbeugende Brandschutz in Deutschland mittlerweile eine bedeutende Stellung ein. In Deutschland kommt es laut dem Feuerwehrverband Deutschland jährlich zu circa 200.000 Bränden. Dabei können sich die Schäden bis in die Millionen erstrecken. In 2023 kamen bundesweit 324 Menschen bei Bränden ums Leben; sie starben an toxischem Brandrauch oder an den Folgen von Verbrennungen.

In der Fachwelt gibt es immer noch recht wenig spezielle Fachliteratur insbesondere zu dem wichtigen Teilbereich des vorbeugenden Brandschutzes, nämlich der Entrauchung, um die Nutzung von Flucht- und Rettungswegen zu sichern.

In dieser zweiten Ausgabe des „Grundlagenpapiers Entrauchung und Rauchfreihaltung“ werden die Themen Entrauchung und Druckbelüftung umfassend und praxisorientiert behandelt. Der VDMA Arbeitskreis Brandschutz und Entrauchung hat in den letzten Jahren maßgeblich dazu beigetragen, mit Informations- und Einheitsblättern sowie Symposien mit großem Praxisbezug für notwendige Aufklärung zu sorgen.

Neben wichtigen physikalischen Grundlagen der Strömungsmechanik und Wärmelehre werden die Toxizität von Rauchgasen und rechtliche Aspekte betrachtet. Ein Schwerpunkt dieser zweiten Ausgabe ist die praktische Anwendung des Grundlagenwissens und die Umsetzung bei der Auslegung von Rauchableitungs- und Entrauchungsmaßnahmen.

Inhalt

1. Einleitung	6
2. Anwendungsbereich	9
3. Normen und weitere technische Regeln	10
4. Begriffe	11
5. Rauchableitung im Baurecht und Ziele der Entrauchung	14
6. Gefährdungen durch Rauch	17
7. Prinzipien der Rauchableitung	18
7.1 Rauchableitung durch Schichtung	18
7.2 Rauchableitung durch Verdünnung	28
8. Entrauchung von Garagen und Sonderbauten mit komplexen Geometrien	36
8.1 Geschlossene Großgaragen	36
8.1.1 Allgemeines	36
8.1.2 Entrauchung einer Großgarage mittels NRA	38
8.1.3 Entrauchung einer Großgarage mittels MRA	39
8.2 Rauchabschnittsbildung	40
8.2.1 Allgemeines	40
8.2.2 Rauchabschnittsbildung durch bauliche Maßnahmen	40
8.2.3 Rauchabschnittsbildung durch lufttechnische Maßnahmen	40
9. Druckbelüftungsanlagen	45
9.1 Einleitung und Schutzziele	45
9.2 Grundlagen	45
9.3 Randbedingungen für die Auslegung	48
9.4 Berechnung der Türöffnungskräfte	49
9.5 Strömungsgeschwindigkeiten	50
9.6 Konfigurationen	52
9.6.1 Vorräume	52
9.6.2 Tür ins Freie	52
9.6.3 Gebäude mit Feuerwehraufzügen und Sicherheitstreppe- räumen mit jeweils separaten Vorräumen	53
9.6.4 Strömungskriterium beim Sicherheitstuppenraum	53
9.6.5 Strömungskriterium beim Feuerwehraufzug	53
9.6.6 Gebäude mit Feuerwehraufzügen und Sicherheitstreppe- räumen mit gemeinsamen Vorräumen	54
9.6.7 Vorräume mit mehreren Türen zu notwendigen Fluren	55

9.7	Außenluft/Zuluft	55
9.7.1	Außenluftansaugung	55
9.7.2	Außen- und Zuluftleitungen, Abluftleitungen	56
9.7.3	Überströmöffnungen	56
9.7.4	Akustische Anforderungen	57
9.7.5	Zuluft einbringung	57
9.7.6	Anforderungen an den Aufstellungsort des Zuluftventilators	57
9.7.7	Energieversorgung	58
9.7.8	Elektrische Leitungsanlagen	58
9.8	Fortluft/Abströmöffnungen	58
9.9	Druck-/Volumenstromregelung	59
9.9.1	Selbsttätige (passive) Druckregelung	59
9.9.2	Aktive Regelung	59
9.10	Einflussgrößen auf die Druckverteilung	60
9.10.1	Überdruck im Treppenraumkopf	60
9.10.2	Druckverlust Treppenraum	60
9.10.3	Auftrieb	61
10.	Rauchableitung aus Aufzugsschächten	63
10.1	Rechtliches zur Öffnung am Schachtkopf oder Aufzugsmaschinenraum	63
10.2	Schutzziele	63
10.3	System zur Rauchableitung aus einem Aufzugsschacht	63
11.	Beteiligte Autoren	66
12.	Quellenverzeichnis und weiterführende Literatur	67
	Weiterführende Literatur	69
Anhang A:	Brandzersetzungsprodukte, Herkunft und Zusammensetzung	71
Anhang B:	Weitere Diagramme zu Kapitel 7	73
Anhang C:	Berechnungsbeispiele	77
C.1	Entrauchung durch Verdünnung	77
C.2	Entrauchung durch Schichtung mit MRA	79
C.3	Beispiel einer Garagenentrauchung durch Schichtbildung mit MRA	81
C.4	Beispiel einer Entrauchung für eine Eventhalle durch Schichtbildung mit MRA	86

1. Einleitung

Dem im Brandfall schnell und mit großem Volumen freigesetzten Brandrauch und den darin enthaltenen Brandgasen kommt für die Selbst- und die Fremdrettung, aber auch für den Löschangriff und den Sachschutz, eine große Bedeutung zu.

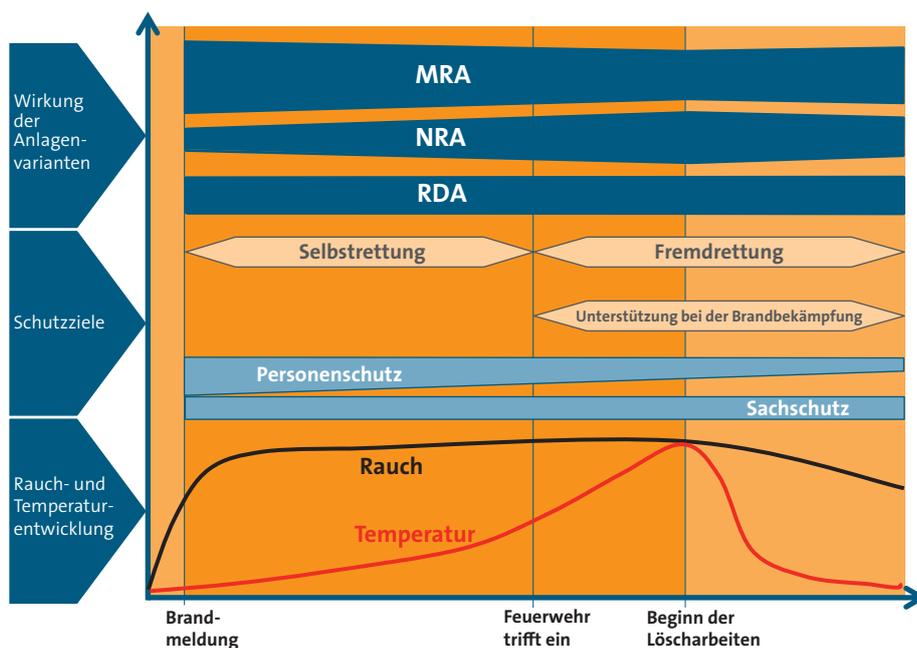
Dieses Grundlagenpapier beschreibt unterschiedliche Anforderungen an die Entrauchung und Maßnahmen zur Erfüllung der oben genannten Ziele. Es werden bewährte Entrauchungstechniken und -möglichkeiten vorgestellt, die je nach gewünschtem Schutzziel (siehe Bild 1) und in Abhängigkeit von der Raumgröße zu ergreifen sind.

Der Oberbegriff Rauch- und Wärmeabzugs-Anlagen (RWA) umfasst Maschinelle Rauchabzugsanlagen (MRA) und Natürliche Rauchabzugsanlagen (NRA).

Erläuternd zu Bild 1 wird festgestellt, dass die zeitliche Entwicklung der Rauchfreisetzung bereits im frühen Stadium des Brandes eine frühzeitige wirksame Entrauchung zur Abdeckung der Schutzziele erforderlich macht.

Die Leistungsfähigkeit der Rauch- und Wärmeabzugsanlagen ist von verschiedenen Randbedingungen abhängig wie z. B. von Wetterbedingungen, Anordnung von Nachstromöffnungen. Damit im Planungsprozess von Anlagen diese Unsicherheiten besser berücksichtigt werden können, wurde hierzu von der RWTH Aachen ein simulatives Verfahren vorgestellt, das derartige Randbedingungen und deren realitätsnahe Streuung einbezieht. Hierzu wurde ein CFD-Modell erstellt und mit der Monte-Carlo-Methode zur Variation dieser Randbedingungen gekoppelt.

Bild 1
Typisch zeitlicher Verlauf bei einem Brand



Quelle: VDMA

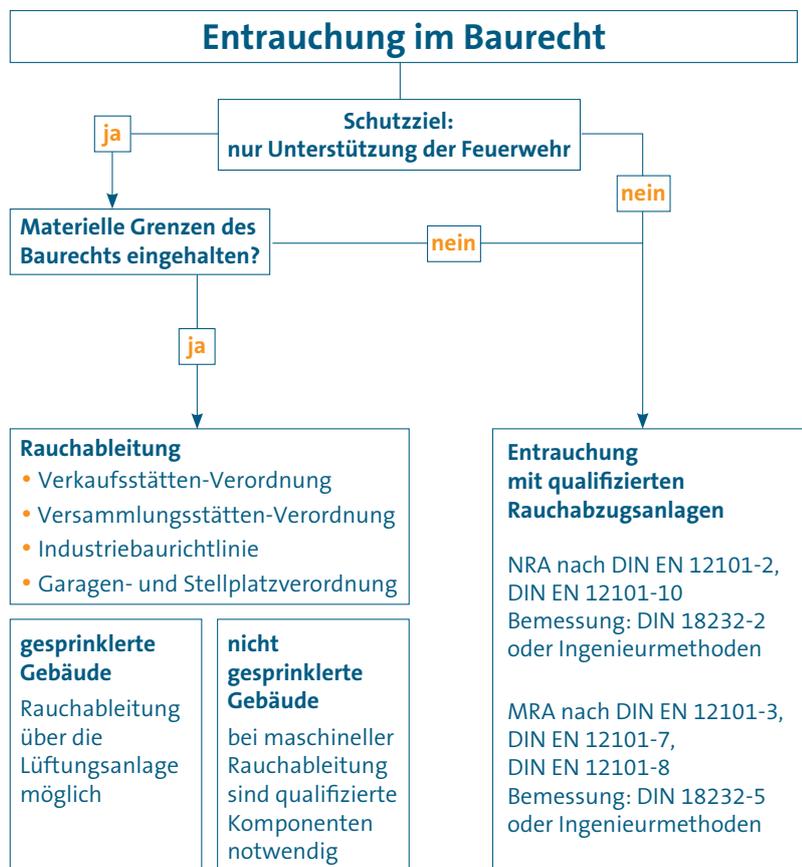
Die durchgeführte Sensitivitätsanalyse zeigt, dass Parameter zur Beschreibung von unterschiedlichen Wetterbedingungen und Brandherden einen besonders großen Einfluss auf die Rauchausbreitung ausüben. Die Personensicherheit in Innenräumen ist in den ersten Minuten nach Brandbeginn – also in der Selbstrettungsphase – bei MRA größer als bei NRA. Anschließend führen die gewählten Parametergrenzen

annähernd zu gleichen Bedingungen bei NRA und MRA (Quelle: „Probabilistische Bewertung von Entrauchungsanlagen“ Mark Wesseling, RWTH Aachen).

Bild 2 ordnet die verschiedenen Schutzziele und die Möglichkeiten der Entrauchung im Baurecht ein.

Bild 2

Zusammenhang zwischen den verschiedenen Schutzzielen, der Einhaltung von baurechtlich vorgegebenen Grenzen und den für die Entrauchung zu beachtenden Regeln



MRA: Maschinelle Rauchabzug-Anlage
 NRA: Natürliche Rauchabzug-Anlage
 Quelle: VDMA Arbeitskreis Brandschutz und Entrauchung

Die Entrauchung umfasst alle technischen Maßnahmen und Mittel, um Rettungswege sowie Aufenthaltsbereiche für Personen im Brandfall raucharm bzw. rauchfrei zu halten und für die Feuerwehr im Brandfall die Sichtverhältnisse zu verbessern.

Die erforderlichen Flächen bzw. Volumenströme für die Entrauchung werden nach bekannten Verfahren und Methoden dimensioniert. Man unterscheidet Schwerkraftentrauchung (Natürliche Entrauchung durch Nutzung der thermischen Auftriebskraft) und Maschinelle Entrauchung bzw. Entrauchung mit maschineller Unterstützung.

An die Betätigungseinrichtungen, die Steuerung und die Betriebsfähigkeit von Entrauchungseinrichtungen werden ggf. Forderungen zu deren Sicherung unter Brandeinwirkung (Funktionserhalt und/oder gesicherte Energieversorgung) erhoben.

Zur Sicherung der Entrauchung ist unbedingt auf eine ausreichende Nachströmung von Außenluft zu achten. Gegebenenfalls ist das Auslöseverhalten von Abström- und Nachströmöffnungen zu koppeln bzw. auf diese Bedingungen abzustimmen.

Klassische Anwendungsfälle für die Entrauchung sind z. B. Atrien, Ladenstraßen und Verkaufsflächen, Passagen, unterirdische Verkehrsanlagen, klimatisierte Bereiche sowie großräumige Bereiche, Industriegebäude usw.

Eine wirksame Rauchfreihaltung kann unter bestimmten Voraussetzungen (z. B. Sicherheitstreppe, Treppenhäuser, Feuerwehraufzüge, Fluchttunnel) durch Druckbelüftungsanlagen erfolgen.

Das Grundlagenpapier erhebt weder einen Anspruch auf Vollständigkeit noch auf die exakte Auslegung der bestehenden Rechtsvorschriften. Es darf nicht das Studium der relevanten Verordnungen, Gesetze, und Richtlinien ersetzen.

2. Anwendungsbereich

Das Bauordnungsrecht stellt in Gesetzen, Verordnungen und technischen Baubestimmungen Anforderungen an die Entrauchung und Rauchfreihaltung. Hierbei werden z. B. in den verschiedenen Sonderbauverordnungen und -richtlinien verschiedene Möglichkeiten zur Rauchableitung angeboten.

Dieses Grundlagenpapier schafft eine technisch fundierte Basis, damit Schutzziele und Realisierungen unterschiedlicher Entrauchungskonzepte besser beurteilt und umgesetzt werden können. Es ermöglicht das für unterschiedliche Aufgaben jeweils passende Entrauchungsprinzip zu erkennen, die richtige Projektierung und auch die jeweils erforderliche Anlagenausführung zu finden. Das Papier berücksichtigt verschiedenste Raumgeometrien in Regel- und Sonderbauten. Es kann bei allen Entrauchungsaufgaben in ober- und unterirdischen Bauwerken angewendet werden.

3. Normen und weitere technische Regeln

Die folgenden Dokumente sowie die in Kapitel 12 (Quellenverzeichnis) aufgeführten Normen und weiterführende Literatur sind für die Anwendung dieses Dokumentes erforderlich bzw. hilfreich.

DIN 14675, Brandmeldeanlagen – Teil 1: Aufbau und Betrieb

DIN 18232-2, Rauch- und Wärmefreihaltung – Teil 2: Natürliche Rauchabzugsanlagen (NRA); Bemessung, Anforderungen und Einbau

DIN 18232-5, Rauch- und Wärmefreihaltung – Teil 5: Maschinelle Rauchabzugsanlagen (MRA); Anforderungen, Bemessung

DIN EN 12101-1, Rauch- und Wärmefreihaltung – Teil 1: Bestimmungen für Rauchschrzen

DIN EN 12101-2, Rauch- und Wärmefreihaltung – Teil 2: Natürliche Rauch- und Wärmeabzugsgeräte

DIN EN 12101-3, Rauch- und Wärmefreihaltung – Teil 3: Bestimmungen für maschinelle Rauch- und Wärmeabzugsgeräte

DIN EN 12101-6, Rauch- und Wärmefreihaltung – Teil 6: Festlegungen für Differenzdrucksysteme – Bausätze

DIN EN 12101-7, Rauch- und Wärmefreihaltung – Teil 7: Entrauchungskanalstücke

DIN EN 12101-8, Rauch- und Wärmefreihaltung – Teil 8: Entrauchungsklappen

DIN EN 12101-10, Rauch- und Wärmefreihaltung – Teil 10: Energieversorgung

DIN EN 12101-10, Berichtigung 1, Rauch- und Wärmefreihaltung – Teil 10: Energieversorgung

DIN EN TS 12101-11 (ONR CEN/TS 12101-11), Rauch- und Wärmefreihaltung – Teil 11: Rauchfreihaltung von Parkhäusern

DIN EN 12101-13, Rauch- und Wärmefreihaltung – Teil 13: Differenzdrucksysteme – Rauchschutz-Druckanlagen (RDA) – Planung, Bemessung, Einbau, Abnahmeprüfung, regelmäßige Funktionsprüfung und Instandhaltung

Muster-Verwaltungsvorschrift Technische Bau-
bestimmungen (MVV TB) Ausgabe 2024/1
(28.08.2024)

VDI 2053 Blatt 2, Raumlufttechnik – Garagen –
Entrauchung (VDI-Lüftungsregeln)

4. Begriffe

Außenluft

die aus der Umgebung angesaugte Luft. Unbehandelte Luft, die von außen in die Anlage oder in eine Öffnung einströmt [1]

Automatische Brandmeldeanlage (BMA)

Gefahrenmeldeanlage aus dem Bereich des vorbeugenden Brandschutzes, die eine Brandmelderzentrale enthält, um Ereignisse von verschiedenen Brandmeldern zu empfangen, auszuwerten und Reaktionen einzuleiten [2]

Automatische Feuerlöschanlage

ständig betriebsbereite technische Anlage, die einen Brand nach automatischer Branderkennung durch Detektoren selbstständig mit einem Löschmittel bekämpft

Brandabschnitt

gegenüber angrenzenden Räumen abgeschlossener Abschnitt innerhalb eines Gebäudes, bestehend aus einem oder mehreren Räumen oder Nutzungseinheiten, der von Brandwänden und feuerbeständigen Decken begrenzt ist

Brandausbreitung

räumliche Ausweitung eines Brandes über die Brandentstehungsstelle hinaus

Branddauer

Zeit zwischen Brandentstehung und Beendigung des Brandes

Brandfläche

Grundfläche eines vom Brand erfassten Gebietes oder Raumes, bei mehreren Räumen, in verschiedenen Geschossen die Summe der Grundfläche [3]

Brandgase

gasförmige Bestandteile der Verbrennungsprodukte

Brandgeschoss

Geschoss in einer baulichen Anlage, in der ein Brand ausgebrochen ist

Brandlast

Wärmemenge, die bei der vollständigen Verbrennung aller brennbaren Stoffe in einem (Raum-) Volumen – einschließlich der Bekleidungen aller angrenzenden Oberflächen – freigesetzt werden kann [4]

Brandverlauf

Entwicklung eines Brandes nach Ort, Zeit und Intensität

Druckbelüftungsanlage

Anlage zur Rauchfreihaltung von Flucht- und Rettungswegen, die einen kontrollierten Überdruck in einem zu schützenden Bereich gegenüber einem Brandbereich erzeugt

Entrauchung

Gesamtheit aller technischen Maßnahmen und Mittel, um z. B. Rettungswege sowie Aufenthaltsbereiche für Personen im Brandfall raucharm bzw. rauchfrei zu halten und für die Feuerwehr im Brandfall die Sichtverhältnisse zu verbessern

Feuerwehraufzug

Feuerwehraufzüge sind besonders abgesicherte Aufzüge, die der Feuerwehr im Brandfall ein Erreichen des Brandgeschosses ermöglichen. Sie dienen der Menschenrettung und dem Geräte- und Materialtransport für die Feuerwehr

Flash-over

Rauchdurchzündung, schlagartige Ausbreitung einer Brandes auf alle thermisch aufbereiteten Oberflächen brennbarer Stoffe in einem Raum [5]

Flucht- und Rettungsweg

Weg, über den Menschen eine bauliche Anlage im Notfall schnell und sicher verlassen können; er führt ins Freie oder in einen gesicherten Bereich

Fremdrettung

durch die aktive Hilfe Dritter eingeleitete und durchgeführte Rettung

Jet-Ventilatoren

mit Hilfe von Jet-Ventilatoren werden Luft und Rauchgase ohne Kanalnetz in die vorgesehene Richtung gefördert

Maschinelles Rauch- und Wärmeabzugsgerät (MRWG)

Gerät zur Ableitung von Rauch und heißen Gasen aus einem Bauwerk im Brandfall

Nachströmung

Zuluft, die mittels Öffnungen oder mechanischer Einbringung die abgeführten Rauchgase ersetzt

Natürliches Rauch- und Wärmeabzugsgerät (NRWG)

Gerät zur Ableitung von Rauch und heißen Gasen aus einem Bauwerk im Brandfall allein über den thermischen Auftrieb

Nutzungseinheit

Nutzungseinheiten sind in sich abgeschlossene, einem bestimmten Nutzungszweck zugeordnete Bereiche, die von anderen Nutzungseinheiten durch einen eigenen Zugang vom Treppenraum oder vom notwendigen Flur abgetrennt sind

Rauch

sichtbarer Teil der flüchtigen Verbrennungsprodukte (Gase und Aerosole einschließlich flüchtiger Partikel), die beim Brennen oder einer Pyrolyse entstehen

Rauchableitung

ereignisabhängige Maßnahme zur Rauchabfuhr, jedoch mit nicht vorhersagbaren quantifizierbaren Ergebnissen

Raucharme Schicht

Abstand zwischen Fußboden und Unterseite der Rauchgasschicht

Rauchfreihaltung

Verhinderung des Eindringens von Rauch in zu schützende Räume

Rauchgastemperatur

Temperatur des durch Verbrennungsprozesse und Einmischung von Luft in aufsteigenden Verbrennungsgase entstandenen Gasgemisches

Rauch- und Wärmeabzugsanlage (RWA)

System, in der Regel bestehend aus Rauch- und Wärmeabzugsgeräten, Steuerung, Energieversorgung, Nachströmung und rauchabschnittsbildenden Komponenten, um bei einem Brand den Abzug von Rauch, Brandgasen und Wärme aus Gebäuden zu ermöglichen

Rettungsweg

Angriffsweg der Feuerwehr zur Fremdrettung und Brandbekämpfung
Einsatzkräfte können über diesen, verletzte Personen in Sicherheit bringen.

Selbstrettung

von den betroffenen Personen selbst eingeleitete und ohne Hilfe Dritter durchgeführte Rettung (Grundlage im Sonderbau)

Sicherheitstrepfenraum

Trepfenraum innerhalb oder außerhalb eines Gebäudes in den bestimmungsgemäß kein Feuer und Rauch eintreten darf

Vollbrand

Brandphase: an der alle im Raum enthaltenen Stoffe beteiligt sind

5. Rauchableitung im Baurecht und Ziele der Entrauchung

Ziele der Entrauchung

Die Maßnahmen zur Entrauchung bilden eine wesentliche Voraussetzung zur Selbstrettung, Fremdrettung und Brandbekämpfung sowie für den Sachschutz. Sie verhindern die unkontrollierte Rauchausbreitung und behindern bestimmungsgemäß den Flash-Over. Weiter können durch eine Entrauchung auch der Sachschutz (Schädigung oder der längerfristige Ausfall der Gebäude nach einem Brandereignis) und der Umweltschutz (z. B. durch Unterstützung von Löschmaßnahmen und damit Begrenzung der Entstehung von umweltrelevanten Schadstoffen) erhöht werden.

Die Selbst- und Fremdrettung von sich im Gebäude aufhaltenden Menschen wird vom Gesetzgeber durch die materiellen Anforderungen des Baurechts geregelt. Genehmigungsfähige Abweichungen von diesen Anforderungen sind durch entsprechende nutzungsgerechte Kompensationsmaßnahmen möglich. Zu diesen Kompensationsmaßnahmen kann eine wirksame Entrauchung zählen.

Die in der Bauordnung und den bauordnungsrechtlichen Vorschriften für Sonderbauten berücksichtigten Schutzziele sind:

- **Personenschutz**
Der Personenschutz soll in erster Linie durch die Einhaltung von Rettungsweglängen und -breiten, Brandabschnittsgrößen sowie maximaler Personenzahlen sichergestellt werden.
- **Unterstützung der Feuerwehr**
Die Rauchableitung dient der Unterstützung der Feuerwehr und der Durchführung wirksamer Löschmaßnahmen, vgl. Bild 2.
- **Nachbarschaftsschutz**
Dies soll vor allem durch Brandwände und die Einhaltung von Mindestabständen der Gebäude untereinander und zu Grundstücksgrenzen, sowie bestimmter Bauteilklassen, z. B. der harten Bedachung für Dächer, erreicht werden.

- **Umweltschutz**

Dies soll vor allem durch die Verwendung bestimmter Baustoffe (z. B. Vermeidung von Baustoffen, die krebserregende Stoffe freisetzen) und durch die Einhaltung bestimmter Baustoffklassen (z. B. keine Verwendung leicht entflammbarer Baustoffe) erreicht werden.

Neben den drei oben genannten baurechtlich relevanten Schutzziele, die zur Erlangung der Baugenehmigung zu beachten sind, kommen bei der Ausführungsplanung, der Errichtung und dem Betrieb eines Gebäudes meist weitere Schutzziele hinzu, die dann ebenfalls zu beachten sind. Dies können sein:

- Sachschutz
- Drittschutz (Verkehrssicherungspflicht)

Rauchableitung im Baurecht

Unter dem Begriff Rauchableitung werden im Bauordnungsrecht verschiedene Möglichkeiten der Ableitung von Rauch aus dem Gebäude im Brandfall subsumiert. Dabei kann die Rauchableitung raumgrößenabhängig über Fenster, Dachöffnungen oder mittels Natürlicher oder Maschineller Rauchabzugsanlagen erfolgen.

Werden in baurechtlichen Vorschriften (z. B. Sonderbauverordnungen) Regelungen zur Rauchableitung veröffentlicht, so dienen diese primär der Unterstützung der Feuerwehr bei deren Löschangriff. Es wird unterstellt, dass die in den Bauvorschriften beschriebenen Anforderungen an Rettungsweglängen, Ausgangsbreiten, maximale Personenzahlen und die Einhaltung von Baustoffklassen ausreichen, um die bauordnungsrechtlichen Schutzziele – insbesondere im Hinblick auf die Sicherstellung der Selbstrettung – zu erfüllen.

Die Muster Sonderbauverordnungen und -Richtlinien bieten für die Rauchableitung raumgrößenabhängig unterschiedliche Umsetzungsmöglichkeiten und nachstehend für MVKVO und MStättVO:

- **Rauchableitung über Fenster**
 Bei Raumgrößen bis 200 m² Grundfläche gelten die Anforderungen an die Rauchableitung im Regelfall als erfüllt, wenn die Räume Fenster haben.
 - **Rauchableitung über Öffnungen an oberster Stelle des Raumes oder im oberen Raumdrittel**
 Bei Raumgrößen bis 1 000 m² Grundfläche sind die Anforderungen an die Rauchableitung erfüllt, wenn Öffnungsflächen von 1 % der Grundfläche an oberster Stelle des Raumes vorhanden sind. Alternativ dürfen die Öffnungsflächen im oberen Drittel der Außenwände angeordnet sein, wenn sie insgesamt 2 % der Grundfläche betragen.
 Die Verschlüsse der Öffnungen müssen von einer jederzeit zugänglichen Stelle aus leicht von Hand bedient werden können. Die Verschlüsse benötigen keinen Verwendbarkeitsnachweis. Es müssen im unteren Raumdrittel Nachströmöffnungen in insgesamt gleicher Größe vorhanden sein; Verschlüsse müssen nicht zwingend automatisch öffnen, müssen aber leicht offenbar sein.
 - **Rauchableitung über Rauchabzugsgeräte**
 Bei Raumgrößen mit mehr als 1 000 m² sind die bauaufsichtlichen Anforderungen erfüllt, wenn mit pauschalen Vorgabewerten dimensionierte Rauchabzugsanlagen für die Rauchableitung verwendet werden. Hierfür sind dann qualifizierte Produkte entsprechend DIN EN 12101-3 (Maschinelle Rauchabzugsgeräte) [6] bzw. DIN EN 12101-2 (Natürliche Rauchabzugsgeräte) [7] und ggf. weitere Bauprodukte der europäisch harmonisierten Produktnormenreihe DIN EN 12101 zu verwenden.
 Für die Bemessung ist keine ingenieurmäßige Auslegung erforderlich, sondern es werden Werte bei maschinellen Rauchabzügen für Volumenströme (mindestens 10 000 m³/h je 400 m² Raumfläche) bzw. bei natürlichen Rauchabzügen für aerodynamisch wirksame Öffnungsflächen (mindestens 1,5 m² je 400 m² Raumfläche) angegeben.
- Es müssen im unteren Raumdrittel Nachströmöffnungen vorhanden sein, deren Gesamtfläche bei natürlichen Rauchabzugsanlagen in der Regel mindestens 12 m² beträgt und bei maschinellen Rauchabzügen eine Strömungsgeschwindigkeit von maximal 3 m/s im Öffnungsquerschnitt verursacht. Verschlüsse der Nachströmöffnungen müssen nur bei maschinellen Rauchabzugsanlagen automatisch öffnen.
- **Rauchableitung über die Lüftungsanlage in gesprinkelten Räumen**
 Die Anforderung an die Rauchableitung gilt in Räumen mit Sprinkleranlage als erfüllt, wenn die Lüftungsanlage ausschließlich als Abluftanlage betrieben werden kann.
 Dabei werden die gleichen Anforderungen an Volumenströme und die Nachströmöffnungen wie an nicht gesprinkelte Räume gestellt.
 Es wird in Kauf genommen, dass ein thermisch ausgelöstes Schließen der Absperrvorrichtungen nicht ausgeschlossen werden kann; Rauchauslöseeinrichtungen an den Brandschutzklappen sind dagegen nicht zulässig. Diese Möglichkeit stellt eine bauaufsichtliche Erleichterung dar und entspricht nicht einer Entrauchungsanlage.

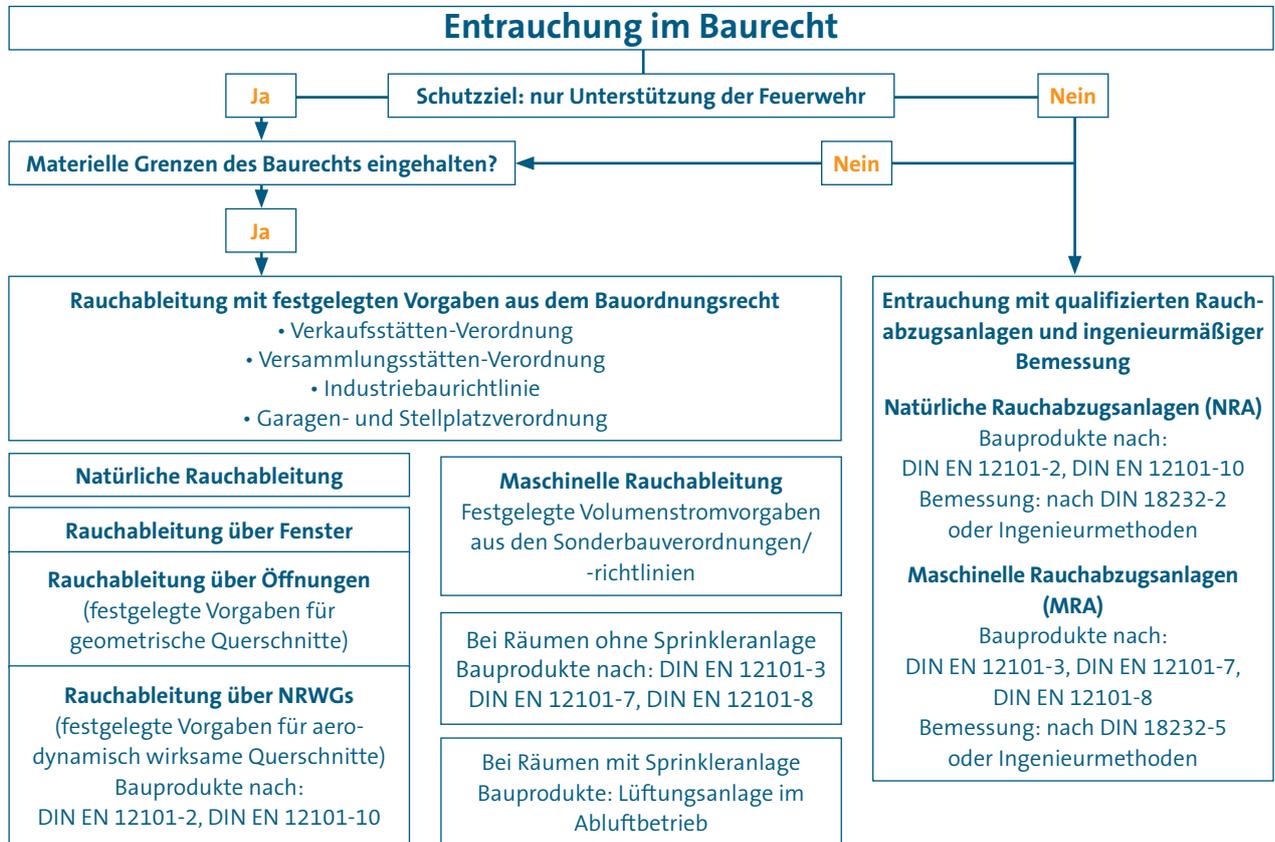
Rauchabzugsanlagen mit ingenieurmäßiger Bemessung

Werden die materiellen Grenzen des Bauordnungsrechts nicht eingehalten (Überschreitung von Rettungsweglängen, Personenzahlen oder Brandabschnittsgrößen), ist im Brandfall davon auszugehen, dass sich die Zeitspanne für die Selbstrettung aus dem vom Brand betroffenen Raum verlängert.

Eine qualifiziert bemessene Rauchabzugsanlage kann eine geeignete Kompensation dieser Abweichungen darstellen. Das Ziel einer solchen Entrauchungsanlage ist dann die Aufrechterhaltung einer raucharmen Schicht im unteren Raumbereich für den zu erwartenden Zeitraum der Selbst- und Fremdrettung (siehe Abschnitt 7.1). Bei

Bild 3

Zusammenhang zwischen den verschiedenen Schutzziele, der Einhaltung von baurechtlich vorgegebenen Grenzen und den für die Entrauchung zu beachtenden Regeln



Quelle: VDMA

Abweichungen von den bauordnungsrechtlichen Anforderungen ist auch die Feuerwehr in verstärktem Maße darauf angewiesen, dass die Angriffswege für Fremdrettungs- und Löschmaßnahmen rauchfrei bzw. raucharm sind. Auch vor diesem Hintergrund kann dann eine qualifizierte Bemessung notwendig werden, die die Aufrechterhaltung einer raucharmen Schicht zum Inhalt hat.

Die Dimensionierung von Rauchabzugsanlagen zur Rauchsichtung kann bei einfachen Raumgeometrien über die Normen DIN 18232-2 [8] und DIN 18232-5 [9] erfolgen; bei komplexer Raumstruktur sind geeignete Ingenieurmethoden anzuwenden, um das zu erreichende Entrauchungsziel nachzuweisen.

Rauchfreihaltung

Bestimmte Teile von Flucht- und Rettungswegen müssen so ausgebildet werden, dass Feuer und Rauch nicht eindringen dürfen.

Dies gilt insbesondere für Sicherheitstreppe-räume, Feuerwehraufzugsschächte und deren jeweilige Vorräume.

Für innenliegende Sicherheitstreppe-räume sowie Feuerwehraufzüge werden Druckbelüftungsanlagen gefordert, deren Aufgabe es ist, mithilfe einer kontrollierten Druckdifferenz den Eintritt von Rauch in die zu schützenden Bereiche zu verhindern (siehe Kapitel 9).

6. Gefährdungen durch Rauch

Rauchgase entstehen in großen Mengen z. B. bei der Verbrennung von Papier, Pappe, Holz, Kunststoff oder Schaumstoff in Möbeln. Die Rauchfreisetzung ist stark vom Material und den Verbrennungsbedingungen abhängig.

Je höher die Temperatur des Verbrennungsprozesses, desto größer sind die wirksamen Auftriebskräfte und das Rauchvolumen. Durch die Vermischung mit der Umgebungsluft erhöht sich das Rauchvolumen bzw. der Rauchvolumenstrom stetig weiter und kann sich schnell zu einer großen Gefahr in zweierlei Hinsicht entwickeln:

Sichtbehinderung

Rauch beeinträchtigt nach sehr kurzer Zeit massiv die Sicht. Personen, die der Gefahr entfliehen wollen, unterschätzen die Bedrohung durch Rauch, verlieren die Möglichkeit, sich zu orientieren und versuchen, durch die ihnen bekannten Wege, oder auch einen vermeintlich kürzeren Weg, die Ausgänge zu erreichen.

Toxizität und thermische Wirkung von Rauchgasen

Rauch enthält toxische Pyrolyseprodukte, die über die Lunge in den Organismus gelangen und die Lungenoberfläche schädigen. Das sind zum Beispiel Chlor-Verbindungen, die beim Brand von bestimmten Kunststoffen entstehen können. Die Reiz- und Ätzwirkung ruft tränende Augen und Reizhusten hervor. Das eingeatmete Rauchgas kann erstickende Wirkung haben und auch zu Verätzungen der Atemwege führen.

Zyanid-Verbindungen aus z. B. PU-Schäumen können bereits nach wenigen Atemzügen zum Tod führen. Kohlenmonoxid, ein farb-, geruch- und geschmackloses Gas, verdrängt am Transportmolekül Hämoglobin den Sauerstoff und verhindert, dass die roten Blutkörperchen Sauerstoff in die Organe transportieren können. Weitere Hinweise finden sich in Anhang A.

Das Einatmen von Brandrauch kann sehr schnell zu Erstickungsgefühlen, Verwirrheitszuständen, Schwindel, Orientierungslosigkeit bis hin zu Bewusstlosigkeit und Atemstillstand führen. Schädigungen durch Heißgase können sich einstellen, wenn Personen längere Zeit einer erhöhten Umgebungstemperatur ausgesetzt sind, die jedoch nicht zu direkten Verbrennungen führt. Entsprechende kritische Temperaturen hängen von der Luftfeuchtigkeit und der Expositionsdauer ab und reichen von 120 °C bei trockener Luft bis hin zu etwa 80 °C. Ursache für den thermischen Schock ist ein Anstieg der Körpertemperatur, wobei Werte über 40 °C zu Bewusstseinsbeeinträchtigungen und körperlichen Schäden, Körpertemperaturen über 42,5 °C unbehandelt innerhalb weniger Minuten sogar zum Tode führen können.

7. Prinzipien der Rauchableitung

Anlagen zur Rauchableitung können bei einem Gebäudebrand die Eigen- bzw. Fremdreitung von Personen und auch die Löscharbeiten der Feuerwehr unterstützen. In diesem Zusammenhang bestehen in der Regel besondere Anforderungen an die Bedingungen der Luft im Bereich der Rettungswege. Hierzu gehören in erster Linie eine atembare Luftqualität sowie Sichtbedingungen, die das Auffinden eines Rettungsweges ermöglichen, und Temperaturen in einem erträglichen Bereich.

Die Rauchableitung kann nach dem Prinzip der Schichtung oder nach dem Prinzip der Verdünnung erfolgen.

7.1 Rauchableitung durch Schichtung

Bei der Rauchableitung durch Schichtung wird der bei einem Brand entstehende Rauch im Deckenbereich des Raums abgeführt. Die Nachströmung von Zuluft erfolgt in Bodennähe.

Die sich einstellenden Raumströmungsverhältnisse sind vorwiegend geprägt durch die Wärmefreisetzung des Brandes. Hierbei formiert sich oberhalb des Brandherds ein Auftriebsstrahl, der neben dem konvektiv freigesetzten Wärmestrom auch die Verbrennungsprodukte in den oberen Raumbereich transportiert. Aufgrund des Einmischens von Umgebungsluft (Induktion) vergrößert sich dabei der im Auftriebsstrahl transportierte Volumenstrom mit zunehmender Lauflänge des Strahls. Durch den Transportvorgang bilden sich im Raum zwei übereinanderliegende Gasschichten, eine raucharme Schicht im unteren Raumbereich und eine darüber angeordnete deckennahe Rauchschicht. Die Höhe der Schichtgrenze (horizontal verlaufende Trennebene zwischen den beiden Schichten) ist dabei abhängig von der Größe des Volumenstroms, mit dem der Rauch aus der deckennahen Schicht abgeleitet wird.

Hinsichtlich der Zuluftführung ergibt sich für das Prinzip der Rauchableitung durch Schichtung die Bedingung, dass die Zuluft impulsarm, d. h. mit kleinen Zuluftgeschwindigkeiten (Anhaltswert $u_{zu} < 1 \text{ m/s}$) und bodennah in den Raum geführt wird. Bei hohen Zuluftgeschwindigkeiten wird die thermisch bedingte Raumströmung durch die Zuluftströmung überlagert, was zu Mischungseffekten der beiden Schichten und damit zum Verlust der Schichtung führt.

Ausgangsdaten für die Dimensionierung von Entrauchungsanlagen, die auf dem Prinzip der Schichtung beruhen, sind die Vorgabe der Höhe h_{sg} der raucharm zu haltenden Schicht (typischer Wert: $h_{sg} \approx 2,5 \text{ m}$) sowie die anzusetzende konvektive Wärmefreisetzungsrate des möglichen Brandes.

Die Bestimmung des Entrauchungsvolumenstroms, der aus einem Raum abzuführen ist, basiert auf einer Massenbilanz für die (obere) Rauchschicht (siehe Bild 4). Hiernach muss aus dieser Schicht der Rauchgas-Massenstrom abgeführt werden, der durch den Auftriebsstrahl in der Höhe der Schichtgrenze in die Rauchschicht hineintransportiert wird, d. h. es gilt

$$\dot{m}_{AB} = \dot{m}_{AS}(h_{sg}). \quad (1)$$

Auftriebsstrahlen lassen sich in zwei wesentliche Bereiche unterteilen, den Strahlformierungsbereich und den Ähnlichkeitsbereich.

Für die beiden Bereiche liegen Bestimmungsgleichungen für den im Strahl transportierten (Rauchgas-)Massenstrom vor. Dabei gilt für den Strahlformierungsbereich

$$\dot{m}_{AS}(z) = 0,189 \cdot \pi \cdot D_B \cdot z^{1,5} \quad (2)$$

mit

$\dot{m}_{AS}(z)$ im Auftriebsstrahl in der Höhe z transportierter Massenstrom in kg/s ,
 D_B Durchmesser des Brandherdes in m ,
 z vertikale Position im Strahl in m .

Bild 4

Zur Massenbilanz für die Rauchscht bei der Rauchableitung durch Schichtung

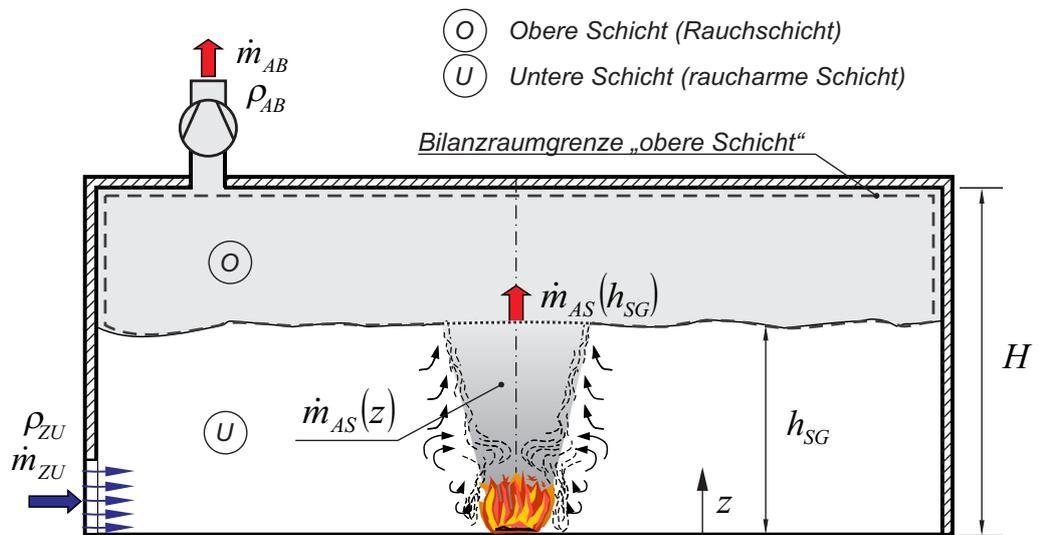
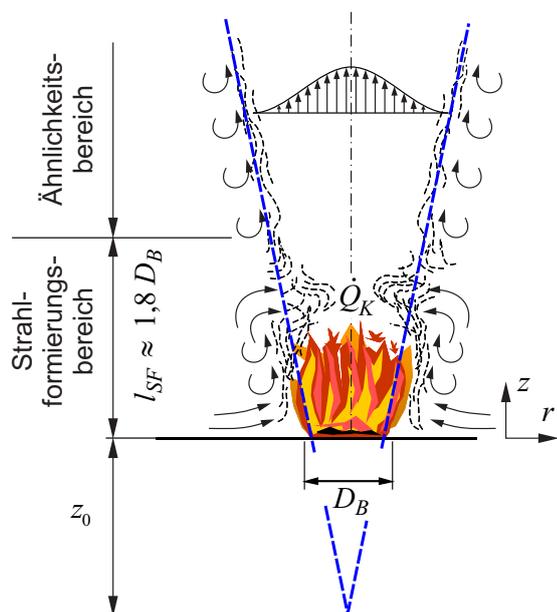


Bild 5

Geometrische Größen von (runden) Auftriebstrahlen



Quelle: VDMA

Im Ähnlichkeitsbereich, der etwa nach einer Strahllauflänge von $l_{sf} \approx 1,8 \cdot D_B$ beginnt, kann der im Strahl transportierte Massenstrom bestimmt werden mit

$$\dot{m}_{As}(z) = 0,071 \cdot \dot{Q}_K^{\frac{1}{3}} \cdot (z - z_0)^{\frac{5}{3}} \quad (3)$$

Hierin bedeuten

- $\dot{m}_{As}(z)$ im Auftriebsstrahl in der Höhe z transportierter Massenstrom in kg/s ,
- \dot{Q}_K konvektive Wärmefreisetzungsrate des Brandes in kW ,
- z vertikale Position im Strahl in m ,
- z_0 Abstand zwischen der Ebene der Wärmefreisetzung und dem sog. „virtuellen Ursprung“ in m (Bild 5).

Der „virtuelle Ursprung“ ist eine geometrische Hilfsgröße, die Abhängigkeiten zur Wärmefreisetzung des Brandes und zum Durchmesser des Brandherdes aufweist. Oft wird zur Bestimmung dieser Größe die empirische Beziehung

$$z_0 = -1,02 \cdot D_B + 0,083 \cdot \dot{Q}^{0,4} \quad (4)$$

verwendet. Hier bezeichnet die Größe \dot{Q} die Gesamt-Wärmefreisetzungsrate des Brandes, die sich aus einem konvektiven Anteil und einem Strahlungsanteil zusammensetzt. Die Aufteilung der Wärmefreisetzungsrate in Konvektion und Strahlung ist vorwiegend abhängig von dem bei der Verbrennung entstehenden Ruß – mit steigender Rußbildung erhöht sich in der Regel der Strahlungsanteil. Typische Werte für den Konvektionsanteil an der Wärmefreisetzung eines Brandes variieren zwischen 60 % und 80 %. Die konvektive Wärmefreisetzungsrate in Beziehung (3) folgt damit aus

$$\dot{Q}_K = (0,6 \dots 0,8) \cdot \dot{Q} \quad (5)$$

Im Gegensatz zu Beziehung (3) ist in Gleichung (2) die Abhängigkeit des im Auftriebsstrahl transportierten Massenstroms von der Wärmefreisetzungsrate nicht direkt erkennbar. In dieser (empirischen) Gleichung wird als Maß für die Größe eines Brandes der Umfang ($\pi \cdot D_B$) des Brandherdes verwendet. Ein Zusammenhang

beider Größen lässt sich über die (flächenbezogene) spezifische Wärmefreisetzungsrate herstellen. Bei typischen Bränden variiert dieser Wert im Bereich $\dot{q} = (300 \dots 600) kW/m^2$.

Der für die Rauchableitung erforderliche Massenstrom ergibt sich aus Gleichung (2) oder Gleichung (3) an der Stelle $z = h_{SG}$. Bei der Berechnung ist Gleichung (2) zu verwenden, wenn die angestrebte Höhe der raucharmen Schicht im Strahlformierungsbereich des Auftriebsstrahls liegt, d. h. wenn $h_{SG} < 1,8 \cdot D_B$ gilt. In davon abweichenden Fällen ist Gleichung (3) für die Auswertung heranzuziehen.

Ein Zusammenhang zwischen Massen- und Volumenströmen resultiert aus der Dichte ρ des Rauchgases,

$$\dot{V}_{AB} = \frac{\dot{m}_{AB}}{\rho_{AB}} \quad (6)$$

wobei hierfür im Allgemeinen Werte für die Dichte von Luft verwendet werden. Die Luftdichte ist eine temperaturabhängige Größe, die bestimmt werden kann aus

$$\rho_{AB} = \frac{353,18 \frac{K \cdot kg}{m^3}}{T_{AB}} \quad (7)$$

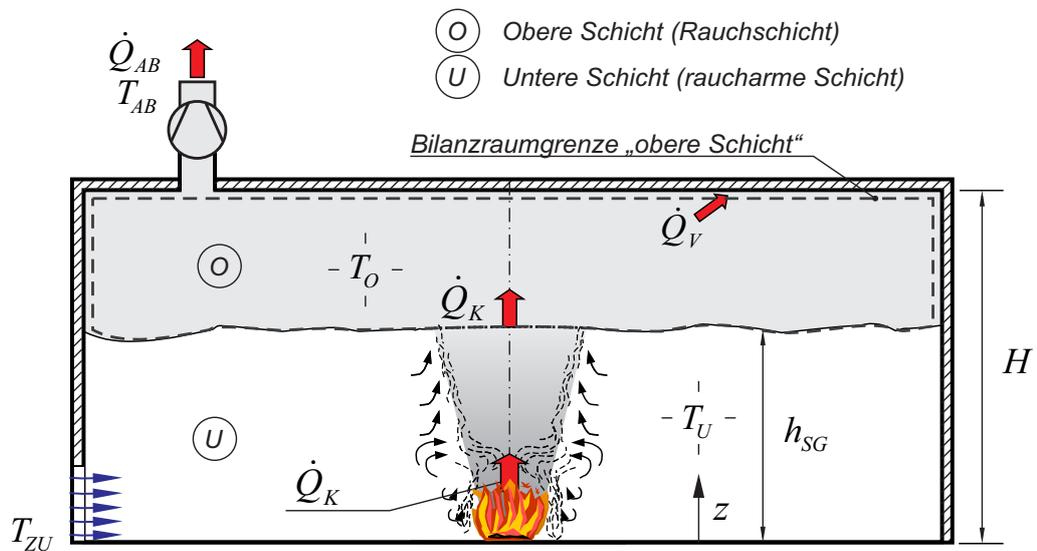
Die Temperatur T_{AB} des aus dem Raum abgeführten Rauchgases resultiert aus der Wärmebilanz für die (obere) Rauchschticht (Bild 6):

$$\dot{Q}_{AB} = \dot{Q}_K - \dot{Q}_V \quad (8)$$

mit

- \dot{Q}_{AB} aus der Rauchschticht abgeführter Wärmestrom in kW ,
- \dot{Q}_K durch den Auftriebsstrahl in die Rauchschticht konvektiv eingetragener Wärmestrom in kW ; entspricht der konvektiven Wärmefreisetzungsrate des Brandes, an die Bauteile (Decke, Wände, ...) die in der Rauchschticht liegen, abgegebener Wärmestrom in kW durch Konvektion und Strahlung.
- \dot{Q}_V

Bild 6
Zur Wärmebilanz für die Rauchscht bei der Rauchableitung durch Schichtung



Quelle: VDMA

In der Bilanz lässt sich der abgeführte Wärmestrom ersetzen durch die Energiegleichung

$$\dot{Q}_{AB} = \dot{m}_{AB} \cdot c_p \cdot (T_{AB} - T_{ZU}) \tag{9}$$

Dabei bedeuten

- \dot{m}_{AB} aus der Rauchscht abgeführter Massenstrom in kg/s aus Gleichung (1),
- c_p spezifische Wärmekapazität des Rauchgases; $c_p = 0,01 \text{ kJ}/(\text{kgK})$,
- T_{AB} Temperatur des aus dem Raum abgeführten Rauchgases in K,
- T_{ZU} Temperatur der in den Raum einströmenden Zuluft in K.

Wärmeströme an Bauteilen besitzen in der Regel einen stark instationären Charakter. Für eine grobe Abschätzung dieses Wertes kann

$$\dot{Q}_V \approx 0,3 \cdot \dot{Q}_K \tag{10}$$

verwendet werden.

Das Einsetzen der Gleichungen (9) und (10) in die Wärmebilanz (8) liefert nach dem Umstellen für die Temperatur T_{AB} des aus dem Raum abgeführten Rauchgases

$$T_{AB} = \frac{0,7 \cdot \dot{Q}_K}{\dot{m}_{AB} \cdot c_p} \cdot T_{ZU} \tag{11}$$

Das Zusammenführen der Gleichungen (6), (7) und (11) liefert schließlich für den Entrauchungsvolumenstrom

$$\dot{V}_{AB} = \frac{\dot{m}_{AB}}{353,18 \frac{\text{K kg}}{\text{m}^3}} \cdot \left(\frac{0,7 \cdot \dot{Q}_K}{\dot{m}_{AB} \cdot c_p} + T_{ZU} \right) \tag{12}$$

Bild 7

Erforderlicher Entrauchungsvolumenstrom bei der Rauchableitung durch Schichtung; Höhe der raucharmen Schicht: $h_{SG} = 2,5\text{ m}$, Temperatur der zuströmenden Luft: $T_{ZU} = 293,15\text{ K}$

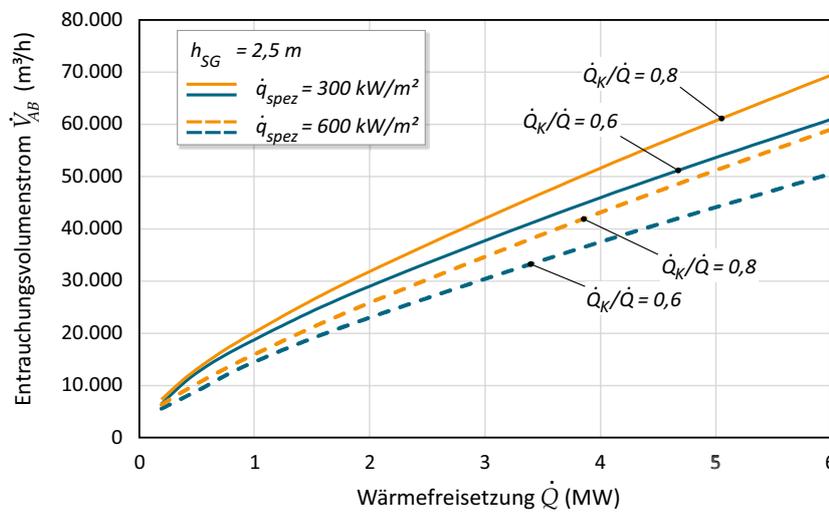
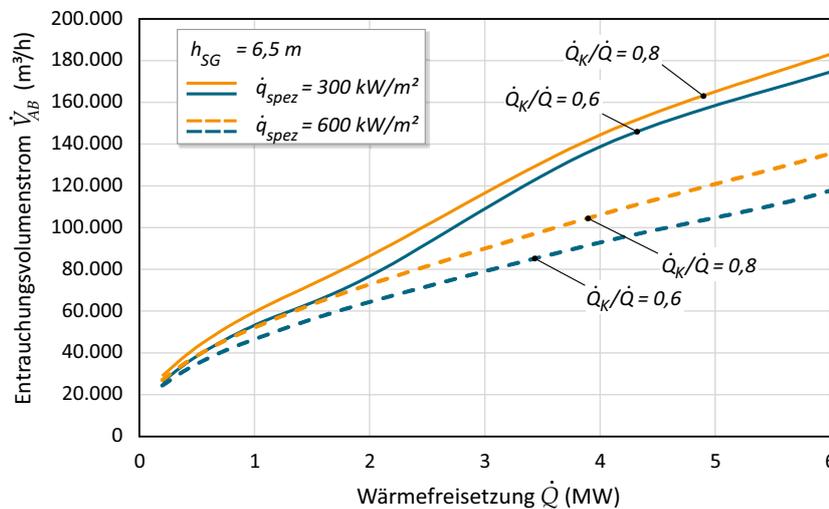


Bild 8

Erforderlicher Entrauchungsvolumenstrom bei der Rauchableitung durch Schichtung; Höhe der raucharmen Schicht: $h_{SG} = 6,5\text{ m}$, Temperatur der zuströmenden Luft: $T_{ZU} = 293,15\text{ K}$



Quelle: VDMA

Die Bilder 7 und 8 liefern die Auswertung des voranstehenden Gleichungsapparates. Dargestellt sind die erforderlichen Entrauchungsvolumenströme in Abhängigkeit der (Gesamt-)Wärmefreisetzungsrate für raucharme Schichthöhen von 2,5 m (Bild 7) und 6,5 m (Bild 8). Diagramme für Entrauchungsvolumenströme bei größeren Wärmefreisetzungsraten finden sich im Anhang B.

Die Rauchableitung nach dem Prinzip der Schichtung unterstützt insbesondere auch Personen im Rahmen der Eigenrettung durch eine für die Atmung vertretbare Luftqualität und ausreichenden Sichtverhältnissen. Um auch die thermische Belastung dieser Personen infolge der Wärmestrahlung aus der Rauchschicht auf ein erträgliches Maß zu beschränken, sollte die Temperatur $T_{AB,grenz}$ dieser Schicht auf einen Wert von ca. 200 °C beschränkt bleiben [10]. In diesem Fall folgt der abzuführende Massenstrom aus

$$\dot{m}_{AB} = \frac{0,7 \cdot \dot{Q}_K}{c_p \cdot (T_{AB,grenz} - T_{ZU})}, \tag{13}$$

für den abzuführenden Volumenstrom resultiert

$$\dot{V}_{AB} = \frac{0,7 \cdot \dot{Q}_K \cdot T_{AB,grenz}}{353,18 \frac{K \cdot kg}{m^3} \cdot c_p \cdot (T_{AB,grenz} - T_{ZU})}. \tag{14}$$

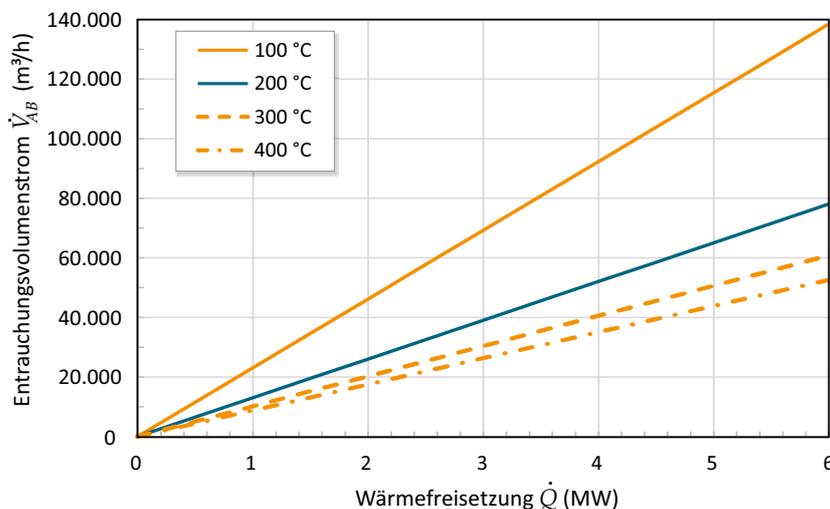
Bild 9 zeigt in diesem Zusammenhang den zur Begrenzung der Rauchschichttemperatur erforderlichen Entrauchungsvolumenstrom in Abhängigkeit der (Gesamt-)Wärmefreisetzungsrate.

Bei der Auslegung einer Entrauchungsanlage, die nach dem Prinzip der Schichtung arbeitet, sind prinzipiell beide Volumenströme, nämlich der, der sich aus dem Auftriebsstrahlmassenstrom und der, der sich aus der Temperaturbedingung für die Rauchschicht ergibt, zu ermitteln.

Bei maschinellen Entrauchungsanlagen muss der Entrauchungsventilator den größeren der beiden Volumenströme fördern.

Bild 9

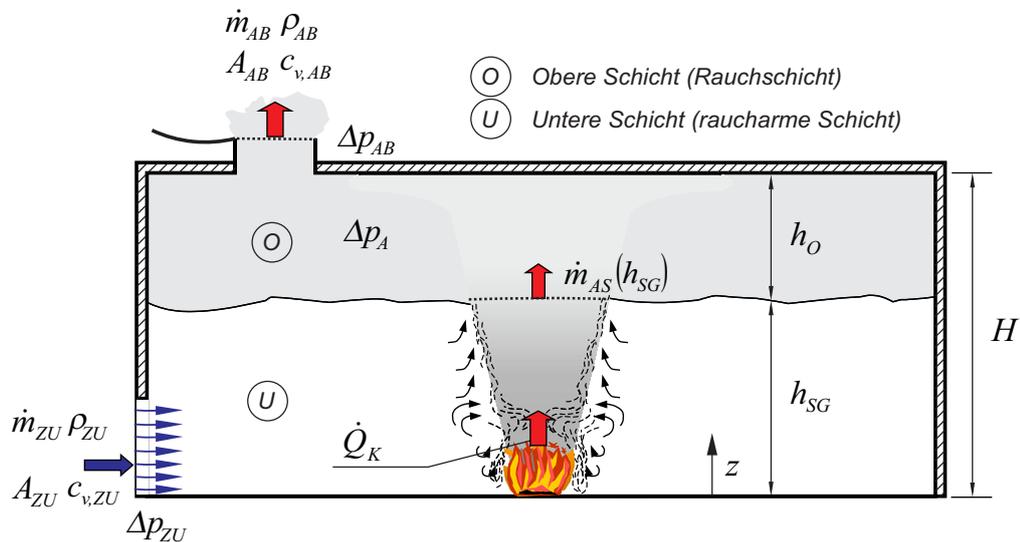
Erforderlicher Entrauchungsvolumenstrom zur Begrenzung der Rauchgas-temperatur (berechnet mit $\dot{Q}_K / (\dot{Q} = 0,7)$ und $\dot{Q}_V / \dot{Q}_K = 0,3$ und $T_{ZU} = 293,15 \text{ K}$)



Quelle: VDMA

Bild 10

Relevante Größen bei der Rauchableitung durch Schichtung mittels NRA



Quelle: VDMA

Im Gegensatz zu maschinellen Entrauchungsanlagen arbeiten Natürliche Rauch- und Wärmeabzugsanlagen ohne Ventilator. Der Antrieb für die Förderung des Entrauchungsvolumenstroms resultiert aus den thermischen Auftriebskräften infolge der erhöhten Temperatur in der Rauchschicht.

Der hierbei entstehende Auftriebsdruck ist abhängig von der (temperaturabhängigen) Dichtedifferenz zwischen dem Rauchgas in der Rauchschicht und der Umgebungsluft sowie von der Dicke der Rauchschicht. Für ihn gilt

$$\Delta p_A = (\rho_{ZU} - \rho_{AB}) \cdot g \cdot h_o \tag{15}$$

mit

- ρ_{ZU} Dichte der Umgebungs- bzw. Zuluft in kg/m^3 ,
- ρ_{AB} Dichte des Rauchgases in der Rauchschicht in kg/m^3 , entspricht der Dichte des aus dem Raum abgeführten Rauchgases,
- g Fallbeschleunigung in m/s^2 : $g = 9,81 m/s^2$,
- h_o Dicke bzw. Höhe der (oberen) Rauchschicht in m ; $h_o = H - h_{SG}$ gem. Bild 10.

Neben der Druckerhöhung durch den thermischen Auftrieb entstehen bei der Durchströmung des Raums auch Druckverluste, insbesondere an den Zu- und Abströmöffnungen. Ihre Höhe hängt von den Durchströmgeschwindigkeiten und der geometrischen Form der Öffnungen ab; für sie gilt

$$\Delta p_{ZU} = \zeta_{ZU} \cdot \frac{\rho_{ZU}}{2} \cdot u_{ZU}^2, \tag{16}$$

bzw.

$$\Delta p_{AB} = \zeta_{AB} \cdot \frac{\rho_{AB}}{2} \cdot u_{AB}^2, \tag{17}$$

mit

- ζ_{ZU} (dimensionsloser) Druckverlustbeiwert der Zuströmöffnung,
- ρ_{ZU} Dichte der Umgebungs- bzw. Zuluft in kg/m^3 ,
- u_{ZU} (charakteristische) Einströmgeschwindigkeit der Zuströmöffnung in m/s ,
- ζ_{AB} (dimensionsloser) Druckverlustbeiwert der Abströmöffnung,
- ρ_{AB} Dichte des abströmenden Rauchgases in kg/m^3 , entspricht der Dichte des Rauchgases in der Rauchschicht,
- u_{AB} (charakteristische) Abströmgeschwindigkeit der Abströmöffnung in m/s .

Druckverlustbeiwerte werden in der Regel experimentell unter Zugrundelegung einer charakteristischen Strömungsgeschwindigkeit – z. B. Geschwindigkeit im engsten Querschnitt, Einströmgeschwindigkeit oder Abströmgeschwindigkeit – bestimmt und in Katalogen zusammengestellt. Bei Elementen, die für den Einsatz in Wand oder Dachflächen von Gebäuden vorgesehen sind, wird als charakteristische Geschwindigkeit üblicherweise die auf den lichten Querschnitt der Öffnung bezogene Anströmgeschwindigkeit verwendet.

Bei Ein- oder Abströmöffnungen von Gebäuden wird für die Berechnung des diese Gebäude durchströmenden Volumen- bzw. Massenstroms statt des Druckverlustbeiwertes oft der sogenannte Durchflussbeiwert c_v benutzt. Druckverlust- und Durchflussbeiwert hängen zusammen über

$$c_v = \frac{1}{\sqrt{\zeta}} \quad (18)$$

Der sich einstellende Massenstrom, der einen Raum mit Öffnungsflächen durchströmt, ergibt sich aus der Druckbilanz

$$\Delta p = \Delta p_{ZU} + \Delta p_{AB}, \quad (19)$$

d. h., wenn die durch thermische Auftriebskräfte verursachte Druckerhöhung gerade den Druckverlusten, die bei der Durchströmung der Öffnungsflächen entstehen, entspricht.

Das Einsetzen der Gleichungen (15), (16), (17) und (18) in diese Druckbilanz liefert

$$(\rho_{ZU} = \rho_{AB}) \cdot g \cdot h_o = \frac{1}{c_{v,ZU}^2} \cdot \frac{\rho_{ZU}}{2} \cdot u_{ZU}^2 + \frac{1}{c_{v,AB}^2} \cdot \frac{\rho_{AB}}{2} \cdot u_{AB}^2 \quad (20)$$

Aus dem Idealen Gasgesetz folgt, dass das Produkt aus Dichte und Temperatur einen konstanten Wert annimmt, d. h. $\rho_{AB} \cdot T_{AB} = \rho_{ZU} \cdot T_{ZU} = const$ (vgl. auch Gleichung (7)). Damit lässt sich die Dichte der abströmenden Rauchgase bestimmen mit

$$\rho_{AB} = \frac{\rho_{ZU} \cdot T_{ZU}}{T_{AB}} \quad (21)$$

und das Einsetzen in die Druckbilanz (20) liefert

$$\left(\rho_{ZU} - \frac{\rho_{ZU} \cdot T_{ZU}}{T_{AB}} \right) \cdot g \cdot h_o = \frac{1}{c_{v,ZU}^2} \cdot \frac{\rho_{ZU}}{2} \cdot u_{ZU}^2 + \frac{1}{c_{v,AB}^2} \cdot \frac{\rho_{ZU}}{2} \cdot \frac{T_{ZU}}{T_{AB}} \cdot u_{AB}^2 \quad (22)$$

Nach einer geringen Umformung kann diese Beziehung auch ausgedrückt werden durch

$$2 \cdot \frac{\Delta \vartheta}{T_{AB}} \cdot g \cdot h_o = \frac{1}{c_{v,ZU}^2} \cdot \frac{\rho_{ZU}}{2} \cdot u_{ZU}^2 + \frac{1}{c_{v,AB}^2} \cdot \frac{\rho_{ZU}}{2} \cdot \frac{T_{ZU}}{T_{AB}} \cdot u_{AB}^2 \quad (23)$$

wobei für die eingeführte Temperaturdifferenz $\Delta \vartheta = T_{AB} - T_{ZU}$ gilt.

Das Ziel bei der Auswertung dieser Gleichung ist zunächst die Bestimmung der Größe der Abströmfläche A_{AB} (gem. Bild 10), die notwendig ist, um den erforderlichen Entrauchungsvolumenstrom zur Wahrung einer festgelegten Höhe für die raucharme Schicht abzuführen. Der Volumen- bzw. Massenstrom ergibt sich dabei analog zu den obigen Ausführungen in Bezug auf die maschinelle Rauchableitung aus der Massenbilanz für die Rauchsicht.

Einen Zusammenhang zwischen dem Massenstrom und der erforderlichen Abströmfläche liefert die Kontinuitätsgleichung in der Form

$$\dot{m}_{AB} = \rho_{AB} \cdot u_{AB} \cdot A_{AB} \quad (24)$$

Damit kann die Abströmgeschwindigkeit u_{AB} in der Druckbilanz ersetzt werden durch

$$u_{AB} = \frac{\dot{m}_{AB}}{\rho_{AB} \cdot A_{AB}} \quad (25)$$

bzw., unter Verwendung von Gleichung (7),

$$u_{AB} = \frac{\dot{m}_{AB} \cdot T_{AB}}{353,18 \frac{K \cdot kg}{m^3} \cdot A_{AB}} \quad (26)$$

Das Einführen dieses Zusammenhangs in die Druckbilanz (23) führt auf

$$2 \cdot \frac{\Delta\vartheta}{T_{AB}} \cdot g \cdot h_o = \frac{1}{c_{v,ZU}^2} \cdot u_{ZU}^2 + \frac{1}{c_{v,AB}^2} \cdot \frac{T_{ZU}}{T_{AB}} \cdot \left(\frac{\dot{m}_{AB} \cdot T_{AB}}{353,18 \frac{K \cdot kg}{m^3} \cdot A_{AB}} \right)^2 \quad (27)$$

und das Auflösen nach der gesuchten Abströmfläche liefert

$$A_{AB} = \frac{1}{c_{v,AB}} \cdot \frac{\dot{m}_{AB}}{353,18 \frac{K \cdot kg}{m^3}} \cdot \sqrt{\frac{T_{ZU} \cdot T_{AB}}{2 \cdot \frac{\Delta\vartheta}{T_{AB}} \cdot g \cdot h_o - \frac{1}{c_{v,ZU}^2} \cdot u_{ZU}^2}} \quad (28)$$

Bei der Fläche A_{AB} handelt es sich um eine „geometrische“ Fläche, in der Regel beschreibt sie das „Loch in der Decke“. Bei der Auslegung von natürlich wirkenden Rauchabzugsanlagen wird oft auch die sog. aerodynamische Fläche $A_{AB,ae}$ angegeben. Beide Flächen stehen über den Durchflussbeiwert in Verbindung in der Form

$$A_{AB,ae} = A_{AB} \cdot c_{v,AB}, \quad (29)$$

so dass für Gleichung (28) auch

$$A_{AB,ae} = \frac{\dot{m}_{AB}}{353,18 \frac{K \cdot kg}{m^3}} \cdot \sqrt{\frac{T_{ZU} \cdot T_{AB}}{2 \cdot \frac{\Delta\vartheta}{T_{AB}} \cdot g \cdot h_o - \frac{1}{c_{v,ZU}^2} \cdot u_{ZU}^2}} \quad (30)$$

geschrieben werden kann.

Durchflussbeiwerte von Natürlichen Rauch- und Wärmeabzugsgeräten (NRWG) werden experimentell gem. DIN EN 12101-2 [7] bestimmt und durch die Hersteller in den technischen Unterlagen der Geräte angegeben.

Durchflussbeiwerte von Zuströmöffnungen nehmen Werte bis zu $c_{v,ZU} \approx 0,65$ an. Angaben finden sich z. B. in der VDI 6019 Blatt 2 [11].

Die Ansaugstellen bei maschineller Rauchableitung bzw. die Abströmöffnungen bei natürlicher Rauchableitung (beide Begriffe werden

nachfolgend als „Abströmstelle“ bezeichnet) sollen möglichst deckennah, zumindest aber im Bereich der sich einstellenden (oberen) Rauchschicht angeordnet sein. In diesem Zusammenhang ist auch die für die Rauchableitung erforderliche Anzahl dieser Abströmstellen zu ermitteln. Diese Anzahl ist abhängig vom abzuführenden (Gesamt-) Volumenstrom, von der Temperaturdifferenz zwischen der Rauchschicht und der raucharmen Schicht sowie dem Abstand zwischen der Unterkante der Abströmstelle und der Schichtgrenze zwischen der Rauchschicht und der raucharmen Schicht.

Der über eine einzelne Abströmstelle maximal abführbare Volumenstrom kann bestimmt werden aus [12]

$$\dot{V}_{AB,i,max} = 4,16 \cdot \gamma \cdot \Delta h_o^{2,5} \cdot \sqrt{\frac{T_o - T_u}{T_u}} \quad (31)$$

mit

$\dot{V}_{AB,i,max}$ maximal über die i-te Abströmstelle abführbarer Volumenstrom in m^3/s ,
 γ dimensionsloser Positionsfaktor der Abströmstelle mit

$$\gamma = \begin{cases} 1,0 & \text{für } \Delta r \geq D_{AB} \\ 0,5 & \text{für } \Delta r < D_{AB} \end{cases}$$

Δr Abstand zwischen (der Achse) der Abströmstelle und der Wand in m ,
 D_{AB} Durchmesser der Abströmstelle in m ,
 Δh_o Abstand zwischen dem untersten Punkt der Abströmstelle und der Schichtgrenze in m (vgl. Bild 11),

T_o mittlere Rauchschichttemperatur in K ,
 T_u Temperatur der raucharmen Schicht in K .

Für den Durchmesser D_{AB} einer Abströmstelle gilt außerdem die Nebenbedingung

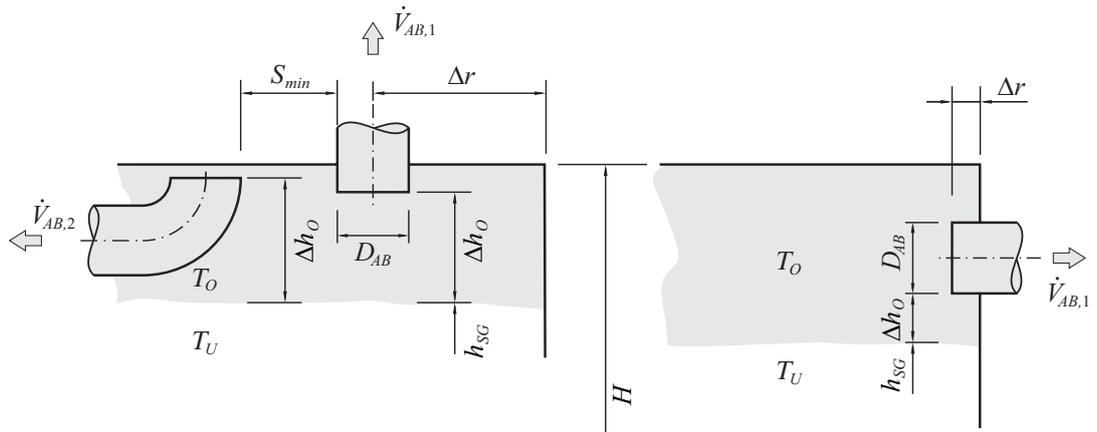
$$D_{AB} \leq \frac{\Delta h_o}{2}. \quad (32)$$

Die Anzahl n der notwendigen Abströmstellen ergibt sich nach Auswertung der Beziehung (31) aus

$$n = \left\lceil \frac{\dot{V}_{AB}}{\dot{V}_{AB,i,max}} \right\rceil. \quad (33)$$

Bild 11

Relevante Größen zur Bestimmung der Anzahl von Abströmstellen für die Rauchableitung durch Schichtung



Quelle: VDMA

Abströmstellen sollen möglichst gleichmäßig über den Rauchabschnitt verteilt werden; in jedem Fall gilt für den Mindestabstand zwischen zwei Abströmstellen (vgl. Bild 11)

$$S_{min} = 0,9 \cdot \sqrt{\dot{V}_{AB,i}} \tag{34}$$

mit

S_{min} Mindestabstand zwischen zwei Abströmen in m,

$\dot{V}_{AB,i}$ Volumenstrom in m^3/s , der über eine Abströmstelle abgeführt wird; sind die Volumenströme der beiden betrachteten Abströmstellen unterschiedlich, so ist der jeweils größere Wert zu wählen.

Bei der Rauchableitung durch Schichtung kommt der Zuluft eine besondere Bedeutung zu. Sie muss impulsarm und bodennah im Bereich der raucharmen Schicht nachgeführt werden. Die Zuluftgeschwindigkeit soll einen Wert von $u_{ZU} = 1 \text{ m/s}$ nicht überschreiten. Damit ergibt sich die notwendige Zuluftfläche bei einer maschinellen Entrauchung aus

$$A_{ZU} = \frac{\dot{V}_{AB}}{u_{ZU}} \tag{35}$$

Für die natürliche Entrauchung gilt

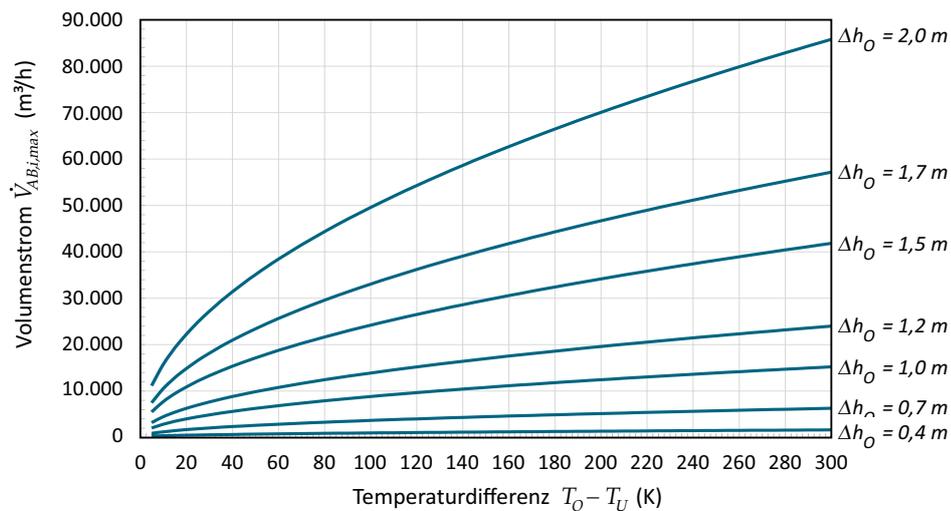
$$A_{ZU} = \frac{\dot{V}_{AB}}{u_{ZU}} \cdot \frac{\rho_{AB}}{\rho_{ZU}} \tag{36}$$

Grundsätzlich ist ein aufwärts gerichtetes Einströmen der Zuluft (z. B. über in Richtung des Raums gekippte Fensterflügel) nach Möglichkeit zu vermeiden, um der Gefahr des Einmischens in die Rauchschicht vorzubeugen.

Im Allgemeinen kann die Zuluftführung über (Außen-) Wandöffnungen (natürliche Zuluftführung) oder maschinell über Lüftungsanlagen erfolgen. Auch Zuluftdurchlässe von Lüftungsanlagen müssen dabei im Bereich der raucharmen Schicht angeordnet sein. Die Zuluftführung muss automatisch bei Einschalten der Maschinellen Entrauchungsanlage erfolgen. Dies ist insbesondere bei maschinellen Anlagen zu beachten, da ansonsten Unterdrücke entstehen können, die das Öffnen von Türen erschweren. Sofern Luftdurchlässe innerhalb der Rauchschicht angeordnet sind, können sie nicht für die

Bild 12

Über eine einzelne Abströmstelle maximal abführbarer Volumenstrom (berechnet nach Gleichung (31) mit $T_U = 293,15 \text{ K}$ und $\gamma = 1$)



Quelle: VDMA

Zuluftführung verwendet werden; die Lüftungsanlage ist in diesem Fall unverzüglich abzuschalten.

Besondere Beachtung ist der Zuluftführung bei der Projektierung einer natürlich wirkenden Rauchableitung klimatisierter Räume zu schenken. Bei derartigen Räumen ist regelmäßig im Sommer davon auszugehen, dass die Raumlufttemperatur kleiner ist als die Außenlufttemperatur. In diesen Fällen besteht bei natürlicher Zuluftführung die Gefahr der „Strömungsumkehr“. Dabei strömt die Außenluft über die (deckennahen) Öffnungen in den Raum ein und die Raumluft über die bodennahen Öffnungen ab. Eine Rauchableitung durch Schichtung ist unter diesen Bedingungen nicht möglich.

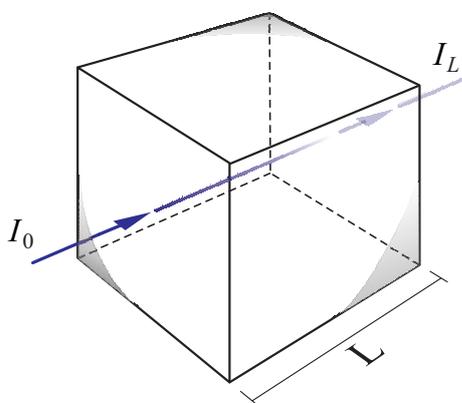
7.2 Rauchableitung durch Verdünnung

Bei der Rauchableitung durch Verdünnung wird grundsätzlich akzeptiert, dass sich der bei einem Brand entstehende Rauch (homogen) innerhalb des gesamten Raumes ausbreitet. Bei der Dimensionierung des Entrauchungsvolumenstroms wird dabei das Ziel verfolgt, das Rauchgas in einem Maß zu verdünnen, so dass für Personen Sichtweiten aufrechterhalten bleiben, die das Erkennen von Objekten (Rettungswegzeichen) ermöglichen.

Die Einschränkung der Sicht für Personen in einem verrauchten Raum wird durch die Absorption und Streuung des Lichts an Partikeln und Aerosolen hervorgerufen. Die Abnahme der Intensität eines Lichtstrahls, der ein Luft-Rauch-Gemisch der Dicke L passiert (siehe Bild 13), ist beschreibbar durch das Bouguer'sche Gesetz (auch bekannt unter Bouguer-Lambert- oder Bouguer-Lambert-Beer-Gesetz)

Bild 13

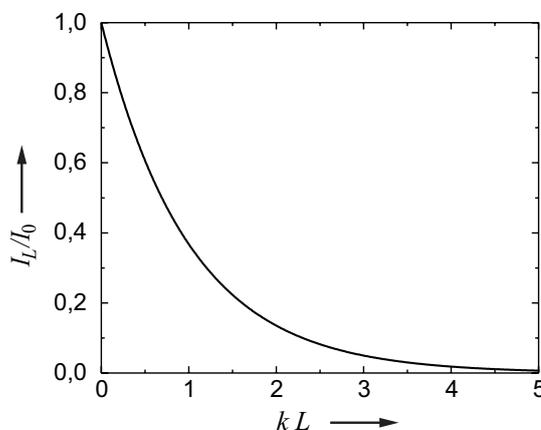
Zur Lichtschwächung beim Durchgang durch ein (absorbierendes) Medium (nach [13])



Quelle: VDMA

Bild 14

Zur Lichtschwächung beim Durchgang durch ein (absorbierendes) Medium – Funktionsverlauf von Gleichung (37) (nach [13])



$$\frac{I_L}{I_0} = e^{-k \cdot L} \tag{37}$$

mit

- I_0 Intensität des in das Medium eintretenden Lichtstrahls in W/m^2 ,
- I_L Intensität des Lichtstrahls in W/m^2 nach dem Strahlweg L ,
- k Extinktionskoeffizient in m^{-1} ,
- L Strahlweg in m .

Für den Extinktionskoeffizienten k gilt dabei:

$$k = \sigma_s \cdot c_R \tag{38}$$

mit

- σ_s spezifischer Extinktionskoeffizient in m^2/g ,
- c_R (Ruß-) Konzentration in g/m^3 .

Der spezifische Extinktionskoeffizient ist eine Stoffeigenschaft des bei der Verbrennung eines Materials gebildeten Rußes. Er ist im Wesentlichen abhängig von der geometrischen Form der Rußpartikel und vom Verbrennungsverlauf, insbesondere beeinflusst durch das Verbrennungsluftverhältnis. Messwerte für σ_s , die an verschiedenen Materialproben gewonnen wurden, finden sich in [14] und sind in Bild 15 zusammengefasst wiedergegeben. Im Mittel resultiert ein Wert von $\sigma_s \approx 8,7 m^2/g$.

Die Bestimmung der sich im Brandfall einstellenden Rußkonzentration c_R innerhalb eines Raums erfordert die Kenntnis der bei der Verbrennung gebildeten Rußmasse. Derartige Daten liegen in Form sogenannter Rußausbeutefaktoren y_R vor, die experimentell für verschiedene Materialien bestimmt wurden (vgl. Tabelle 2). Mit Hilfe dieser Faktoren folgt der im Brandfall resultierende Rußmassenstrom aus

Tabelle 1

Spezifischer Extinktionskoeffizient σ_s verschiedener Materialproben (Messwerte nach [14], Auszug)

Material (Brennstoff)	σ_s (m^2/g)	
Polystyrol (PS)	9,6	$\pm 1,0$
Polyurethan (PU)	7,4	
Polypropylen (PP)	8,8	$\pm 0,9$
Acrylglas (PMMA)	7,9	$\pm 2,4$
Polyvinylchlorid (PVC)	9,0	$\pm 0,9$
Polyethylen (PE)	8,8	$\pm 2,5$
Gummi	10,1	
Benzin	11,2	
Diesel	10,3	

Tabelle 2

Rußausbeutefaktoren y_R verschiedener Materialien bei Verbrennung mit Luftüberschuss (Messwerte nach [15], Auszug)

Material (Brennstoff)	Rußausbeute y_R (g/kg)
Holz	$1,2 \cdot 10^{-3}$
Polyurethan	$3,7 \cdot 10^{-3} \dots 8,5 \cdot 10^{-3}$
Mineralöl	$2,34 \cdot 10^{-3}$
Silikon-Gummi	$3,6 \cdot 10^{-3}$
PVC	$10,5 \cdot 10^{-3}$
PE	$1,38 \cdot 10^{-3}$

Quelle: VDMA

Bild 15

An unterschiedlichen Materialproben gewonnene Messwerte für den spezifischen Extinktionskoeffizienten σ_s nach [14]

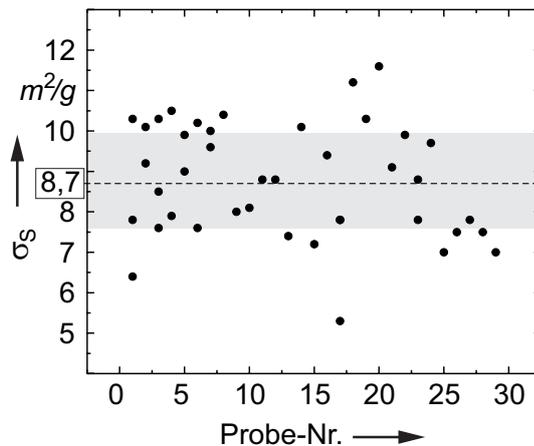


Tabelle 3

Zur Erkennbarkeit unterschiedliche Objekttypen erforderliche Werte für C_{sk}

Zu erkennendes Objekt	C_{sk}
Wände, Stützen, etc.	≈ 2
reflektierende Rettungswegzeichen	2 ... 4
selbstleuchtende Rettungswegzeichen	5 ... 10

Quelle: VDMA

$$\dot{m}_R = \dot{Q} \cdot \psi_R \tag{39}$$

mit

\dot{Q} (Gesamt-)Wärmefreisetzungsrate des Brandes in kW,
 ψ_R Rußausbeute g/kJ.

Die Selbstrettung von Personen, die sich in einem verrauchten Raum aufhalten, ist dann möglich, wenn die vorhandene Sichtweite der Länge des Rettungsweges entspricht; nur dann können sie

den Ausgang in einen sicheren Bereich auffinden. In diesem Zusammenhang stellt die Sichtweite die größtmögliche Entfernung dar, in der ein Objekt für eine Person durch den Rauch hindurch erkennbar ist. Untersuchungen (vgl. [16]) zeigen, dass diese Erkennbarkeit für $k \leq 0,25 \text{ m}^{-1}$ dann gegeben ist, wenn das Produkt aus Sichtweite S und Extinktionskoeffizient k einen konstanten Wert annimmt, d. h.

$$C_{sk} = S \cdot k \text{ für } k \leq 0,25 \text{ m}^{-1}. \tag{40}$$

Erforderliche Werte für C_{sk} , die das Erkennen unterschiedlicher Objekttypen zulassen, finden sich in Tabelle 3. Sie sind im Wesentlichen abhängig von der Helligkeit des betrachteten Objektes, der Hintergrundhelligkeit des Raums und der Eigenschaft des Rauchs, Licht zu absorbieren bzw. zu streuen.

Die Zunahme des Extinktionskoeffizienten – sie ist gleichbedeutend mit einer wachsenden Rußkonzentration (vgl. Gleichung (38)) – führt zu Reizungen der Augen und beeinträchtigt damit das Sehvermögen. Hieraus resultiert ein zusätzlicher Einfluss auf die Größe C_{sk} , die nach [16] approximiert werden kann durch

$$C_{sk} = S \cdot k \cdot \frac{1}{0,133 - 1,47 \log(k)} \quad \text{für } > 0,25 \text{ m}^{-1}. \quad (41)$$

Bild 16 liefert die Auswertung der Gleichungen (40) und (41) in der Form $k = f(S, C_{sk})$ für die in Tabelle 3 aufgelisteten Objekttypen. Aus dieser Grafik kann der Extinktionskoeffizient abgelesen werden, der erforderlich ist, damit in der Sichtweite S entsprechende Gegenstände (charakterisiert durch den Wert C_{sk}) erkennbar bleiben. Im Rahmen der Dimensionierung von Anlagen zur Rauchableitung, die auf dem Prinzip der Verdünnung beruhen, ist die Sichtweite dabei i.d.R. mit der maximal zulässigen Rettungsweglänge gleichzusetzen.

Mit Kenntnis des Extinktionskoeffizienten k kann aus Gleichung (38) die für den Erhalt ausreichender Sichtbedingungen zulässige Rußkonzentration c_R bestimmt werden. Diese Konzentration ist durch den über die Anlage zur Rauchableitung zu fördernden Volumenstrom beeinflussbar.

Grundsätzlich kann die in einem Raum vorherrschende Rußkonzentration c_R während eines Brandes aus der Ruß-Massenbilanz

$$\frac{d}{dt} (V_R \cdot c_R) = \dot{m}_R + \dot{V}_{ZU} \cdot c_{ZU} - \dot{V}_{AB} \cdot c_{AB} \quad (42)$$

gewonnen werden. Dabei ist

V_R	Raumvolumen in m^3 ,
c_R	(Ruß-) Konzentration im Raum in g/m^3 ,
\dot{m}_R	Rußmassenstrom in g/s aus der Verbrennung,
\dot{V}_{ZU}	Zuluftvolumenstrom in m^3/s ,
c_{ZU}	(Ruß-) Konzentration in der Zuluft in g/m^3 ,
\dot{V}_{AB}	Abluft- bzw. Entrauchungsvolumenstrom in m^3/s ,
c_{AB}	(Ruß-) Konzentration in der Abluft in g/m^3 .

Der Rußmassenstrom ist gemäß Gleichung (39) eine von der Wärmefreisetzungsrate des betrachteten Brandes abhängige Größe. Den zeitlichen Verlauf der Wärmefreisetzungsrate für einen typischen Brand zeigt Bild 18. Er ist beschreibbar durch

$$\dot{Q} = \alpha \cdot t^2 \quad \text{für } 0 \leq t < t^*, \quad (43)$$

$$\dot{Q} = \dot{Q}_{max} \quad \text{für } t \geq t^*, \quad (44)$$

mit

α	Brandintensitätskoeffizient in kW/s^2 ,
t	Zeit in s ,
t^*	Zeitpunkt, ab dem eine konstante Wärmefreisetzungsrate des Brandes vorliegt,
\dot{Q}	(zeitabhängige) Wärmefreisetzungsrate in kW ,
\dot{Q}_{max}	maximale Wärmefreisetzungsrate in kW .

Für den ersten Bereich, für den $0 \leq t < t^*$ gilt, liefert das Einsetzen von Gleichung (43) in Beziehung (39)

$$\dot{m}_R = \alpha \cdot t^2 \cdot \gamma_R \quad (45)$$

Das Einführen dieses Ausdrucks in die Differenzialgleichung (42) sowie die Annahme, dass die Zuluft frei von Ruß ist ($c_{ZU} = 0$) und die Rußkonzentration der Abluft der Konzentration im Raum entspricht ($c_{AB} = c_R$); homogene Vermischung im Raum), führt auf

$$\frac{d}{dt} (V_R \cdot c_R) = \alpha \cdot t^2 \cdot \gamma_R - \dot{V}_{AB} \cdot c_R \quad (46)$$

Bild 16

Erforderlicher Extinktionskoeffizient k in Abhängigkeit der Sichtweite S und des Erkennungsfaktors C_{sk} (Wände, Stützen, ...: $C_{sk} = 2$; reflektierendes Rettungswegzeichen: $C_{sk} = 3$; selbstleuchtendes Rettungswegzeichen: $C_{sk} = 8$)

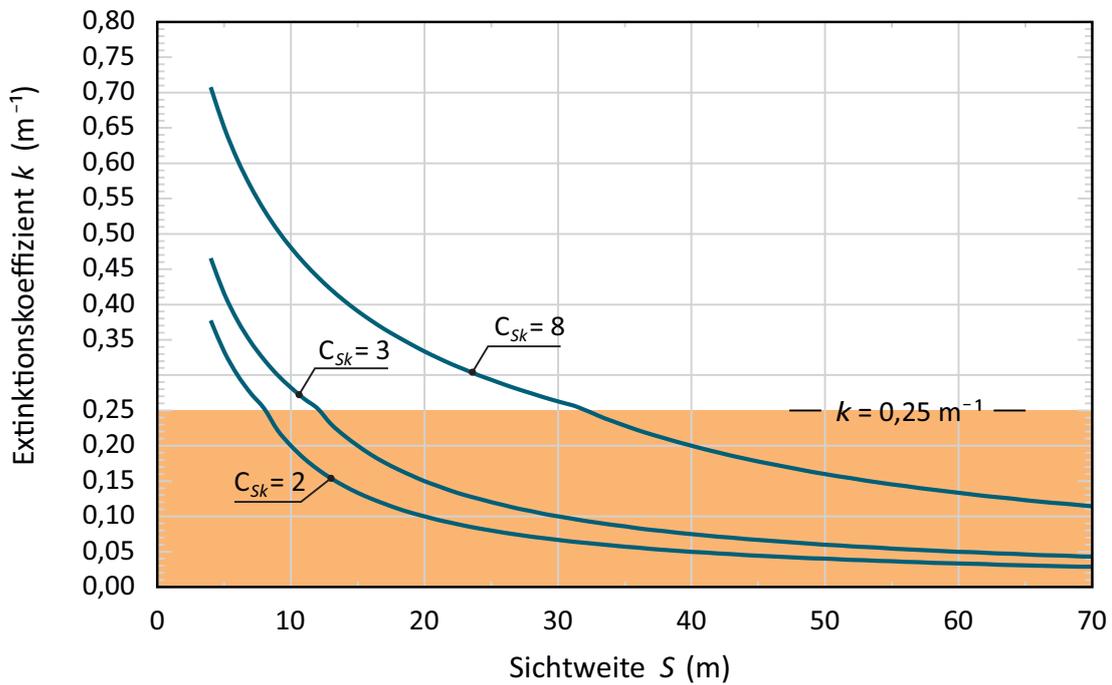


Bild 17

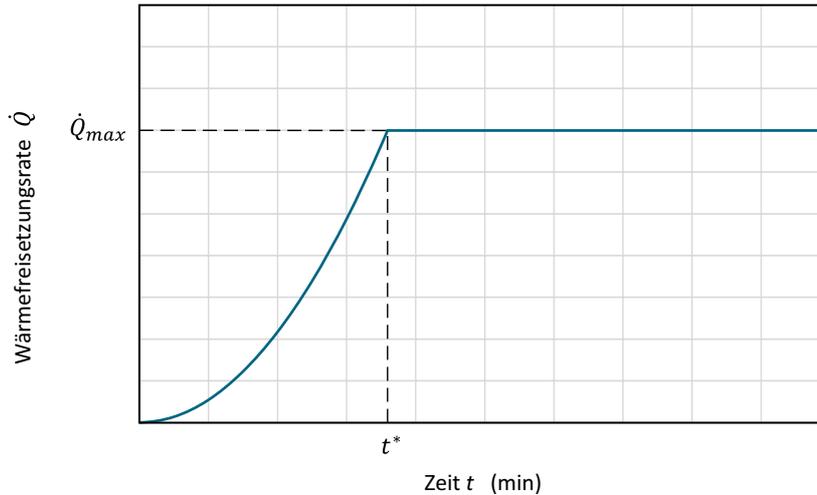
Zur Definition der Größen in Gleichung (42)



Quelle: VDMA

Bild 18

Brandverlaufskurve eines typischen Brandes



Quelle: VDMA

bzw., mit Gleichung (38) und leicht umgeformt,

$$\frac{dk}{dt} = \frac{\sigma_s \cdot \alpha \cdot y_R}{V_R} t^2 - \frac{\dot{V}_{AB}}{V_R} k \quad (47)$$

mit der Lösung

$$k = \frac{\sigma_s \cdot \alpha \cdot y_R}{V_R} \left[t^2 + \frac{2V_R}{\dot{V}_{AB}} t - \frac{2V_R^2}{\dot{V}_{AB}^2} \left(1 - e^{-\frac{\dot{V}_{AB}}{V_R} t} \right) \right] \quad (48)$$

bzw.

$$\frac{k}{\alpha \cdot y_R} = \frac{\sigma_s}{\dot{V}_{AB}} \left[t^2 + \frac{2V_R}{\dot{V}_{AB}} t - \frac{2V_R^2}{\dot{V}_{AB}^2} \left(1 - e^{-\frac{\dot{V}_{AB}}{V_R} t} \right) \right] \quad (49)$$

Die Bilder 51 bis 53 im Anhang B zeigen die Auswertung von Gleichung (49) für Zeiten von fünf bis zehn Minuten nach Beginn des Brandes für verschiedene Raumvolumina. Zur Anwendung der Diagramme ist der bezogene Extinktionskoeffizient $k/(\alpha \cdot y_R)$ zu ermitteln. Hierbei wird der Extinktionskoeffizient k bei vorgegebener Sichtweite S aus Bild 16 bestimmt. Typische Werte für den Brandintensitätskoeffizienten α können Tabelle 4 und Rußausbeutefaktoren Tabelle 2 bzw. [15] entnommen werden.

Die nach dem beschriebenen Verfahren ermittelten Volumenströme werden in der Regel so hohe Werte annehmen, dass die hierfür erforderlichen Anlagen technisch nicht umsetzbar sind (vgl. hierzu Anhang C). In derartigen Fällen ist die Projektierung der Anlagen nach dem Prinzip der Schichtung gem. Abschnitt 7.1 zu empfehlen.

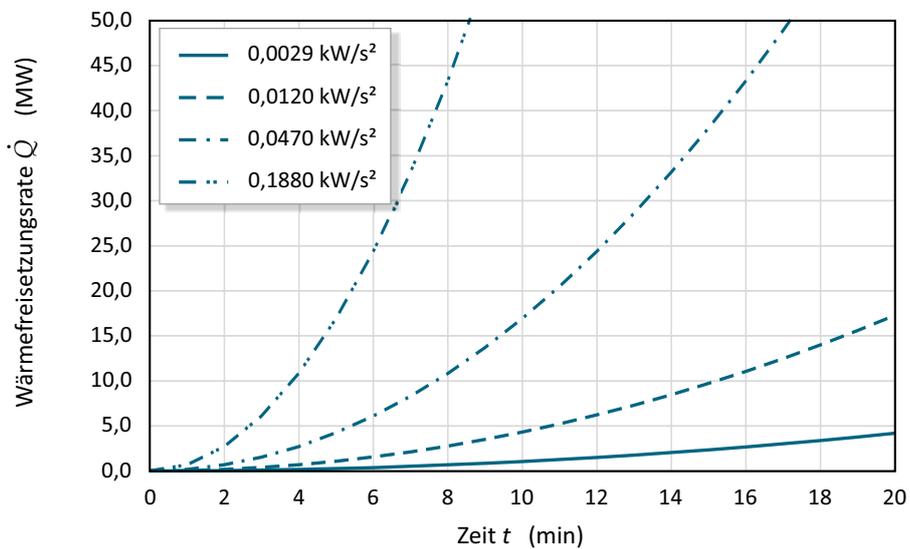
Tabelle 4

Typische Werte für den Brandintensitätskoeffizienten α

Geschwindigkeit der Brandentwicklung	Brandintensitätskoeffizient α (kW/s^2)
langsam	0,0029
mittel	0,012
schnell	0,047
sehr schnell	0,188

Bild 19

Wärmefreisetzungsraten bei unterschiedlichen Brandintensitätskoeffizienten (vgl. Tabelle 4)



Quelle: VDMA

8. Entrauchung von Garagen und Sonderbauten mit komplexen Geometrien

Für Versammlungsstätten, Verkaufsstätten, Industriebauten und Garagen ohne Abweichungen sind die Anforderungen an die Rauchableitung bauordnungsrechtlich geregelt. Bei Gebäuden, für die in bauordnungsrechtlichen Verfahren Entrauchungsanlagen gefordert werden, die nicht durch die Sonderbauverordnungen oder -richtlinien beschrieben sind, müssen MRA und NRA mithilfe geeigneter Verfahren, z. B. einschlägige Normen (z. B. VDI 2053 Blatt 2 [13], DIN 18232-2 [8], DIN 18232-5 [9]) oder gemäß Abschnitt 7, ausgelegt werden. Bei komplexen Geometrien versagen oftmals Berechnungsansätze gemäß Abschnitt 7, da strömungsmechanische Vorgänge nicht ausreichend genau berücksichtigt werden. In derartigen Fällen ist in der Regel die Durchführung von CFD-Analysen oder (experimentellen) Modellversuchen zu empfehlen.

Wenig geeignet sind hierzu bei komplexen Geometrien Berechnungen mit Zonenmodellen, da mit diesen die strömungstechnischen Vorgänge nicht ausreichend genau beschrieben und daher die Auswirkungen auf die Rauchausbreitung nicht erfasst werden können.

8.1 Geschlossene Großgaragen

8.1.1 Allgemeines

Die Vorgaben zur Rauchableitung für Garagen werden in den Garagenverordnungen der Bundesländer festgelegt. Die Verordnungen der Länder werden auf Basis der Muster-Garagen- und Stellplatzverordnung (M-GarVO) erstellt. Die sicherheitstechnischen Anforderungen der einzelnen Länder sind an die Belange der einzelnen Bundesländer angepasst und können von den Vorgaben der Muster-Garagen- und Stellplatzverordnung abweichen.

Im Einzelfall können für Garagen im bauaufsichtlichen Verfahren Entrauchungsanlagen gefordert werden, die schutzzielorientiert auszulegen sind. In diesem Fall ist die Planung, Bemessung und Ausführung im Hinblick auf das geforderte Schutzziel gesondert zu betrachten. Beispiele für die Anordnung von Nachström- und Abströmöffnungen sowie Ventilatoranordnungen und deren Ausführungen sind in den Bildern 20 bis 23 dargestellt.

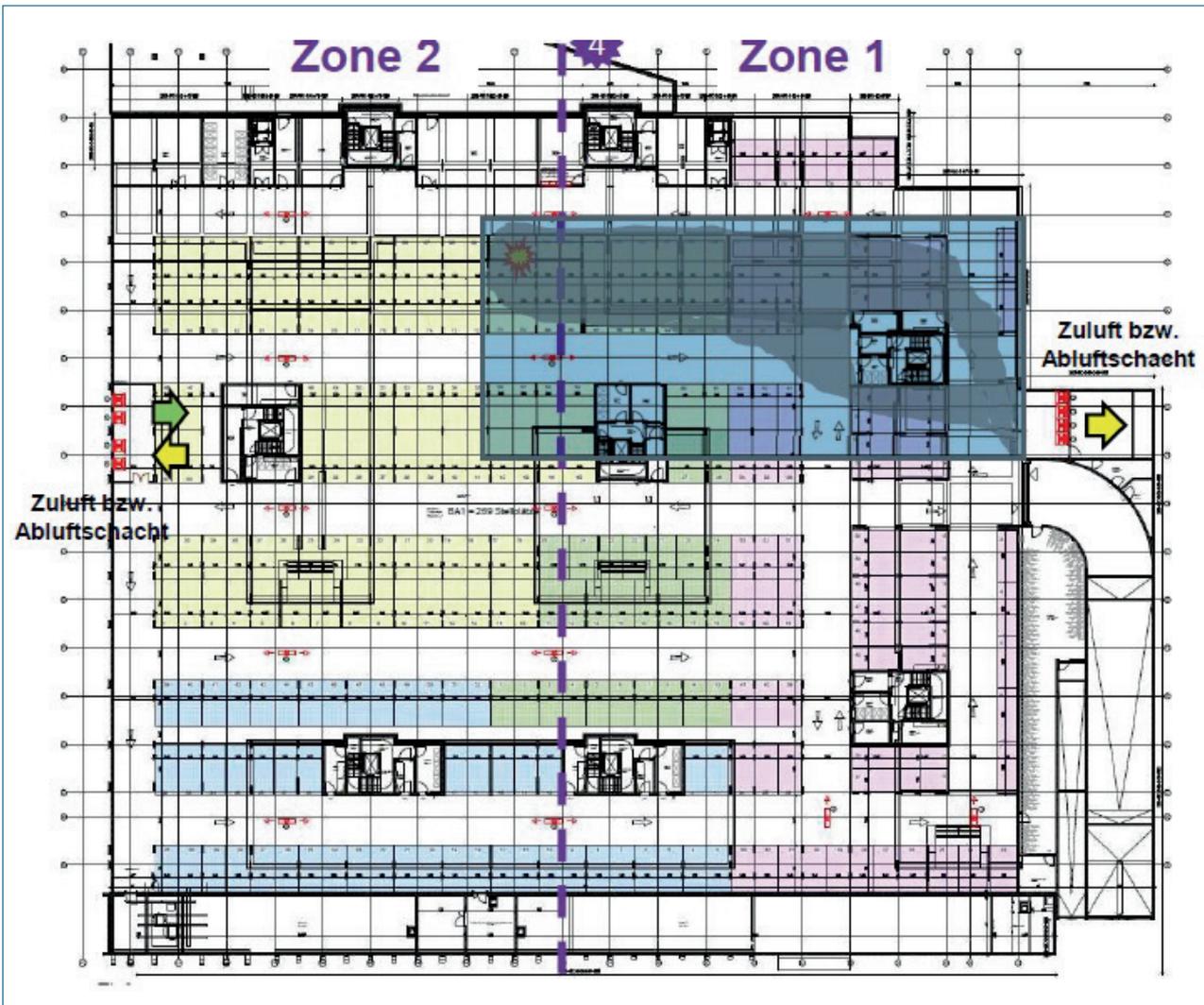


Bild 20: Beispiel der Luftführung über reversible Zu- und Abluftventilatoren in einer Großgarage mit 7.500 m² Grundfläche
 Quelle: TROX X-FANS GmbH



Bild 21: Beispiel der Abluftöffnungen mit Abluftgitter in einer Großgarage
 Quelle: TROX X-FANS GmbH



Bild 22: Beispiel der reversiblen Zu- und Abluftventilatoren in einer Großgarage
 Quelle: TROX X-FANS GmbH



Bild 23: Beispiel der Zuluft einbringung über einen Lichtschacht in einer Großgarage
Quelle: TROX X-FANS GmbH

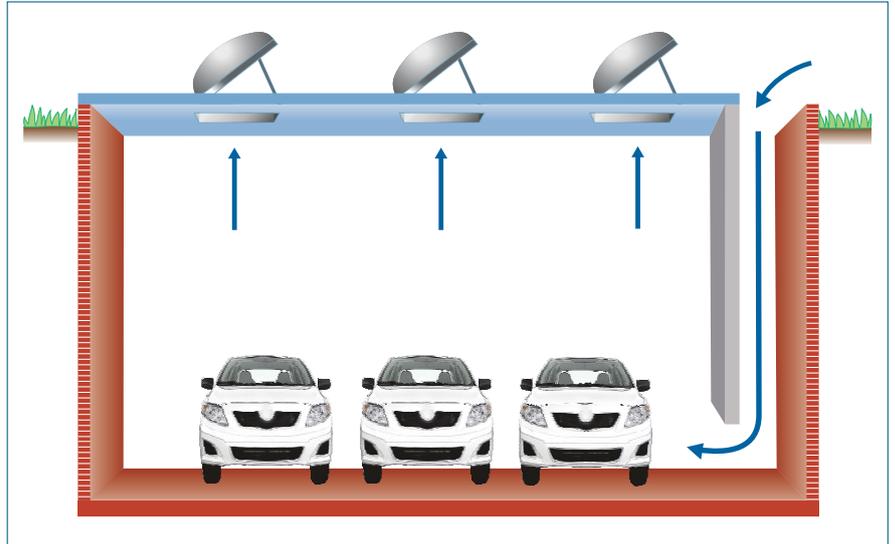


Bild 24: Unterirdische Garage mit NRA
Quelle: TROX X-FANS GmbH

8.1.2 Entrauchung einer Großgarage mittels NRA

Grundsätzlich können Großgaragen mittels NRA entraucht werden. Liegt eine Garage überwiegend unter Erdniveau und ist die Decke gleichzeitig das Dach, kann die Zuluft über Schächte eingebracht werden (siehe Bild 24). Die Dimensionierung erfolgt nach M-GarVO oder nach den Vorgaben in Kapitel 7.1.

Bei der Auswertung der Gleichung (28) bzw. (30) nach Kapitel 7.1 ist dabei der Durchflussbeiwert $c_{v,ZU}$ mithilfe einer Druckverlustberechnung für den Bereich der Zuluft nachführung zu bestimmen. In diesem Zusammenhang gilt für den zuluftseitigen Gesamtdruckverlust

$$\Delta p_{ges} = \sum_i \Delta p_i \quad (50)$$

Dabei ist

Δp_{ges} Gesamtdruckverlust in Pa, der bei der Durchströmung von der (oberirdischen) Einströmung bis zur Ausströmung über die Zuluftfläche in der Garage entsteht,

Δp_i Druckverlust des i-ten Einzelbauteils (Einströmdruckverlust, Druckverlust in geraden Leitungs- bzw. Schachtbereichen, Umlenkdruckverlust bei Änderung der Strömungsrichtung – z. B. Kniestücke bzw. sonstige Formteile, Ausströmdruckverlust bei der Überströmung in die Garage) in Pa.

Für die Druckverluste an einzelnen Bauteilen gilt

$$\Delta p_i = \zeta_i \cdot \frac{\rho_{ZU}}{2} \cdot u_i^2 \quad (51)$$

mit

ζ_i Druckverlustbeiwert des betrachteten Einzelbauteils,
 ρ_{ZU} Dichte der Zuluft in kg/m^3 ,
 u_i Strömungsgeschwindigkeit im Bereich des i-ten Bauteils in m/s

Druckverlustbeiwerte für unterschiedliche Formteile finden sich z. B. in [17] und [18].

Aus dem berechneten Gesamtdruckverlust lässt sich der (Gesamt-)Druckverlustbeiwert ζ_{ZU} bestimmen aus

$$\zeta_{ZU} = \frac{2 \cdot \Delta p_{ges}}{\rho_{ZU} \cdot u_{ZU}^2} \quad (52)$$

wobei für u_{ZU} zweckmäßigerweise die Zuluftgeschwindigkeit bei der Einströmung in die Garage gewählt wird und diese Geschwindigkeit identisch ist mit der Größe u_{ZU} in den Gleichungen (28) bzw. (30).

8.1.3 Entrauchung einer Großgarage mittels MRA

Wenn Zu- und Abluftflächen bei unterirdischen Garagen fehlen oder in ihrer Größe zu gering sind, besteht die Möglichkeit einer natürlichen Lüftung oder Entrauchung nicht. Die Einbringung der Außenluft und die Ablufführung erfolgt in diesen Fällen maschinell.

Bei kanalgeführten Entrauchungsanlagen wird das Rauchgas über Entrauchungsleitungen (z. B. nach DIN EN 12101-7 und ggf. Entrauchungsklappen gemäß DIN EN 12101-8 [19] geführt (siehe Bild 25). Zur Anwendung kommen meist zwei in Reihe geschaltete Axialventilatoren oder zwei parallel angeordnete Ventilatoren. Diese Ventilatoren sind in der Regel auf dem Dach der Garage oder in einer Technikzentrale innerhalb der Garage installiert.

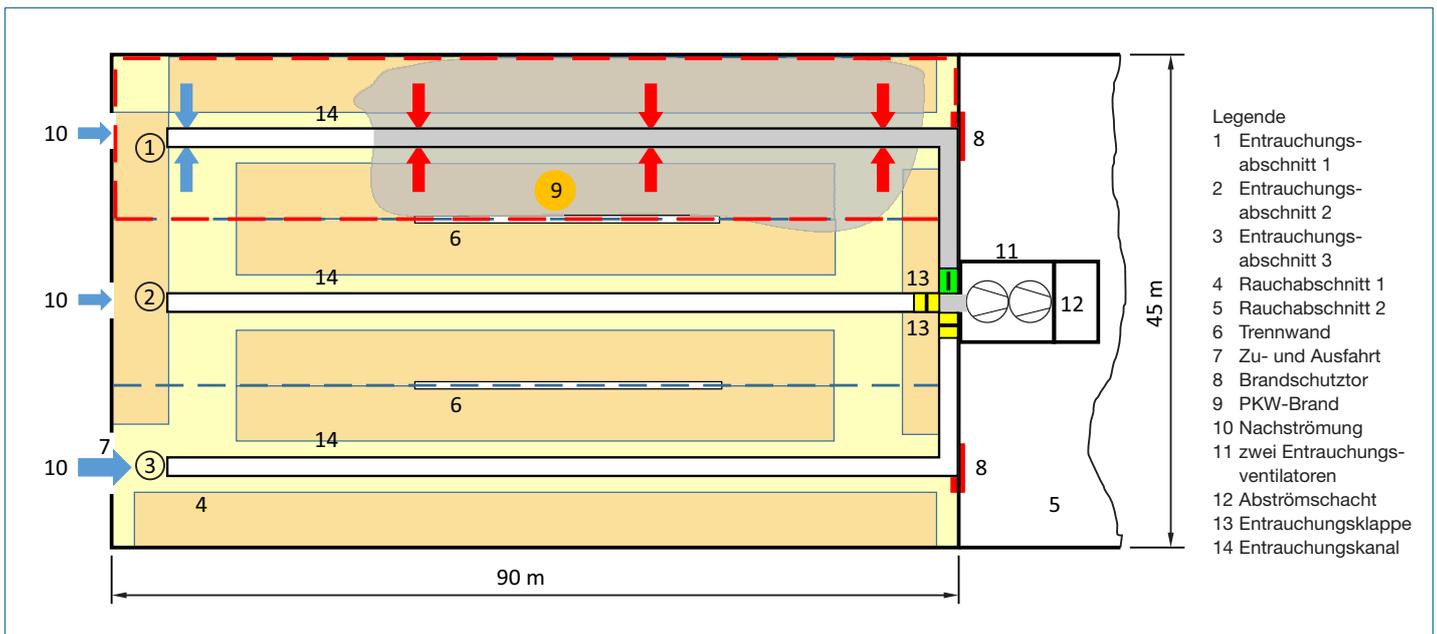


Bild 25: Kanalgeführte Entrauchung
Quelle: TROX X-FANS GmbH

8.2 Rauchabschnittsbildung

8.2.1 Allgemeines

Bei größeren Räumen ist es häufig erforderlich, Rauchabschnitte zu bilden, in denen Gebäudebereiche so von einander abgeschirmt sind, dass über einen längeren Zeitraum der Rauchübertritt von einem Gebäudeteil in einen anderen verhindert wird. Dies kann durch bauliche Maßnahmen wie beispielsweise Unterzüge, Rauchschürzen oder Trennwände oder durch lufttechnische Maßnahmen erfolgen.¹

8.2.2 Rauchabschnittsbildung durch bauliche Maßnahmen

Mit feststehenden, von der Decke in den Raum hineinreichenden oder selbsttätigen, z. B. abrollbaren Rauchschürzen können Räume/Hallen in kleinere Rauchabschnitte unterteilt werden. Zusammen mit den Wänden bilden die Rauchschürzen die Grenzen der Rauchabschnitte.

Die zu projektierende Rauchsichtdicke muss kleiner sein als die Höhe der Rauchschürzen, so dass Rauch an einer weiteren horizontalen Ausbreitung gehindert wird.

Liegen die Decken auf Deckenträgern bzw. Unterzügen größerer Bauhöhe mit geschlossener Oberfläche auf, können diese als Rauchschürzen angerechnet werden.

Anforderungen an Rauchschürzen sind in DIN EN 12101-1 [20] zusammengefasst.

8.2.3 Rauchabschnittsbildung durch lufttechnische Maßnahmen

Entrauchung einer Garage mittels Jet-Ventilatoren

Die Rauchgasströmung wird in nicht kanalgeführten Systemen durch die Anordnung der Zu- und Abluftöffnungen mit integrierten Ventilatoren und den Einsatz von Jet-Ventilatoren erreicht. Dabei wird die Verrauchung bestimmter Garagenbereiche in Kauf genommen, um vom Brand nicht betroffene Bereiche weitestgehend rauchfrei zu halten. Hierdurch kann die Selbstrettung ermöglicht und der Löschangriff der Feuerwehr unterstützt werden.

Die Anordnung, Anzahl und Verteilung der Zuluft- und Abluftöffnungen sowie die Bemessung der Entrauchungsvolumenströme sind funktionsbestimmend. Die Jet-Ventilatoren sind funktionsunterstützend zur Strömungslenkung der Rauchgase (vgl. Bilder 26 bis 29).

Im Brandfall werden zunächst die Ventilatoren der MRA aktiviert, die eine Grundströmung mit dem erforderlichen Entrauchungsvolumenstrom erzeugen und die durch den Brand erzeugten Rauchgase abführen. Die Verrauchung und die Rauchausbreitung in der Garage wird hierdurch bereits verhindert bzw. verzögert und unterstützt die Selbstrettung. Die Jet-Ventilatoren werden je nach Szenario ggf. zeitverzögert zugeschaltet (siehe Bild 30). Sofern Jet-Ventilatoren in gesprinkelten Garagen zum Einsatz kommen, werden die Jet-Ventilatoren erst nach Auslösung der Sprinkleranlage aktiviert. Die Projektierungshinweise für eine derartige Garagenentrauchung sind in der europäischen Norm PD CEN/TS 12101-11 [21] und VDI 2053 Blatt 2 [13] beschrieben.

1 Der hier verwendete Begriff „Rauchabschnitt“ weicht insofern von der bauordnungsrechtlichen Definition geringfügig ab.

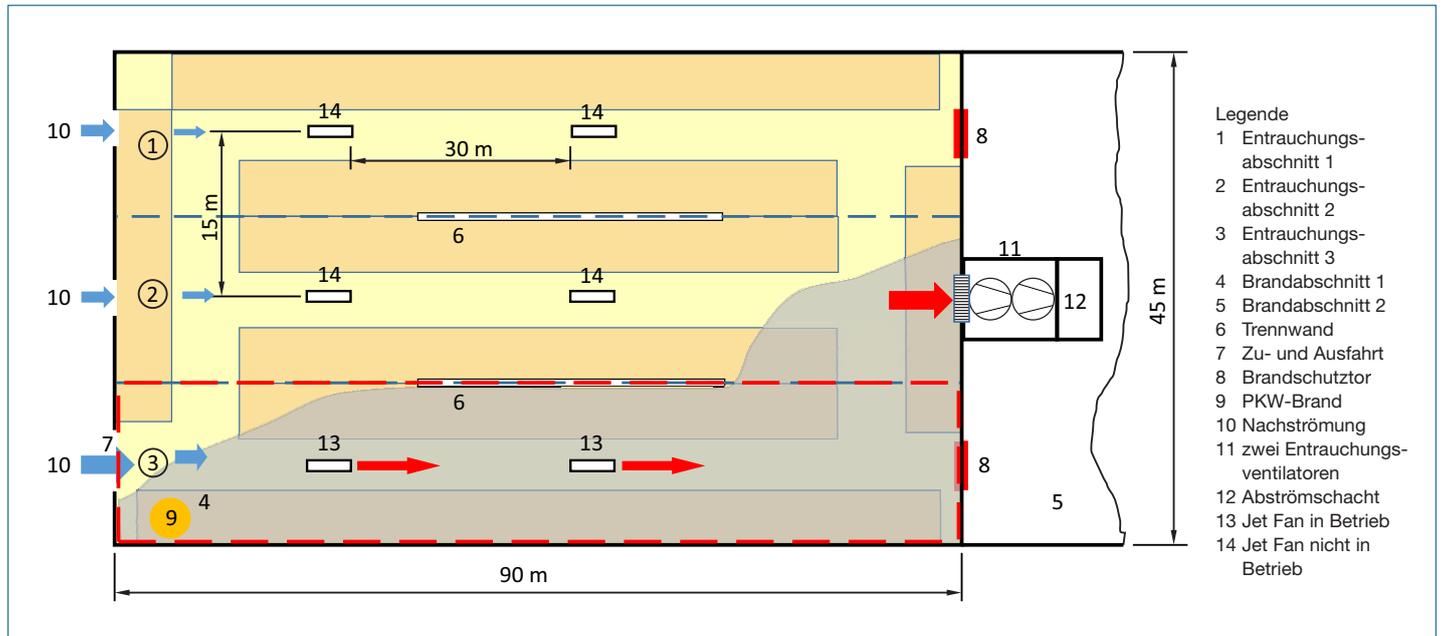


Bild 28: Garage mit selektiv angesteuerten Jet-Ventilatoren und maschineller Entrauchungsanlage – Beispiel: Brandszenario im Entrauchungsabschnitt 3
 Quelle: TROX X-FANS GmbH



Bild 29: Überdachter Busbahnhof mit Jet-Ventilatoren zur gezielten Rauchableitung im Brandfall
 Quelle: TROX X-FANS GmbH

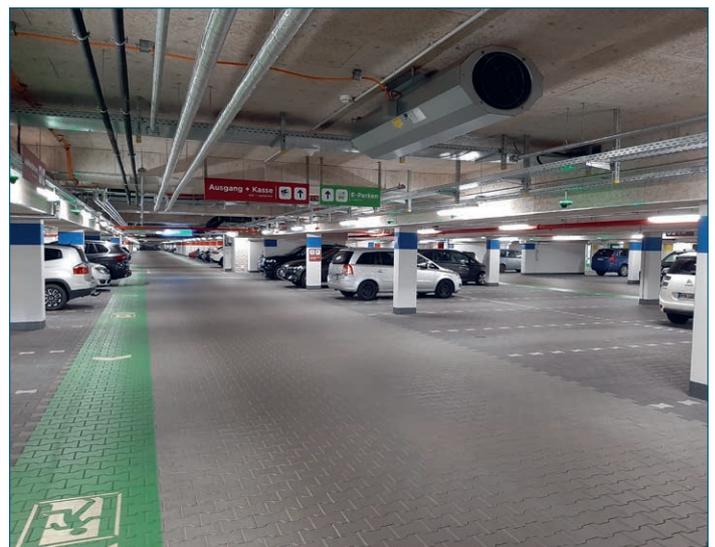


Bild 30: Jet-Ventilatoren unter der Decke einer Tiefgarage
 Quelle: TROX X-FANS GmbH

Rauchabschnittsbildung mit Hilfe von Direkterfassungssystemen

Ist die Rauchabschnittsbildung durch bauliche Maßnahmen nicht möglich oder nicht erwünscht, können auch lufttechnische Maßnahmen zur Ausbildung von Rauchabschnitten eingesetzt werden. Hierzu gehören Direkterfassungssysteme (z. B. „Drallhauben“, „Drallrohre“ usw.), die – ähnlich wie dies bei Rauchschürzen der Fall ist – in der Regel entlang der Grenze zwischen zwei zu trennenden Rauchabschnitten angeordnet werden. Die Absaugleistung derartiger Systeme wird dabei so bemessen, dass auftretender Rauch an dieser Grenze erfasst und abgeführt wird, um so ein Überströmen in den benachbarten Rauchabschnitt zu verhindern. Erfassungselemente von Direkterfassungssystemen müssen folgende Eigenschaften aufweisen:

- Gleichmäßiges, linienförmiges Absaugen,
- der Unterdruck an der Erfassungsstelle muss so groß sein, dass der Strömungsimpuls der Rauchströmung aufgenommen werden kann.

Um die gleichmäßige Absaugleistung über die Länge des Direkterfassungssystems hinweg zu erreichen, werden die Erfassungselemente so ausgebildet, dass sich in ihnen eine Wirbelströmung aufbaut (vgl. Bild 31). Die hiermit verbundene Geschwindigkeitszunahme zum Wirbelzentrum hin führt zu einer sehr gleichmäßigen Druckverteilung im Zentrum längs des Wirbelfadens.

Typische Anwendungsbeispiele für Direkterfassungssysteme sind neben der Rauchabschnittstrennung in großflächigen Räumen (siehe Bild 33) oder Hallen auch ihre Anordnung im Bereich von Verbindungsgängen sowie die „Abschirmung“ von Galerien oder Durchbrüchen in Geschossdecken (siehe Bild 32).

Die Dimensionierung von Direkterfassungssystemen erfolgt in der Regel mit Hilfe von CFD-Berechnungen oder Modellversuchen.

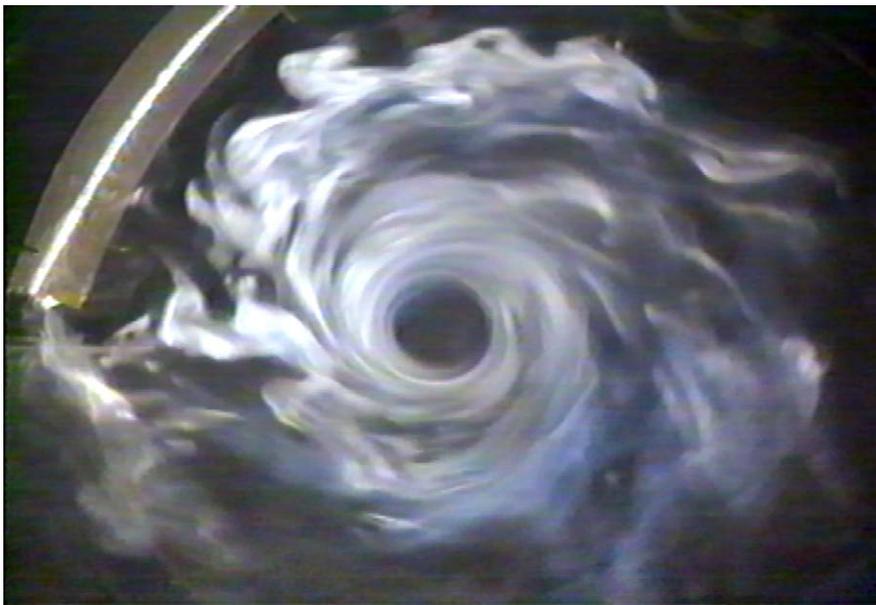


Bild 31: Wirbel-/Drallströmung im Querschnitt, sichtbar gemacht durch Rauchzugabe
Quelle: Rud. Otto Meyer Technik GmbH & Co. KG

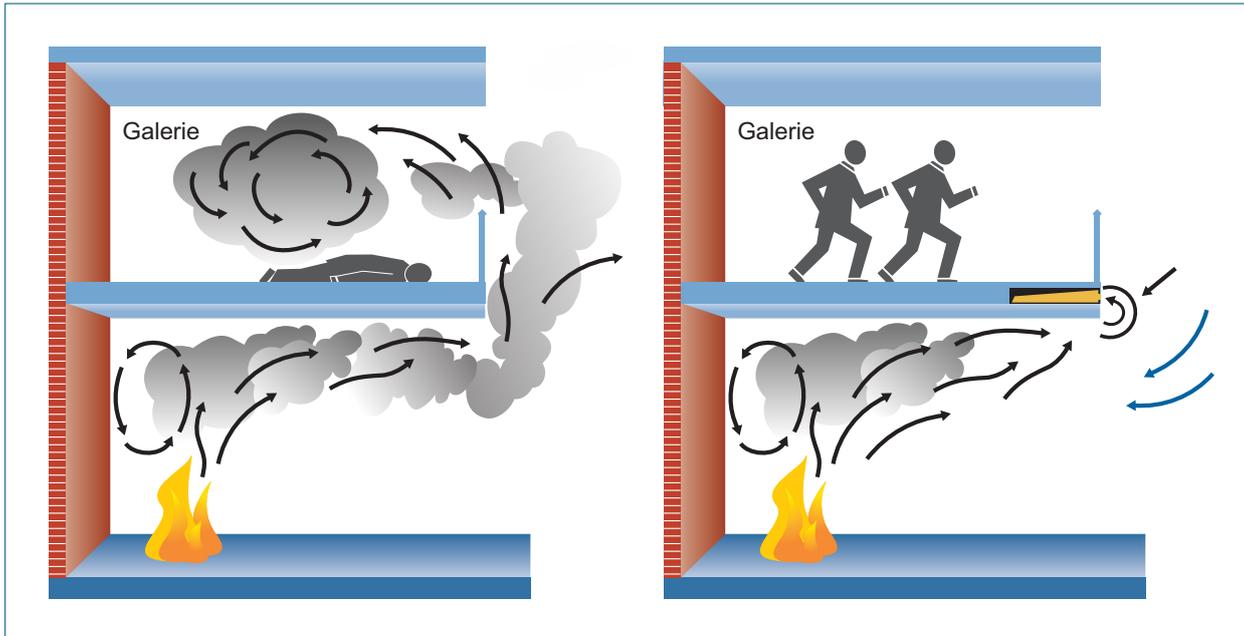


Bild 32: Wirkung einer Direkterfassung von Rauch bei Galerien
Quelle: TROX X-FANS GmbH

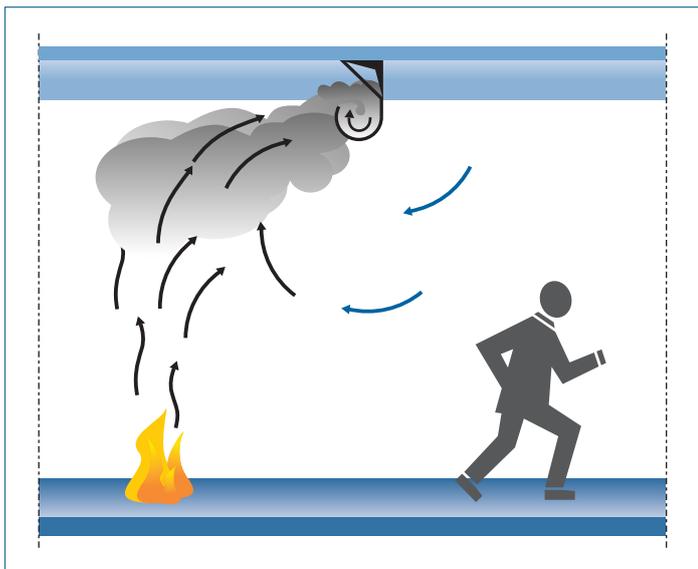


Bild 33: Rauchabschnittsbildung durch Drall- oder Wirbelhaube
Quelle: TROX X-FANS GmbH

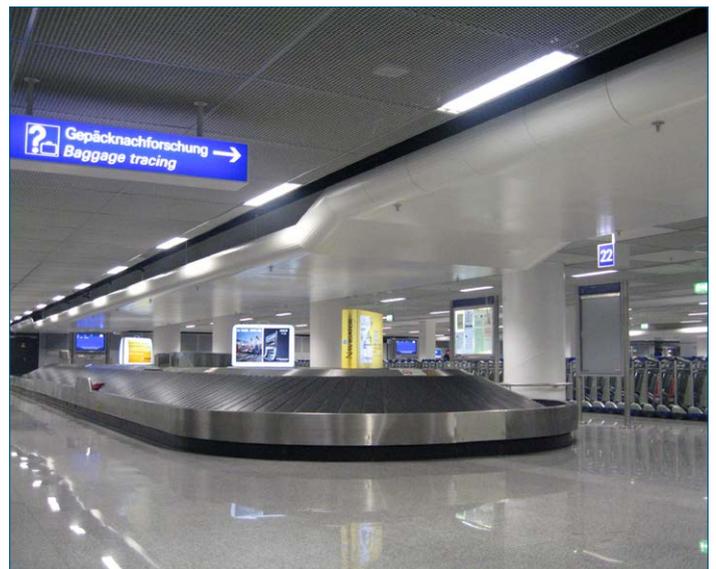


Bild 34: Beispiel einer Rauchabschnittsbildung durch Drall- oder Wirbelhauben
Quelle: Rud. Otto Meyer Technik GmbH & Co. KG

9. Druckbelüftungsanlagen

9.1 Einleitung und Schutzziele

Anlagen zur Rauchfreihaltung dienen dazu, Flucht- und Rettungswege, insbesondere Sicherheitstreppe Räume, Feuerwehraufzüge und deren jeweilige Vorräume rauchfrei zu halten, um flüchtenden Personen die Selbstrettung zu ermöglichen und den Einsatzkräften der Feuerwehr die Fremdrettung und die Durchführung von Löschmaßnahmen zu erleichtern.

Anlagen für die Rauchfreihaltung werden bauordnungsrechtlich als Druckbelüftungsanlagen bezeichnet. In diversen Publikationen und Normen werden auch die Benennungen Rauchschutz-Druckanlagen (RDA) oder Differenzdruckanlagen verwendet.

Bestimmungen für Druckbelüftungsanlagen sind bauordnungsrechtlich innerhalb der Muster-Hochhaus-Richtlinie – MHHR [22] sowie der Muster-Verwaltungsvorschrift Technische Bauvorschriften (MVV TB) [23] festgelegt.

Darüber hinaus existieren auf europäischer Ebene die Normen DIN EN 12101-6 [24], in der Prüfverfahren für Bausätze von Differenzdrucksystemen beschrieben sind, sowie DIN EN 12101-13 [25] (Planung, Bemessung von Differenzdrucksystemen).

Das VDMA-Einheitsblatt 24188 „Rauchschutzmaßnahmen in Treppenträumen“ [26] beschreibt neben den Anlagentechniken zur Rauchfreihaltung auch Anlagen zur Rauchverdünnung und Rauchableitung aus Treppenträumen. Darüber hinaus finden sich hier auch Angaben zu Feuerwehraufzügen und Anforderungen an betriebsbereite Ersatzgeräte.

9.2 Grundlagen

Druckbelüftungsanlagen erzeugen einen kontrollierten Überdruck in dem zu schützenden Bereich (z. B. dem Sicherheitstreppe Raum) gegenüber dem Brandgeschoss. Dieser bewirkt eine Durchströmung von Leckageflächen (z. B. Spalten um geschlossene Türen herum) vom geschützten Bereich zum Brandgeschoss.

Wenn Türen zwischen dem geschützten Bereich und dem Brandgeschoss geöffnet sind, muss die Druckbelüftungsanlage eine Durchströmung der Tür in Richtung des Brandgeschosses mit einer Mindestgeschwindigkeit bewirken (siehe Bild 35).

Um diese Durchströmung sicherzustellen, sind in den Nutzungseinheiten der Geschosse ausreichend groß bemessene Abströmwege vorzusehen. Die Abströmung kann entweder über automatisch öffnende Fenster auf gegenüberliegenden Fassadenseiten erfolgen oder über einen vertikalen feuerwiderstandsfähigen Schacht, an dem das Brandgeschoss über eine Entrauchungsklappe angebunden ist. Nur im vom Brand betroffenen Geschoss wird die entsprechende Öffnung hergestellt.

Bei geschlossenen Türen wird gemäß DIN EN 12101-13 [25] eine Mindestdruckdifferenz zwischen geschütztem Bereich und Brandgeschoss von 30 Pa gefordert. Gleichzeitig muss sichergestellt werden, dass die Druckdifferenz nicht zu groß wird, damit Türen, die in Richtung des Überdrucks zu betätigen sind, noch leicht zu öffnen sind. Maximal sind 100 N, gemessen am Türgriff, zulässig (siehe Bild 36).

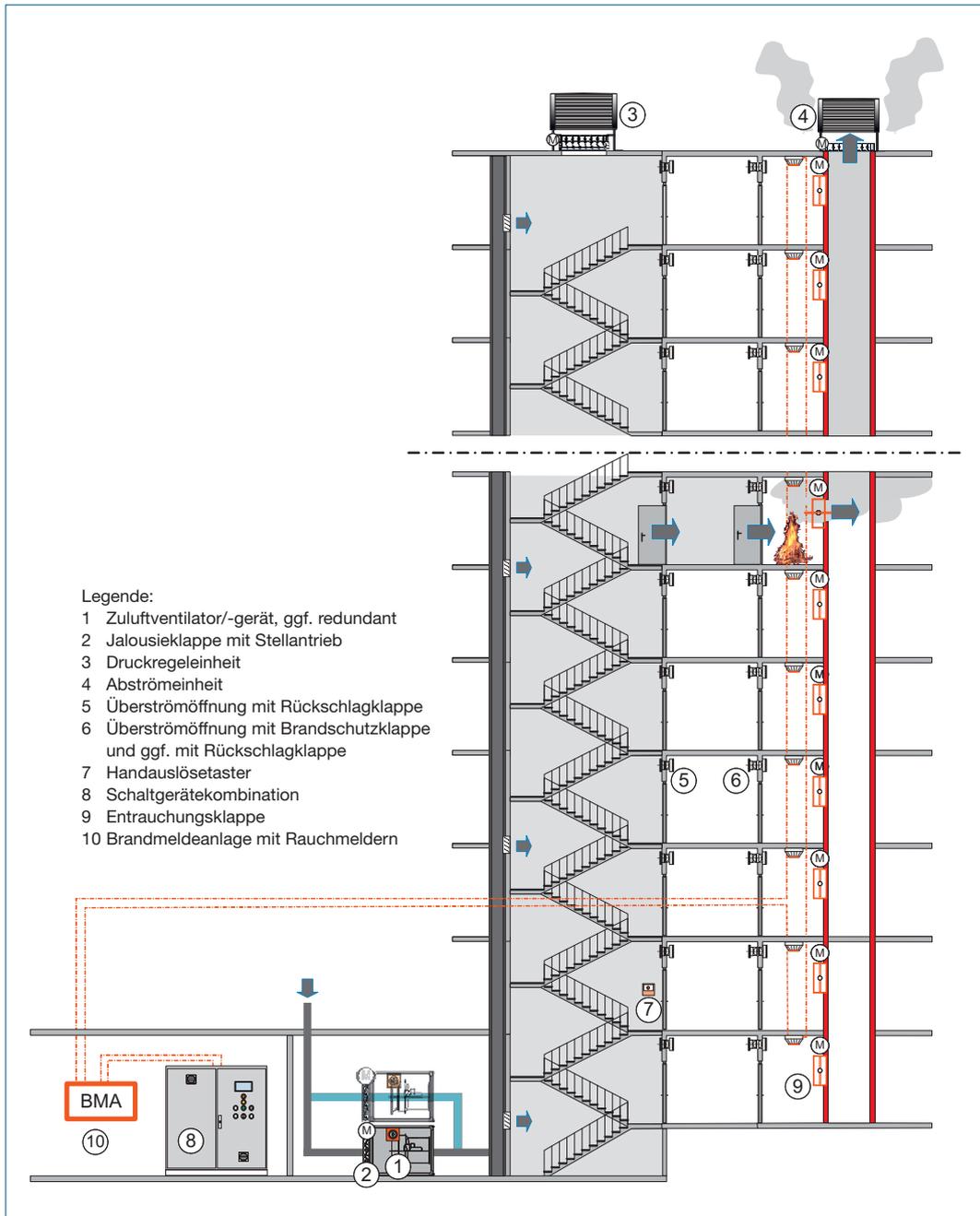


Bild 35: Die Türen zwischen geschütztem Bereich und Brandgeschoss sind geöffnet

Quelle: Alfred Eichelberger GmbH & Co. KG

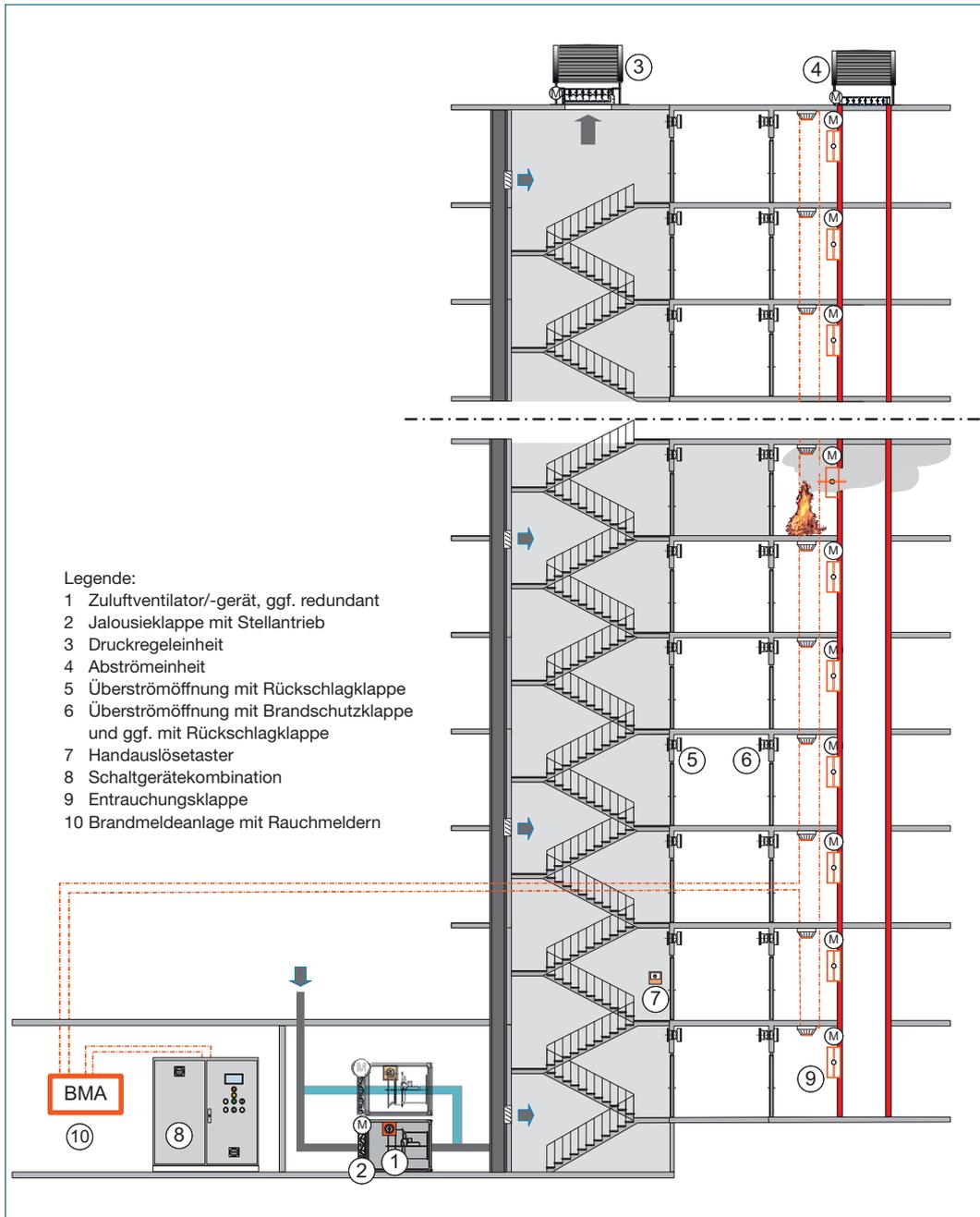


Bild 36: Alle Türen des Treppenraumes sind geschlossen
 Quelle: Alfred Eichelberger GmbH & Co. KG

9.3 Randbedingungen für die Auslegung

- **Druckdifferenz**
Die Druckbelüftungsanlage soll bei geschlossenen Türen eine Mindest-Druckdifferenz zwischen dem zu schützenden Bereich und dem Brandgeschoss erzeugen.
In der DIN EN 12101-13 [25] ist die Mindest-Druckdifferenz mit 30 Pa festgelegt.
Die Maximaldruckdifferenz lässt sich aus der zulässigen Türöffnungskraft, dem Öffnungsmoment des verwendeten Türschließers und der Türgeometrie ermitteln.
- **Türöffnungskraft**
Die an der Türklinke wirksame Kraft darf bei aktivierter Druckbelüftung maximal 100 N betragen.

- **Strömungsgeschwindigkeit in offenen Türquerschnitten**
Entsprechend MVV TB [23] und MHHR [22] sind in dem Geschoss, in dem der Brand detektiert wurde, folgende mittlere Durchströmungsgeschwindigkeiten nachzuweisen:
 - mindestens 2 m/s in geöffneten Türen zwischen Sicherheitstuppenraum und dem vom Brand betroffenen Geschoss,
 - mindestens 0,75 m/s in der geöffneten Tür des Feuerwehraufzugsvorraumes im Brandgeschoss.

Davon abweichende Geschwindigkeiten können in individuellen Brandschutznachweisen/ Brandschutzkonzepten vorgegeben sein.

Tabelle 5

Anforderungen für die Auslegung nach DIN EN 12101-13 [25]

Parameter	Klasse 1	Klasse 2
Türöffnungskraft		≤ 100 N
Differenzdruck		≥ 30 Pa
Luftströmungsgeschwindigkeit	≥ 1 m/s	≥ 2 m/s
Ansprechzeit 1 (Öffnungszeit für Klappen-/Fensterantriebe etc.)		≤ 60 s
Ansprechzeit 2 (Zeit bis zum Erreichen der Soll-druckdifferenz bzw. des stabilen Regelbetriebs nach erstmaligem Aktivieren)		≤ 120 s
Reaktionszeit (Zeitspanne, in der		≤ 5 s

- nach Öffnen von Türen die Anforderungen an Durchströmungsgeschwindigkeiten entsprechend Zeile 3
- nach Schließen von Türen die Anforderungen an Druckdifferenzen und Türöffnungskräfte entsprechend Zeile 1 und 2 wieder erfüllt sind.)

Quelle: VDMA

- Reaktionszeit
Nach dem Öffnen oder Schließen einer Tür darf es maximal drei Sekunden dauern bis sich die geforderten Kriterien an Durchströmungsgeschwindigkeiten und zulässige Türöffnungskräfte stabil einstellen.

Abweichend von den Anforderungen des deutschen Baurechts werden in der DIN EN 12101-13 [25] zwei unterschiedliche Klassen definiert (siehe Tabelle 5). Die Mindestgeschwindigkeit für Klasse 1 beträgt 1 m/s; für Klasse 2 beträgt diese 2 m/s. Als maximale Reaktionszeit werden dort 5 Sekunden im Gebäude genannt. Die Verwendung der beiden genannten Größen ist im Brandschutznachweis/Brandschutzkonzept zu begründen.

9.4 Berechnung der Türöffnungskräfte

Der Betrieb der Druckbelüftungsanlage darf nicht dazu führen, dass sich Türen in Rettungswegen aufgrund zu hoher Druckdifferenzen nicht mehr öffnen lassen oder als verschlossenen erscheinen. Die Türöffnungskraft F_T , gemessen an der Türklinke (normativ: Türdrücker), darf 100 N nicht überschreiten. Sofern ein Vorraum zwischen Treppenraum und Nutzungseinheit vorhanden ist, muss der Nachweis für jede der Vorraumtüren geführt werden. Die zulässige Türöffnungskraft darf auch dann nicht überschritten werden, wenn eine von zwei in Strömungsrichtung hintereinander angeordneten Vorraumtüren bereits geöffnet ist.

Im Regelfall sind die Türen in Fluchrichtung zu öffnen; beim Betreten des Treppenraumes bewirkt die Druckbelüftung also eine Verstärkung der erforderlichen Türöffnungskraft. Die an der Türklinke wirksame Kraft entspricht der Kraft, die ohne Druckbelüftung ohnehin zum Überwinden des Türschließers erforderlich ist zuzüglich der durch die zusätzliche Druckdifferenz hervorgerufenen Kraft.

Türgrößen, Türschließer und maximale Druckdifferenz sind entsprechend aufeinander abzustimmen.

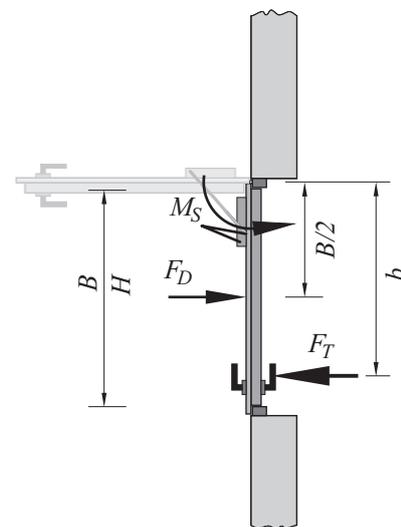
Die maximale Druckdifferenz lässt sich in Abhängigkeit von der Türgeometrie und dem vom Türschließer verursachten Drehmoment mit nachstehender Gleichung berechnen (siehe Bild 37). Dabei ist das Öffnungsmoment des Türschließers zu verwenden, also jenes Moment, das erforderlich ist, die Tür entgegen ihrer Schließrichtung zu bewegen.

Aufgrund der Druckdifferenz ergibt sich die auf die Tür ausgeübte Kraft zu

$$F_D = \Delta p \cdot B \cdot H \tag{53}$$

Bild 37

Maximale Druckdifferenz zur Einhaltung zulässiger Türöffnungskraft



Quelle: VDMA

Aus der Bilanz der Drehmomente um die Scharniere (normativ: Bänder) einer Tür folgt:

$$F_T \cdot b = \Delta p \cdot B \cdot H \cdot \frac{B}{2} + M_S \quad (54)$$

mit

F_T	Türkraft in N ,
b	Abstand vom Scharnier bis zur Mitte der Türklinke in m ,
B	Breite der Tür in m ,
H	Höhe der Tür in m ,
M_S	maximales Tür-Öffnungsmoment in Nm .

Wird eine maximal zulässige Türöffnungskraft von 100 N zugrunde gelegt, ergibt sich für die Druckdifferenz:

$$\Delta p_{max} = \frac{100 \text{ N} \cdot b - M_S}{\frac{B}{2} \cdot (B \cdot H)} \quad (55)$$

Sofern Türen aus dem druckbelüfteten Bereich heraus öffnen, zum Beispiel die Hauseingangstür ins Freie, muss der Türschließer bei Betrieb der Druckbelüftungsanlage ein höheres Schließmoment aufweisen, damit die Tür gegen den Überdruck zuverlässig schließt.

Die hierfür erforderlichen Schließmomente führen in der Praxis allerdings häufig dazu, dass die Tür für den tagtäglichen Betrieb nur mit erhöhtem – häufig nicht akzeptierten – Kraftaufwand betätigt werden kann. Dieser Problematik kann begegnet werden mit einer der folgenden Maßnahmen:

- Verwendung eines zusätzlichen Freilauftürschließers, der nur im Brandfall aktiviert wird;
- Verwendung motorisierter Türen, Integration in die Sicherheitsstromversorgung;
- Anordnung einer Ausgangsschleuse mit zwei Türen.

9.5 Strömungsgeschwindigkeiten

Die kontrollierte Durchströmung offener Türflächen zwischen geschütztem und ungeschütztem Bereich ist eine wesentliche Grundlage für die wirkungsvolle Rauchfreihaltung.

Grundsätzlich ist die dafür benötigte Geschwindigkeit abhängig von der Temperaturdifferenz zwischen geschütztem und ungeschütztem Bereich.

Nach John [27] lässt sich der erforderliche Volumenstrom, mit der eine offene Tür durchströmt werden muss, um einen Rauchübertritt zu verhindern, nach folgender Gleichung bestimmen:

$$\dot{V}_L = \alpha \cdot \frac{2}{3} \sqrt{2 \cdot g \cdot \left(1 - \frac{T_L}{T_R}\right)} \cdot B \cdot H^{3/2} \quad (56)$$

mit

α	Strömungsbeiwert ($\alpha = 0,71$),
g	Fallbeschleunigung in m/s^2 ,
T_L	Temperatur des Brandraum-Luftgemischs in K ,
T_R	Temperatur im Rettungsweg in K ,
B	Breite der Tür in m ,
H	Höhe der Tür in m .

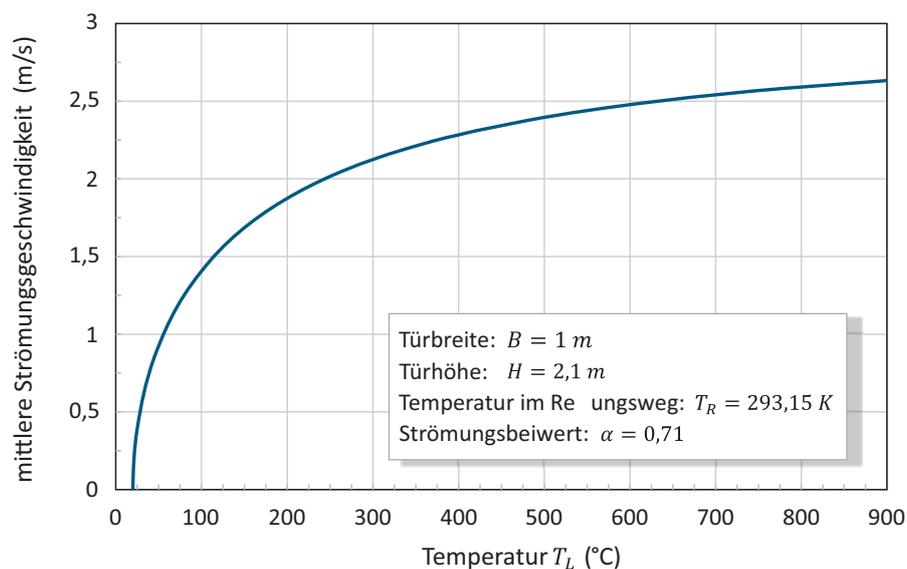
Entsprechend lässt sich eine benötigte mittlere Geschwindigkeit ermitteln, die in nachstehendem Diagramm dargestellt ist (siehe Bild 38).

Es ist ersichtlich, dass die für die Verhinderung eines Rauchübertritts notwendige Durchströmungsgeschwindigkeit mit wachsender Temperaturdifferenz ansteigt.

Die in der MVV TB [23] für Sicherheitstreppe als Mindestgeschwindigkeit angesetzt 2 m/s gelten als ausreichend, um auch zum Zeitpunkt eines fortgeschrittenen Brandes mit erhöhten Temperaturen ($> 200 \text{ °C}$) eine Rauchfreihaltung sicherzustellen.

Bild 38

Mindestens erforderliche mittlere Durchströmungsgeschwindigkeit an einer offenen Tür in Abhängigkeit von der Brandraumtemperatur nach John [27]



Quelle: VDMA

Bei bestimmten Randbedingungen können auch geringere Strömungsgeschwindigkeiten für die Erreichung des Schutzziels ausreichend sein.

Wenn davon ausgegangen werden kann, dass im Bereich, aus dem die Abströmung erfolgt, nur mit einer geringen Temperaturerhöhung zu rechnen ist, lässt sich die Verwendung einer niedrigeren Bemessungsgeschwindigkeit über eine Abweichung innerhalb des Brandschutznachweises/ Brandschutzkonzepts begründen.

In der DIN EN 12101-13 [25] wird zum Beispiel in nachstehenden Fällen eine Geschwindigkeit von 1 m/s als ausreichend angesehen:

- in Gebäuden mit automatischen Sprinkleranlagen
- in Wohngebäuden, wenn sich zwischen dem geschützten Raum und der potenziellen Brandquelle mindestens zwei Räume ohne Brandlast befinden und selbstschließende Türen vorhanden sind.

In der Regel ist davon auszugehen, dass in einer frühen Brandphase (Zeitraum der Selbstrettung) die Temperaturen an den Türen zum Sicherheitstrepfenraum geringer sind als zum Zeitpunkt des Eintreffens der Feuerwehr und entsprechend geringere Strömungsgeschwindigkeiten als 2 m/s ausreichen können.

9.6 Konfigurationen

9.6.1 Vorräume

Vorräume sind eine bauliche Maßnahme, die auch einen Eintritt von Rauch in den Sicherheitstreppeerraum behindern soll. Vorräume sind dann wirksam, wenn nicht mehr als eine der beiden Vorraumtüren gleichzeitig geöffnet ist. Wenn beide Türen gleichzeitig offenstehen, erfolgt die Rauchfreihaltung des Treppenraumes durch die von der Druckbelüftungsanlage aufgebrauchte Durchströmung der Tür. Ist nur die Tür zwischen Vorraum und Flur geöffnet, kann es trotz Vorhandensein einer RDA zu einem Raucheintritt in den Vorraum kommen.

9.6.2 Tür ins Freie

Grundsätzlich ist der Nachweis der Druckdifferenzen und Tür-Durchströmungsgeschwindigkeiten bei Sicherheitstreppeerräumen mit geschlossener Tür ins Freie zu führen.

Davon abweichend können innerhalb des Brandschutznachweises/Brandschutzkonzepts höhere Anforderungen beschrieben sein.

Mit wachsender Anzahl an Gebäudenutzern muss im Falle gleichzeitiger Alarmierung im Brandfall damit gerechnet werden, dass in der Phase der unkontrollierten Selbstrettung zumindest zeitweise gleichzeitig mit den zwei Vorraumtüren im Brandgeschoss auch die Tür ins Freie offenstehen kann.

Allerdings ist in der Regel davon auszugehen, dass zu diesem Zeitpunkt die Brand- und Rauchausbreitung noch nicht so weit vorangeschritten ist und entsprechend im notwendigen Flur nur geringfügige Temperaturerhöhungen zu erwarten sind, bei denen wie im vorherigen Abschnitt beschrieben auch geringere Tür-Durchströmungsgeschwindigkeiten ausreichen, den Treppenraum rauchfrei zu halten.

Es ist zudem nicht zu erwarten, dass beide Vorraumtüren und die Tür ins Freie zum gleichen Zeitpunkt komplett – also 90 Grad – geöffnet sind; auch werden die freien Strömungsquerschnitte der Türen durch die passierenden Personen reduziert.

Vor diesem Hintergrund kann die Mindestgeschwindigkeit von 1 m/s bei geöffneter Tür ins Freie in vielen Fällen ausreichend sein. Details hierzu müssen Bestandteil des Brandschutznachweises/Brandschutzkonzepts sein.

Die Wahrscheinlichkeit einer offenen Ausgangstür kann durch folgende Punkte reduziert werden:

- Die Zugangstür vom Freien zum Treppenraum muss selbstschließend sein und sollte von außen im Brandfall ohne Hilfsmittel, wie Schlüssel oder Zugangskontrolle zu öffnen sein.
- Durch den Einsatz von zwei hintereinander angeordneten Türen, die beide mit Türschließern ausgestattet sind, lässt sich die Wahrscheinlichkeit offener Querschnitte weiter reduzieren.
- Damit die Hauseingangstür bei Gebäuden mit trockener Steigleitung im Brandfall auch während der Brandbekämpfung geschlossen bleiben kann, ist die Löschwassereinspeisung so angeordnet, dass die Ausgangstür des Sicherheitstreppeerraumes nicht geöffnet

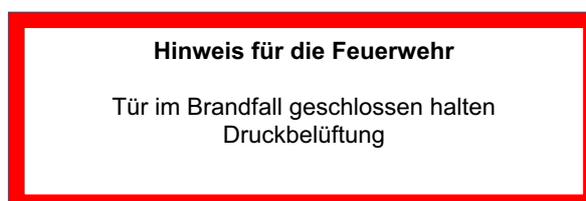


Bild 39: Hinweisschild für die Feuerwehr
Quelle: Feuerwehr Frankfurt

werden muss. An der Tür sollten gut sichtbare Hinweisschilder angebracht werden (siehe Bild 39).

- Die Tür mit den beschriebenen Anforderungen muss gemeinsam mit der Druckbelüftungsanlage gewartet und periodisch geprüft werden.

9.6.3 Gebäude mit Feuerwehraufzügen und Sicherheitstreppe mit jeweils separaten Vorräumen

Wenn entsprechend der MHR [22] der Sicherheitstreppe und der Feuerwehraufzug mit jeweils eigenen Vorräumen ausgeführt sind, muss üblicherweise der Nachweis des Strömungskriteriums nicht gleichzeitig für beide Anlagen erfolgen, da im Regelfall davon ausgegangen werden kann, dass die Selbstrettung und der Einsatz der Rettungskräfte zu unterschiedlichen Zeiten erfolgt.

9.6.4 Strömungskriterium beim Sicherheitstreppe

Die Anforderungen an die Mindest-Strömungsgeschwindigkeit gelten sowohl an der Tür zwischen Sicherheitstreppe und Vorraum als auch an der Tür zwischen Vorraum und notwendigem Flur. Die Vorraum-Tür des Feuerwehraufzuges kann dabei als geschlossen angesetzt werden.

9.6.5 Strömungskriterium beim Feuerwehraufzug

Beim Nachweis der Mindest-Strömungsgeschwindigkeit in der Vorraum-Tür des Feuerwehraufzuges werden die Vorraumtüren des Sicherheitstreppe üblicherweise als geschlossen angesetzt.

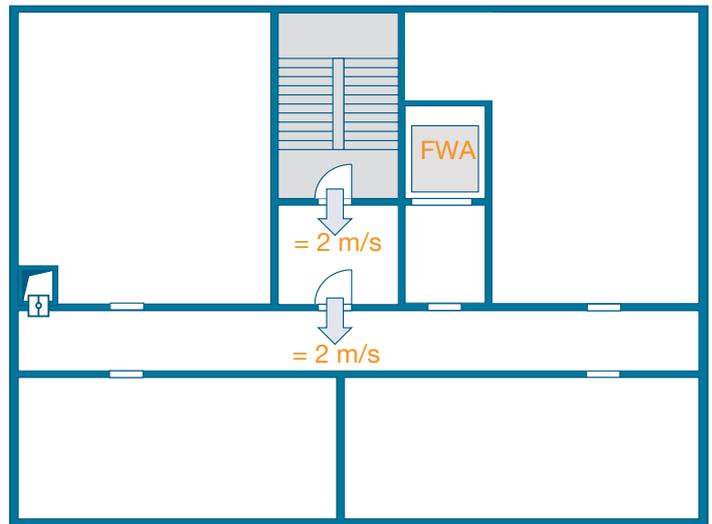


Bild 40: Strömungskriterium beim Sicherheitstreppe
Quelle: Alfred Eichelberger GmbH & Co. KG

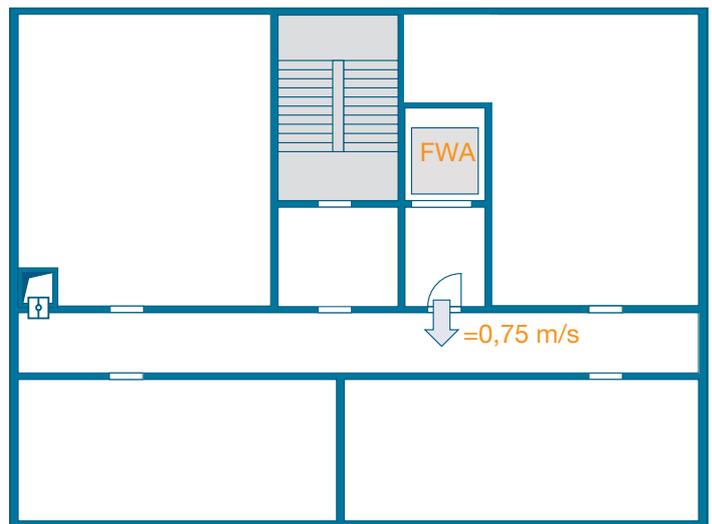


Bild 41: Strömungskriterium beim Feuerwehraufzug
Quelle: Alfred Eichelberger GmbH & Co. KG

9.6.6 Gebäude mit Feuerwehraufzügen und Sicherheitstreppe mit gemeinsamen Vorräumen

Wenn abweichend von der MHHR [22] der Sicherheitstreppe und der Feuerwehraufzug mit gemeinsamen Vorräumen ausgeführt sind, muss der Nachweis des Strömungskriteriums ausschließlich in der Tür zwischen Vorraum und notwendigem Flur erfolgen (Tür 2).

Der Nachweis für das Strömungskriterium der Druckbelüftungsanlage für den Feuerwehraufzug ($\geq 0,75 \text{ m/s}$) ist in der Tür zwischen Vorraum und Flur (Tür 2) bei geschlossener Tür zum Sicherheitstreppe zu führen (siehe Bild 42).

Der Nachweis für das Strömungskriterium der Druckbelüftungsanlage für den Sicherheitstreppe ist ebenfalls in der Tür zwischen Vorraum und notwendigem Flur (Tür 2) bei gleichzeitig geöffneter Tür zwischen Sicherheitstreppe und Vorraum (Tür 1) zu erbringen. In der Tür zwischen dem Treppenraum und dem Vorraum müssen keine Mindestgeschwindigkeiten nachgewiesen werden, da der Vorraum bereits durch die Anlage des Feuerwehraufzuges geschützt ist. Wenn die Durchströmgeschwindigkeit an der Tür 2 mindestens 2 m/s beträgt, ist dadurch sichergestellt, dass Rauch weder in den Vorraum noch in den Treppenraum gelangt (siehe Bild 43).

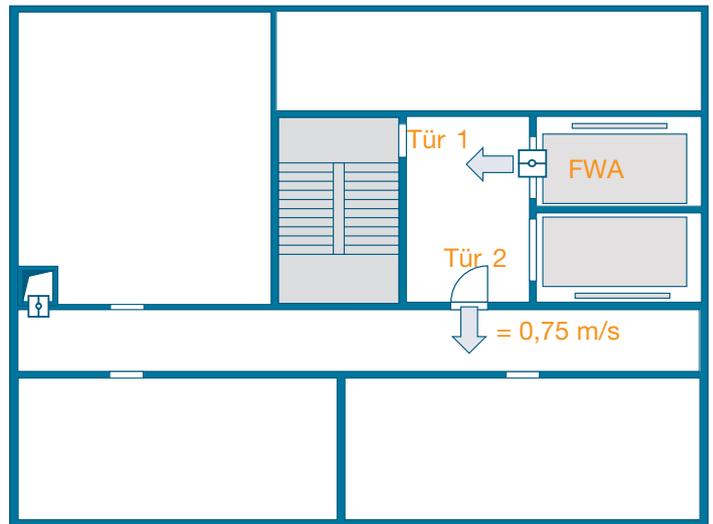


Bild 42: Strömungskriterium $0,75 \text{ m/s}$ bei einem gemeinsamen Vorraum
Quelle: Alfred Eichelberger GmbH & Co. KG

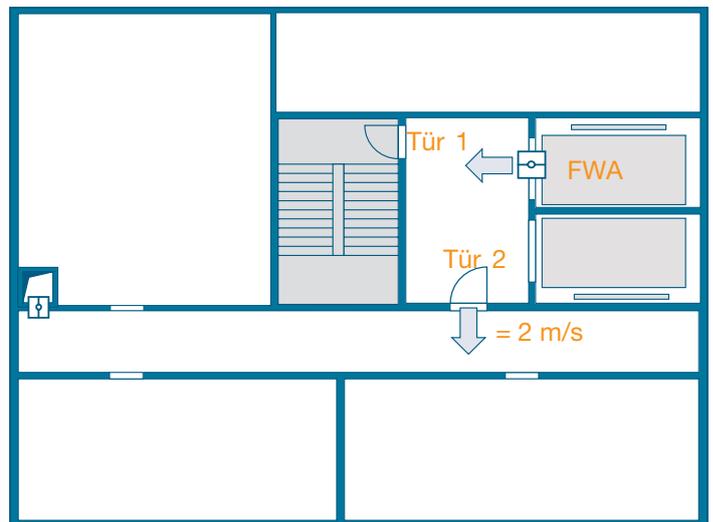


Bild 43: Strömungskriterium $2,0 \text{ m/s}$ bei einem gemeinsamen Vorraum
Quelle: Alfred Eichelberger GmbH & Co. KG

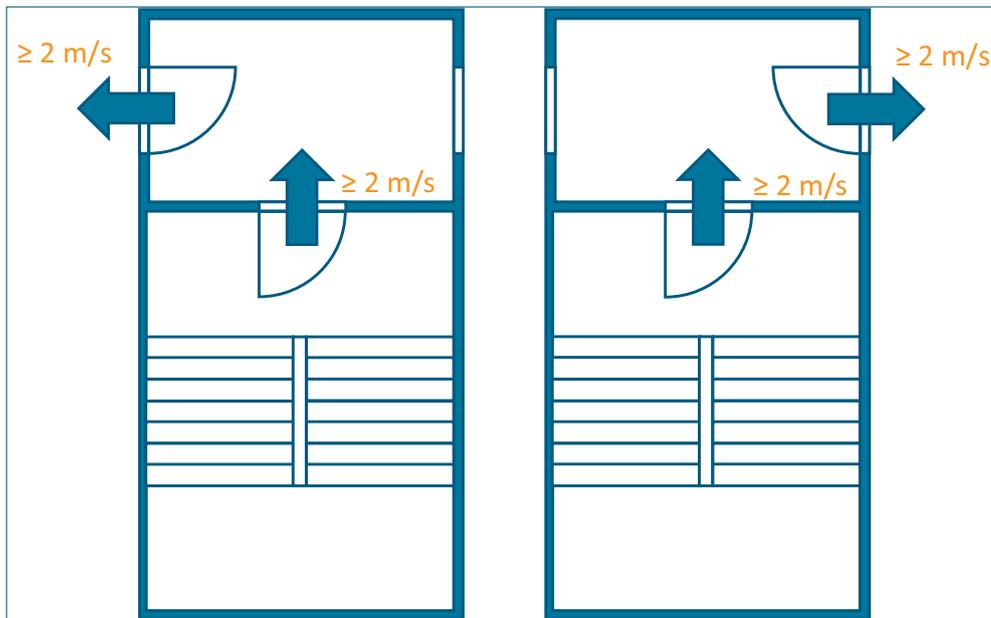


Bild 44: Vorräum mit zwei Türen, die zur gleichen Nutzungseinheit führen
Quelle: Alfred Eichelberger GmbH & Co. KG

9.6.7 Vorräume mit mehreren Türen zu notwendigen Fluren

Führen aus einem Vorräum mehrere Türen zu Nutzungseinheiten, so sind hinter allen Türen, d. h. in allen Nutzeinheiten, ausreichend große Abströmflächen erforderlich.

Für jeden Abströmweg ist das Strömungskriterium (im Regelfall $\geq 2 \text{ m/s}$) separat nachzuweisen.

Eine besondere Situation liegt vor, wenn aus einem Vorräum mehrere Türen zur gleichen Nutzungseinheit führen (siehe Bild 44). Für solche Fälle ist im Brandschutznachweis/Brandschutzkonzept festzulegen, ob bestimmte Gleichzeitigkeitsanforderungen bestehen. In der Regel genügt es hier, die Geschwindigkeitsanforderung in der Tür zwischen Treppenraum und Vorräum nachzuweisen.

9.7 Außenluft/Zuluft

9.7.1 Außenluftansaugung

Die für eine Druckbelüftungsanlage erforderliche Außenluftansaugung muss so angeordnet sein, dass kein Rauch angesaugt werden kann und sie von Fenstern, anderen Außenwandöffnungen und von Außenwänden mit brennbaren Baustoffen sowie Außenwandbekleidungen mindestens 2,5 m entfernt ist.

Bei der Bewertung der Ansaugstelle sind die Brandereignisse innerhalb des Gebäudes zu betrachten, die bestimmungsgemäß zu einer Auslösung der Druckbelüftungsanlage führen.

9.7.2 Außen- und Zuluftleitungen, Abluftleitungen

Diese Leitungen sind hinsichtlich der Feuerwiderstandsfähigkeit und Brandverhalten entsprechend den brandschutztechnischen Anforderungen an Lüftungsanlagen auszubilden. Brandschutzklappen und Rauchschutzklappen dürfen in diesen Leitungen nicht verwendet werden.

Werden mit der Außen- oder Zuluftleitung Wände oder Decken durchdrungen, für die Anforderungen an die Feuerwiderstandsfähigkeit bestehen, so muss die Feuerwiderstandsklasse der Lüftungsleitung der höchsten vorgeschriebenen Feuerwiderstandsfähigkeit, der von ihr durchdrungenen raumabschließenden Bauteile entsprechen.

Die Abluftleitung ist in der Regel als Entrauchungsleitung auszuführen. Ein Betonschacht gilt im Allgemeinen auch als ausreichend.

9.7.3 Überströmöffnungen

Um bei druckbelüfteten Sicherheitstreppe nräumen auch innerhalb der Vorräume einen Überdruck gegenüber den notwendigen Fluren zu erzeugen, sind Überströmöffnungen zwischen Treppenraum und den Vorräumen notwendig. Um eine Durchspülung des Vorraumes zur Ausspülung von ggf. eingedrunenem Rauch zu erreichen, werden auch innerhalb der Wand zwischen Vorraum und notwendigem Flur Öffnungsflächen benötigt.

An den Verschluss der Überströmöffnung zwischen Vorraum und Treppenraum werden keine Anforderungen hinsichtlich des Feuerwiderstands gestellt. Es reicht eine Klappe aus, die bei Luftströmung in Richtung Treppenraum schließt.

In der Wand zwischen Vorraum und notwendigem Flur oder Nutzungseinheit muss der Verschluss der Überströmöffnung die gleiche Feuerwiderstandsdauer wie die Wand aufweisen.

Vorrichtungen, die eine Schließvorrichtung beinhalten, die auf Rauch anspricht, sind aufgrund der beabsichtigten Rauchausspülung nicht geeignet.

Das Schutzziel (Verhinderung eines Brandüberschlags und des Übertritts von Rauch aus dem Flur in den Vorraum und den Treppenraum) lässt sich durch die Kombination der nachstehenden Komponenten erreichen:

- Brandschutzklappe nach DIN EN 15650 [28] mit CE-Kennzeichnung und Leistungserklärung; Mindestklassifikation: EI 90 (v_e i \leftrightarrow o) S – (300 Pa)
- durch Luftkraft öffnende und selbsttätig schließende Klappe (Rückschlagklappe)
- beidseitige Abschlussgitter

Durch diese Anordnung wird eine dreistufige Sicherheit erreicht:

- Im Ereignisfall (bei Betrieb der Druckbelüftung) strömt Luft aus dem rauchfreien Treppenraum durch das Überströmelement vom Treppenraum in den Vorraum bzw. vom Vorraum in den notwendigen Flur. Diese Durchströmung verhindert einen Raucheintritt in den zu schützenden Bereich durch die offene Brandschutzklappe.
- Bei einem eventuellen Ausfall der Druckbelüftung verhindert die Rückschlagklappe das Überströmen von Rauch unterhalb der Auslösetemperatur in den Treppenraum.
- Bei Überschreiten der Auslösetemperatur verschließt die Brandschutzklappe selbstständig den Querschnitt.

9.7.4 Akustische Anforderungen

Üblicherweise bestehen bei Druckbelüftungsanlagen keine akustischen Anforderungen zum Schutz der Allgemeinheit und Nachbarschaft im Sinne des Bundes-Immissionsschutzgesetzes, da die Anlage nur im Brandfall und im Probetrieb aktiviert wird.

Allerdings ist sicherzustellen, dass der von der Druckbelüftungsanlage erzeugte Schalldruckpegel die Verständlichkeit von Sprachalarmierungsanlagen und von Feuerwehr-Kommunikationssystemen nicht beeinträchtigt.

Entsprechend MVV TB [23] darf der durch die Druckbelüftungsanlage im Treppenraum erzeugte Schalldruckpegel ab einem Abstand zum Luftaustritt von 5 m nicht mehr als 85 dB(A) betragen; innerhalb von Feuerwehraufzügen ist nach DIN EN 81-72 [29] ein maximaler Schalldruckpegel von 80 dB(A) im Abstand von 0,5 m zu Feuerwehrechstellen einzuhalten.

9.7.5 Zuluft einbringung

Treppenräume

Die Durchströmung des Treppenraumes erzeugt Druckverluste. Demnach ergibt sich im Treppenraum eine Druckverteilung, die vom Zuluftvolumenstrom, von der Treppenraumgeometrie und der Lage der Zu- und Abluftstellen beeinflusst wird.

Um eine möglichst ausgeglichene Druckverteilung innerhalb von druckbelüfteten Treppen zu gewährleisten, sollte die Zuluft über mehrere Zuluftstellen in den Treppenraum gefördert werden.

Es wird empfohlen, mindestens im Kopf, im Fuß und in der Mitte des Treppenraumes Zuluftstellen vorzusehen, wobei ein Abstand von drei bis fünf Geschossen zwischen den Zuluftstellen eingehalten werden sollte. Bei großzügiger

Treppenraumgeometrie kann der Abstand größer ausfallen; ggf. kann bei niedrigeren Gebäuden auch nur eine Zuluftstelle ausreichend sein.

Bei der Anordnung und Dimensionierung der Zuluftstellen ist darauf zu achten, dass die von der Zuluft induzierte Raumströmung keine negativen Auswirkungen auf Türkräfte oder die beabsichtigte Türdurchströmung verursacht.

Grundsätzlich ist zu empfehlen, bei der Einströmgeschwindigkeit einen Betrag von ca. 3 m/s nicht zu überschreiten und die Zuluftstellen möglichst nicht in der Nähe von Türen anzuordnen.

Feuerwehraufzüge

Bei druckbelüfteten Feuerwehraufzugsschächten genügt im Regelfall eine Zuluftstelle am Fußpunkt des Schachtes.

Die Lage und Größe der Zuluftöffnung(en) muss mit der Planung der Feuerwehraufzüge abgestimmt werden, damit sichergestellt wird, dass die Einströmung zu keiner Beeinträchtigung der Aufzugstechnik (zum Beispiel durch Schwingen der Hängeseile infolge zu hoher Anströmgeschwindigkeit) kommt.

Die Zuluftöffnung muss oberhalb des maximal anzunehmenden Wasserstandes in der Aufzugsschachtgrube angeordnet sein.

9.7.6 Anforderungen an den Aufstellungsort des Zuluftventilators

Der Zuluftventilator einer Druckbelüftungsanlage kann innerhalb des Treppenraumes oder in einem separaten Raum aufgestellt werden, der keine weiteren Installationen und Brandlasten enthält.

Der Raum muss mit feuerbeständigen Wänden und Decken ausgeführt sein; Türen müssen feuerbeständig und rauchdicht sein. Wenn die Erschließung über einen notwendigen Flur erfolgt, können Türen feuerhemmend und

rauchdicht ausgeführt sein. Detaillierte Angaben finden sich im Brandschutznachweis/Brand-schutzkonzept.

Wird der Zuluftventilator nicht in einem feuerwiderstandsfähig abgetrennten Raum ohne Brandlasten angeordnet, so muss der Ventilator nebst Zubehör vollständig feuerwiderstandsfähig bekleidet werden. Für die Ausführung ist eine allgemeine oder vorhabenbezogene Bauartgenehmigung erforderlich.

9.7.7 Energieversorgung

Druckbelüftungsanlagen müssen ausreichend lang mit Strom versorgt werden und funktionsfähig bleiben; dies gilt als erfüllt bei Anschluss an eine Sicherheitsstromversorgungsanlage (siehe auch VDMA Informationsblatt 5 [30]).

9.7.8 Elektrische Leitungsanlagen

Die elektrischen Leitungsanlagen für Druckbelüftungsanlagen müssen so beschaffen oder durch Bauteile abgetrennt sein, dass die Anlagen im Brandfall ausreichend lang funktionsfähig bleiben (Funktionserhalt). Wenn eine Leitung in einem durch feuerwiderstandsfähige Bauteile abgetrennten, vom jeweiligen Brandereignis geschützten Bereich verlegt ist, gilt die Anforderung an den Funktionserhalt ebenso als erfüllt. Dieser Funktionserhalt muss bei möglicher Wechselwirkung mit anderen Anlagen oder deren Teilen gewährleistet bleiben. Die Dauer des Funktionserhalts muss mindestens 90 Minuten betragen in Hochhäusern sowie für Sonderbauten, für die solche Anlagen im Einzelfall verlangt werden. In allen anderen Fällen muss die Dauer des Funktionserhalts mindestens 30 Minuten betragen.

(Siehe auch VDMA Informationsblatt 6 [31]).

9.8 Fortluft/Abströmöffnungen

Um die Durchströmung offener Türquerschnitte im Brandgeschoss sicherzustellen, sind in den Nutzungseinheiten der Geschosse ausreichend groß bemessene Abströmwege vorzusehen.

Der Druckverlust des Abströmweges, bezogen auf den für die Türdurchströmung benötigten Volumenstrom, darf bei einer freien Abströmung nicht größer sein als die durch das Türkraftkriterium vorgegebene Maximal-Druckdifferenz. Es wird empfohlen, einen Abströmdruckverlust von 30 Pa nicht zu überschreiten.

Die Mündungen der Abströmwege sind so anzuordnen, dass die Wirksamkeit der Druckbelüftungsanlage auch bei Windeinwirkung gewährleistet ist.

Wenn als Abströmöffnungen Fenster verwendet werden, so sind diese auf mindestens zwei gegenüberliegenden Fassadenseiten anzuordnen oder es kann nachgewiesen werden, dass negative Windeinwirkungen hinreichend selten auftreten.

Erfolgt die Abströmung über Entrauchungsklapfen und einen vertikalen Schacht über Dach, so ist auch bei dessen Mündung sicherzustellen, dass die Abströmung windrichtungsunabhängig erfolgen kann.

Werden zur Kompensation von Abströmdruckverlusten Ventilatoren eingesetzt, so müssen diese im Regelfall als Entrauchungsventilatoren nach DIN EN 12101-3 [6] ausgeführt werden.

Damit sich bei geschlossenen Türen keine unzulässigen Unterdrücke einstellen, ist die Absaugleistung durch geeignete Stellglieder (z. B. durch Öffnen einer Bypassklappe) bei geschlossenen Türen weitgehend zu reduzieren. Auch bei dieser Regelung müssen nach spätestens 3 Sekunden stabile Zustände erreicht werden.

Kommen für die Regelung verwendete Elemente mit dem ggf. heißen Luft-/Rauchstrom in Kontakt (z. B. Absperrklappen oder mittels Frequenzumrichter betriebene Ventilatormotoren), so ist der Nachweis zu erbringen, dass diese Betriebsweise auch im Heißen dauerhaft funktionsfähig ist.

Mit der überarbeiteten DIN EN 12101-6 [24] steht ein Prüfverfahren zur Verfügung.

9.9 Druck-/Volumenstromregelung

Für den Zustand geöffneter Vorraumtüren im Brandgeschoss muss ein höherer Volumenstrom im Sicherheitstreppenraum zur Verfügung stehen als bei geschlossenen Türen, da zusätzlich zum Leckagevolumenstrom auch der benötigte Volumenstrom im offenen Türquerschnitt bereitgestellt werden muss. Diese unterschiedlichen Volumenstrom-Anforderungen sind durch ein geeignetes, ausreichend schnell regelndes System umzusetzen.

Entsprechend MVV TB [23] müssen sich spätestens drei Sekunden nach Öffnen oder Schließen einer Tür die geforderten Kriterien an die Durchströmungsgeschwindigkeit und die zulässige Türöffnungskraft stabil einstellen.

9.9.1 Selbsttätige (passive) Druckregelung

Eine passive Druckregelung erfolgt üblicherweise mithilfe von Druckregelklappen, die ohne Hilfsenergie über Luftkräfte öffnen und über Feder- und Gewichtskräfte selbsttätig wieder schließen.

Selbsttätige Druckregelklappen können so konfiguriert sein, dass sie mit dem Erreichen eines bestimmten Ansprechdrucks beginnen zu öffnen und dann – abhängig vom zu entlastenden Volumenstrom – eine Öffnungsposition einnehmen, die einen weitgehend konstanten Druckverlust produziert. Die Druckregelklappe ist somit

gleichermaßen Sensor und Aktor. Führungsgröße ist dabei immer die Druckdifferenz zwischen den beiden Seiten der Klappe.

Die Druckregelklappen werden üblicherweise im Kopf des Treppenraumes oder Feuerwehraufzugsschachtes angeordnet, so dass die Druckregelung gegenüber dem Atmosphärendruck im Dachbereich erfolgt.

Selbsttätige Druckregelsysteme haben sich in der Praxis als schnell regelnde, zuverlässige Systeme erwiesen, da sie wenige Komponenten beinhalten, deren eventueller Ausfall zum Versagen der Anlage führt.

9.9.2 Aktive Regelung

Aktive Druckregelsysteme basieren auf einer kontinuierlichen Messung der Druckdifferenzen mit Drucksensoren. Abhängig von der Abweichung zwischen dem gemessenen Wert und dem Sollwert werden dann geeignete Stellglieder betätigt. Häufig werden als Stellglieder Klappen mit schnell laufenden Stellantrieben oder Ventilatoren mit Drehzahlregelung (Frequenzumrichter) verwendet.

Aktive Systeme haben den Vorteil, dass die Differenzdruckmessung der Drucksensoren an beliebigen Stellen erfolgen kann und so zum Beispiel – abhängig vom auslösenden Geschoss – unterschiedliche Sensoren ausgelesen werden können. Damit kann auch auf den individuell im Geschoss vorherrschenden Druck reagiert werden.

Infolge der höheren Komplexität beinhaltet ein aktives System allerdings mehr Komponenten als ein passives System, so dass die Wahrscheinlichkeit eines Ausfalls höher ist.

9.10 Einflussgrößen auf die Druckverteilung

Die auf die Türen im Brandgeschoss wirkende Druckdifferenz wird durch mehrere Einflussgrößen bestimmt:

9.10.1 Überdruck im Treppenraumkopf

Üblicherweise wird an oberster Stelle des Treppenraumes oder des Feuerwehraufzuges eine Abströmöffnung oder eine Druckregelklappe vorgesehen. Der Überdruck an oberster Stelle des Druckraumes entspricht dem Druckverlust bei der Durchströmung dieser Abströmöffnung.

9.10.2 Druckverlust Treppenraum

Auch die Durchströmung des Treppenraumes erzeugt Druckverluste, die im isothermen Fall zu nach unten hin anwachsenden Druckdifferenzen zum jeweiligen Geschoss führen.

Der Widerstand des Treppenraumes wird durch seine Geometrie, insbesondere durch die Laufbreite, die Geschosshöhe, die Augenbreite und auch die Ausführung des Geländers beeinflusst.

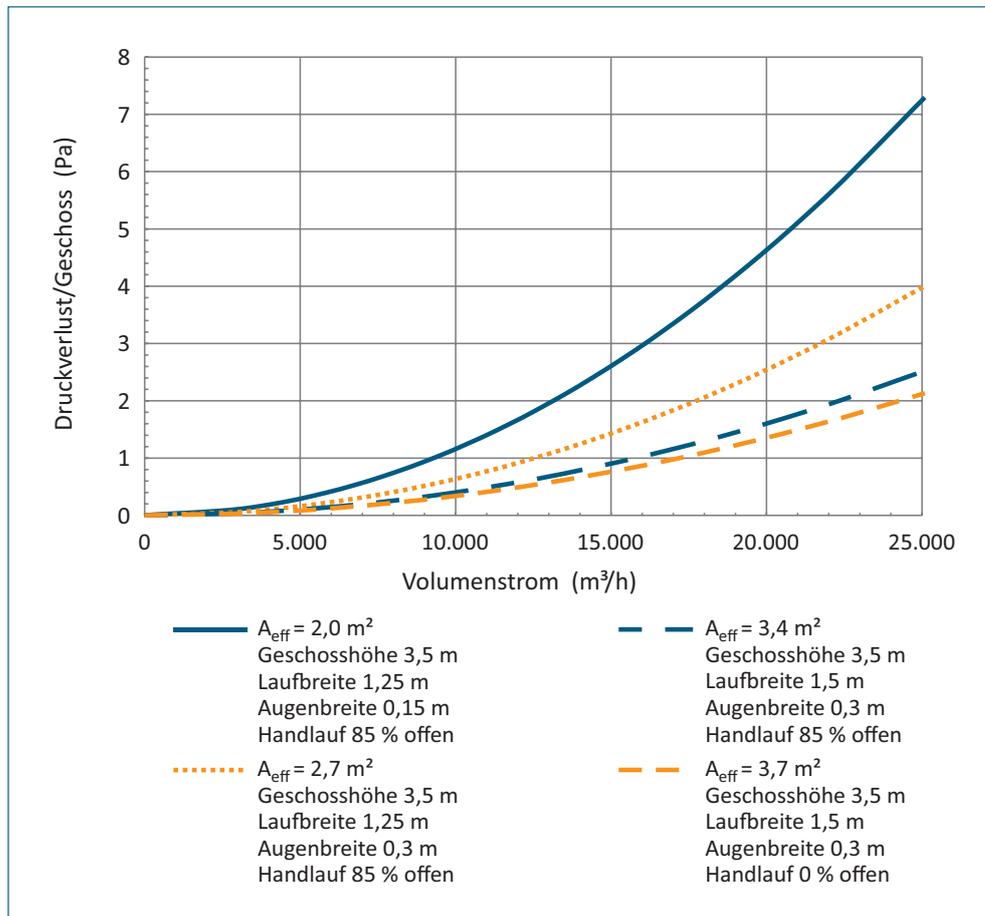


Bild 45: Treppenraumdruckverluste nach [32]
Quelle: Alfred Eichelberger GmbH & Co. KG

Der auf die Geschosshöhe bezogene Druckverlust folgt aus:

$$\Delta p_{TR} = \frac{\rho}{2} \cdot \left(\frac{\dot{V}}{A_{eff}} \right)^2 \quad (57)$$

mit

- Δp_{TR} Druckverlust im Treppenraum je Geschoss in P_a ,
- ρ Dichte der Luft in kg/m^3 ,
- \dot{V} Volumenstrom in m^3/s ,
- A_{eff} äquivalente Fläche in m^2 .

Beispiele für Druckverluste typischer Treppenraumgeometrien zeigen die Bilder 45 und 46.

Um den Betrag des Druckverlustes zu beeinflussen, werden in hohen Gebäuden grundsätzlich mehrere Einblasstellen in den Treppenraum vorgesehen. Ansteuerbare Jalousieklappen, die dann

in Abhängigkeit des Brandgeschosses geöffnet werden können, erweitern hierbei die Handlungsoptionen.

9.10.3 Auftrieb

Wenn zwischen dem Inneren des Gebäudes und Außen unterschiedliche Temperaturen herrschen und infolgedessen die Luftdichten innen und außen voneinander abweichen, kommt es zu einer aerostatischen Druckdifferenz, die mit der nachstehenden Gleichung ermittelt werden kann:

$$\Delta p = \Delta \rho \cdot g \cdot h. \quad (58)$$

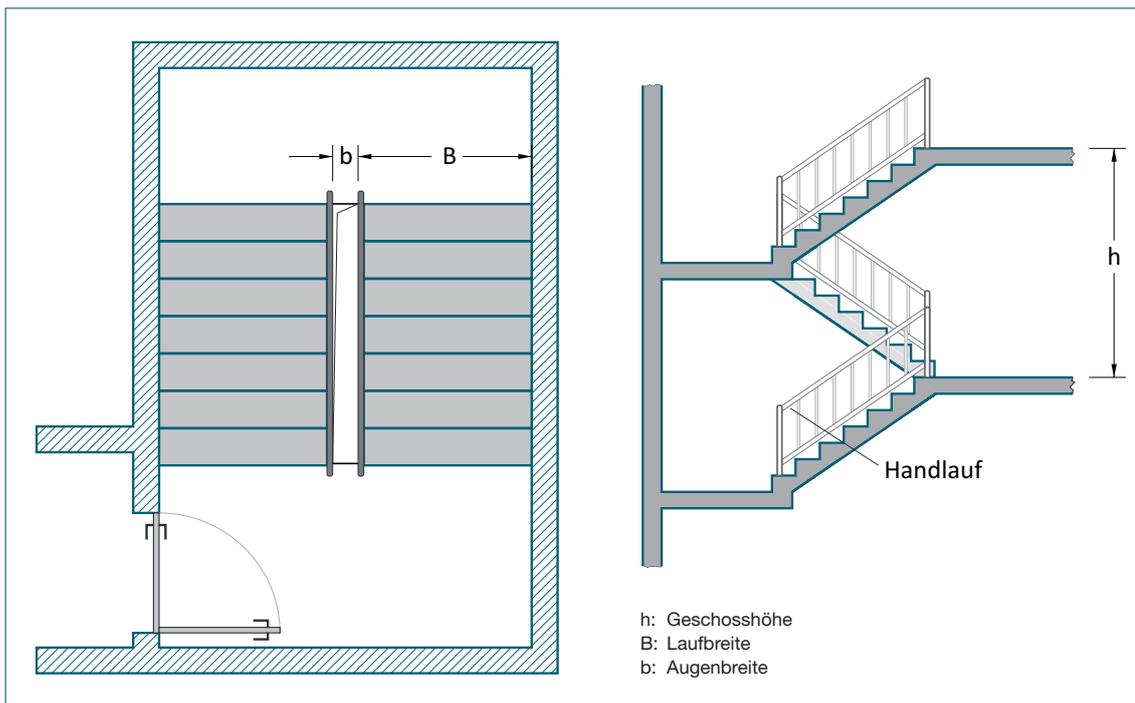


Bild 46: Typische Treppenraum-Geometrie
Quelle: Alfred Eichelberger GmbH & Co. KG

Hierbei bedeuten

Δp	aerostatische Druckdifferenz in Pa,
$\Delta \rho$	Dichtedifferenz der Luft innen und außen in kg/m^3 ,
g	Fallbeschleunigung; $g = m^3/s$,
h	Raumhöhe in m.

Im Winter resultiert daraus in Treppenträumen und Aufzuggschächten eine Auftriebswirkung.

Sofern entsprechende Strömungswege (z. B. über Leckageflächen) vorhanden sind, erfolgt eine aufwärts gerichtete Strömung.

Die Verteilung der aerostatischen Druckdifferenzen über der Gebäudehöhe ist abhängig von der Verteilung der Öffnungsflächen. Im Winter entsteht im oberen Bereich des Gebäudes gegenüber dem dortigen Atmosphärendruck ein Überdruck;

im unteren Bereich entsteht gegenüber Atmosphäre ein Unterdruck. Im mittleren Teil des Gebäudes bildet sich bei gleich verteilten Öffnungsflächen eine neutrale Druckebene ($\Delta p = 0$) (siehe Bild 47).

Bei nicht gleich verteilten Öffnungsflächen (z. B. infolge geöffneter Fenster) verschiebt sich die Lage der neutralen Druckebene hin zu diesem Geschoss.

Im Sommer – bei niedrigeren Temperaturen im Inneren des Gebäudes – entstehen analog die gleichen Effekte mit umgekehrten Vorzeichen – üblicherweise infolge der geringeren Temperaturdifferenz mit geringerem Betrag.

Bei aktivierter Druckbelüftungsanlage überlagern sich die thermisch bedingten Druckdifferenzen und die Druckdifferenzen infolge der Durchströmung des Treppenraumes.

Der Einfluss des thermischen Auftriebs ist auch bei geringeren Gebäudehöhen vorhanden, hat dort aber einen untergeordneten Stellenwert und wird bei der Auslegung von Druckbelüftungsanlagen unterhalb der Hochhausgrenze üblicherweise nicht betrachtet.

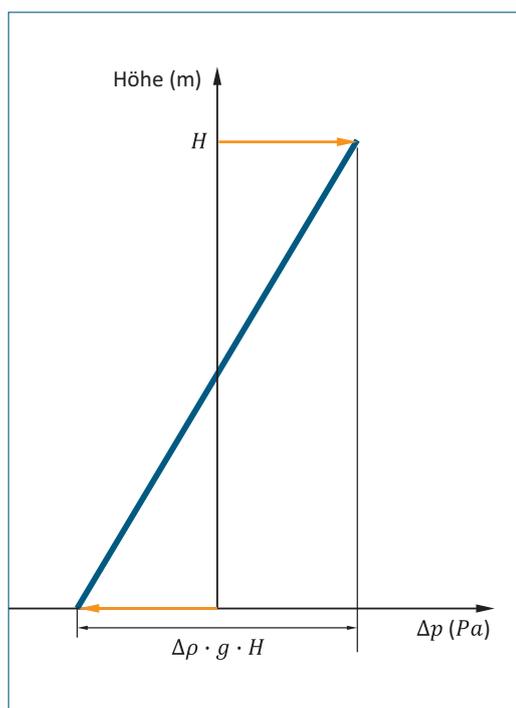


Bild 47: Darstellung der aerostatischen Druckverteilung über der Gebäudehöhe im Winter bei gleichverteilten Öffnungsflächen (neutrale Druckebene im mittleren Teil des Gebäudes)
Quelle: Alfred Eichelberger GmbH & Co. KG

10. Rauchableitung aus Aufzugsschächten

Die Landesbauordnungen schreiben eine Öffnung am Schachtkopf vor, um die Rauchableitung im Brandfall und die Lüftung im Regelbetrieb sowie im Störfall zu gewährleisten. Das Gebäudeenergiegesetz (GEG) [33] sieht für den Neubau eine geschlossene Gebäudehülle vor, damit Wärme-/Kälteenergie nicht entweicht.

Die permanente Öffnung von Aufzugsschächten, wie sie in vielen Bestandsgebäuden mit Aufzugsanlagen vorhanden ist, ist nicht mehr zeitgemäß und energetisch ineffizient. Hier geht dauerhaft geheizte oder gekühlte Luft verloren. Somit muss zusätzliche Energie aufgewendet werden, um die gewünschten klimatischen Bedingungen im Gebäude zu erzeugen. Dies hat einen erhöhten CO₂-Ausstoß zur Folge.

Die Lösung für diese Probleme sind Systeme zur Rauchableitung und Lüftung in Aufzugsschächten (RLA). Diese verschließen die Permanentöffnung und können sie je nach Bedarf im Brandfall oder im Regelbetrieb öffnen.

10.1 Rechtliches zur Öffnung am Schachtkopf oder Aufzugsmaschinenraum

Gemäß Musterbauordnung (§ 39 Abs. 3) [34] müssen:

- Fahrschächte zu lüften sein und eine Öffnung zur Rauchableitung mit einem freien Querschnitt von mindestens 2,5 % der Fahrschachtgrundfläche, mindestens jedoch 0,10 m² haben.
- Diese Öffnung darf einen Abschluss haben, der im Brandfall selbsttätig öffnet und von mindestens einer geeigneten Stelle aus bedient werden kann.
- Die Lage der Rauchaustrittsöffnungen muss so gewählt werden, dass der Rauchaustritt durch Windeinfluss nicht beeinträchtigt wird.

10.2 Schutzziele

Diese Forderungen sollen vermeiden, dass über einen Aufzugsschacht Brandgase und Brandrauch, die außerhalb des Aufzugsschachts entstehen, über die funktionsbedingte Spalte der Schachttüren in andere Geschosse übertragen werden können. Dies ist wichtig, da der Aufzugsschacht verschiedene Brandabschnitte eines Gebäudes miteinander verbindet.

10.3 System zur Rauchableitung aus einem Aufzugsschacht

Die vorgenannten Schutzziele könnten auch durch eine mit einem Wetterschutz ausgestattete Permanentöffnung am Schachtkopf erfüllt werden. Dies ist der Zustand, der in der überwiegenden Mehrheit der älteren Bestandsgebäude realisiert wurde und häufig bis heute Bestand hat.

Nach dem Inkrafttreten der Energieeinsparverordnungen (EnEV) und seit diese im Jahr 2020 durch das Gebäudeenergiegesetz (GEG) [33] abgelöst wurde, regelt dieses in §13, dass „ein Gebäude so zu errichten ist, dass die wärmeübertragende Umfassungsfläche einschließlich Fugen dauerhaft luftundurchlässig nach den anerkannten Regeln der Technik abgedichtet ist.“ Im Neubau werden daher in der Regel RLA-Systeme installiert. Diese zeichnen sich dadurch aus, dass sie die gesetzlich geforderte Öffnung zur Rauchableitung im Normalfall geschlossen halten und nur im Brandfall oder zur Lüftung des Aufzugsschachtes freigeben. In der Praxis werden die Systeme „fail-safe“ ausgeführt, sie öffnen also bei Ausfall der Energieversorgung selbsttätig.

Systeme zur Rauchableitung, Lüftung und Wärmeabfuhr in Aufzugsanlagen können sich u. a. aus folgenden Komponenten zusammensetzen:

- Steuerbare Verschlussklappe als Schachtabschluss zur Rauchableitung und/oder Lüftung. In der Praxis häufig als Natürliches Rauch- und Wärmeabzugsgerät (NRWG) ausgeführt.
- Sensorik zur Rauchdetektion/Lüftungsbedarfserkennung.
- Steuereinheit zur Signalverarbeitung und Energieversorgung.
- Elektrische Handsteuereinrichtungen/Rauchabzugstaster.
- Gegebenenfalls weitere Komponenten zur Signalisierung, zeitlich gesteuerten Lüftung, etc..

Es gibt unterschiedliche Möglichkeiten bei der Wahl der Raucherkennerung:

- **Ansaugrauchmelder bzw. umgangssprachlich Rauchansaugsysteme (RAS) nach DIN EN 54-20 [35]** sind Mehrpunktaktivmelder, die über einen Ventilator über ein Rohrleitungsnetz ständig Luft ansaugen. In einer Messkammer überprüft ein Rauchmelder die angesaugte Luft auf Rauchpartikel. Sie zeichnen sich durch geringen Platzbedarf im Aufzugsschacht aus. Nachteile sind großer Installationsaufwand sowie der Wartungsaufwand mit regelmäßigem Filterwechsel.
- **Punktmelder (wie z. B. nach DIN EN 54-7 [36])** sprechen auf die Änderung eines optischen Messwertes in der Umgebung eines festen Punktes an. Sie werden üblicherweise an der Schachtwand unter Verwendung von Montagewinkeln angeordnet. Die Anzahl der Punktmelder richtet sich nach der Schachthöhe. Mit regelmäßigen Funktionstests ist der Wartungsaufwand von Punktmeldern vergleichsweise gering; ihr Austausch erfolgt gemäß DIN 14675-1 [2] nach fünf oder acht Jahren.
- **Linienförmige Melder nach dem Durchlichtprinzip (DIN EN 54-12 [37])** arbeiten mit einer Infrarotlichtstrecke (Sender und Empfänger oder Sender/Empfänger und Reflektor). Sie erfordern kurze Montagezeiten bei geringem Platzbedarf und sind damit auch in der Projektierung einfach. Linienförmige Melder nach dem Durchlichtprinzip sind wartungsfreundlich, da lediglich die regelmäßige Reinigung der Optik erforderlich ist.

Im Bild 48 sind beispielhafte Systemzusammenstellungen und die erforderlichen Komponenten ersichtlich.

Hinweis: Die Rauchableitung aus einem Aufzugsschacht über einen Treppenraum wird im VDMA-Informationsblatt 11 beschrieben.

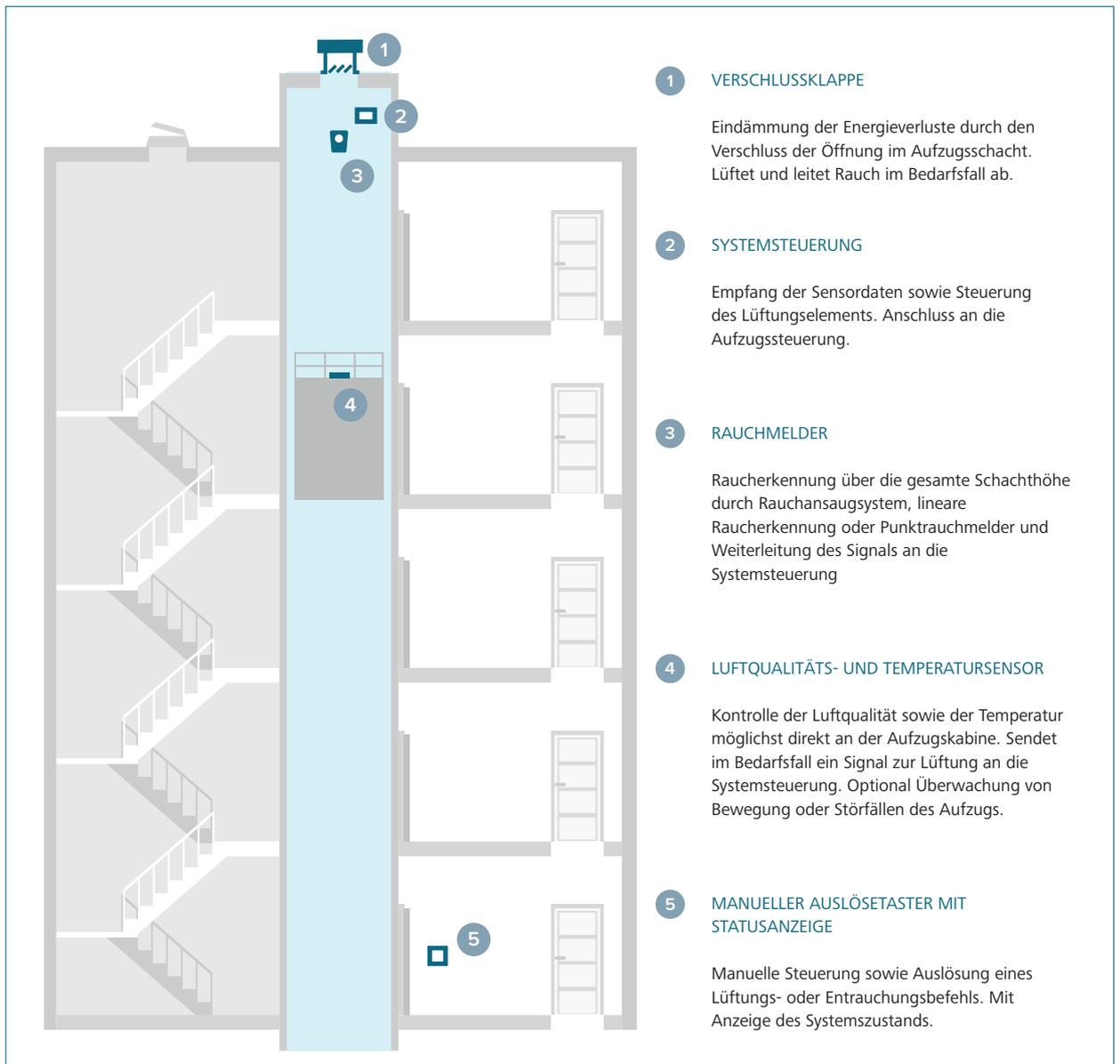


Bild 48: Systemkomponente bei Montage im Aufzugsschacht
Quelle: D+H Mechatronic AG

11. Beteiligte Autoren

An der 1. Auflage haben mitgewirkt:

Dipl.-Ing. Dieter Brein (†),
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Forschungsstelle für Brandschutztechnik,
Hertzstraße 16, 76187 Karlsruhe

Prof. Dr.-Ing. Rüdiger Detzer (†)

Prof. Dr.-Ing. Hans-Joachim Gerhardt (†) und
Dipl.-Ing. Bernd Konrath
I.F.I. Institut für Industrieaerodynamik GmbH
Welkenrather Straße 120, 52074 Aachen

Dipl.-Ing. Udo Jung
TROX GmbH
Heinrich-Trox-Platz 1, 47506 Neukirchen-Vluyn

Dipl.-Ing. Thomas Hegger
FVLR e.V.
Bad Meinberger Straße 1, 32760 Detmold

Prof. Dr.-Ing. Dietmar Hosser und
Dr.- Ing. Gary Blume
Technische Universität Braunschweig
Institut für Baustoffe, Massivbau und
Brandschutz,
Beethovenstraße 52, 38106 Braunschweig

Prof. Dr.-Ing. Wolfram Klingsch
BPK Brandschutz Planung Klingsch GmbH
Liebigstraße 20, 60323 Frankfurt am Main

An der 2. Auflage haben mitgewirkt:

Dipl.-Ing. Michael Buschmann
TROX GmbH
Heinrich-Trox-Platz 1, 47506 Neukirchen-Vluyn

Dipl.-Ing. Lutz Eichelberger
Alfred Eichelberger GmbH & Co. KG
Marientaler Straße 41, 12359 Berlin

Stephan Färber
D+H Mechatronik AG
Georg-Sasse-Straße 28–32, 22949 Ammersbek

Dipl.-Ing. Martin Müller
D+H Mechatronik AG
Georg-Sasse-Straße 2 –32, 22949 Ammersbek

Dipl.-Ing. (FH) Frank Wahl
TROX X-FANS GmbH
Heinz Trox Straße 1, 36251 Bad Hersfeld

**Sachgebietsleiter, Brandoberamtsrat
Jürgen Walter**
Branddirektion Frankfurt am Main,
Feuerwehrstraße 1, 60435 Frankfurt am Main

Prof. Dr.-Ing. Thomas Winkler
Technische Hochschule Mittelhessen
Wiesenstraße 14, 35390 Gießen

Diese Experten wurden beim VDMA
organisatorisch unterstützt durch
Christine Montigny (M. Sc.)
VDMA e.V.
Lyoner Straße 18, 60528 Frankfurt am Main

12. Quellenverzeichnis und weiterführende Literatur

- [1] DIN EN 16798-3:2022-12 – Entwurf; Energetische Bewertung von Gebäuden – Lüftung von Gebäuden – Teil 3: Lüftung von Nichtwohngebäuden – Leistungsanforderungen an Lüftungs- und Klimaanlageanlagen und Raumkühlsysteme (Module M5-1, M5-4); Deutsche und Englische Fassung prEN 16798-3:2022. DIN Media GmbH, Berlin
- [2] DIN 14675-1:2020-01; Brandmeldeanlagen – Teil 1: Aufbau und Betrieb. DIN Media GmbH, Berlin
- [3] Usemann, Klaus W.; Gebäudetechnik – Lexikon der Begriffe. Oldenbourg Industrieverlag München, 2001
- [4] DIN EN ISO 13943:2024-09; Brandschutz - Vokabular (ISO 13943:2023); Deutsche und Englische Fassung EN ISO 13943:2023. DIN Media GmbH, Berlin
- [5] DIN 14011:2018-01; Feuerwehrwesen – Begriffe. DIN Media GmbH, Berlin
- [6] DIN EN 12101-3:2015-12; Rauch- und Wärmefreihaltung – Teil 3: Bestimmungen für maschinelle Rauch- und Wärmeabzugsgeräte; Deutsche Fassung EN 12101-3:2015. DIN Media GmbH, Berlin
- [7] DIN EN 12101-2:2017-08; Rauch- und Wärmefreihaltung – Teil 2: Natürliche Rauch- und Wärmeabzugsgeräte; Deutsche Fassung EN 12101-2:2017. DIN Media GmbH, Berlin. DIN EN 12101-2:2003-09; Rauch- und Wärmefreihaltung – Teil 2: Natürliche Rauch- und Wärmeabzugsgeräte; Deutsche Fassung EN 12101-2:2003. DIN Media GmbH, Berlin (zurückgezogen, aber immer noch im EU Amtsblatt aufgeführt)
- [8] DIN 18232-2:2007-11; Rauch- und Wärmefreihaltung – Teil 2: Natürliche Rauchabzugsanlagen (NRA); Bemessung, Anforderungen und Einbau. DIN Media GmbH, Berlin
- [9] DIN 18232-5:2012-11; Rauch- und Wärmefreihaltung – Teil 5: Maschinelle Rauchabzugsanlagen (MRA); Anforderungen, Bemessung. DIN Media GmbH, Berlin
- [10] Zitzelsberger, J., Ostertag, D. und Kuhn J.; Bericht über Forschungsvorhaben „Rauchfreihaltung/Entrauchung von Räumen und Gebäuden – Grundlagenermittlung für die Erstellung bauaufsichtlicher Richtlinien (Entrauchung – Grundlagen), Band A: Entrauchungsanlagen, DIBt-Aktenzeichen: P 32-5-18.20-940/00, T 3029, Fraunhofer IRB Verlag, München, 2003, S.17
- [11] VDI 6019 Blatt 1:2006-05: Ingenieurverfahren zur Bemessung der Rauchableitung aus Gebäuden – Brandverläufe, Überprüfung der Wirksamkeit. DIN Media GmbH, Berlin.
- [12] NFPA 204: Standard for smoke and heat venting, NFPA, Quincy, Massachusetts, 2007
- [13] VDI 2053 Blatt 2:2024-05; Raumlufttechnik – Garagen – Entrauchung (VDI-Lüftungsregeln). DIN Media GmbH, Berlin
- [14] Mulholland, G. W., Croarkin, C.: Specific Extinction Coefficient of Flame Generated Smoke, Fire Mater. 24, S. 227-230, 2000.
- [15] Tewarson, A.: Generation of Heat and Chemical Compounds in Fires, SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, 2nd Edition, Section 3, Chapter 4, National Fire Protection Association, Quincy, MA, 1995.
- [16] Jin, T.: Visibility and Human Behavior in Fire Smoke, SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, 3rd Edition, Section 2, Chapter 4, National Fire Protection Association, Quincy, MA, 2002.
- [17] VDI 3803 Blatt 6:2023-07 – Entwurf; Raumlufttechnik – Luftleitungssysteme – Druckverluste und wärmetechnische Berechnungen (VDI-Lüftungsregeln). DIN Media GmbH, Berlin

- [18] Idelchik, I. E.; Handbook of Hydraulic Resistance, 4th edition, Begell House, Redding, CT, 2007
- [19] DIN EN 12101-8:2011-08; Rauch- und Wärmefreihaltung – Teil 8: Entrauchungsklappen; Deutsche Fassung EN 12101-8:2011. DIN Media GmbH, Berlin
- [20] DIN EN 12101-1:2018-10 – Entwurf; Rauch- und Wärmefreihaltung – Teil 1: Bestimmungen für Rauchschrzen; Deutsche und Englische Fassung prEN 12101-1:2018. DIN Media GmbH, Berlin
- [21] PD CEN/TS 12101-11:2022-09; Rauch- und Wärmefreihaltung – Rauchfreihaltung von Parkhäusern (Smoke and heat control systems – Horizontal flow powered ventilation systems for enclosed car parks)
- [22] Muster-Richtlinie über den Bau und Betrieb von Hochhäusern (Muster-Hochhaus-Richtlinie – MHHR) Fassung April 2008, zuletzt geändert durch Beschluss der Fachkommission Bauaufsicht vom Februar 2012
- [23] Muster-Verwaltungsvorschrift Technische Baubestimmungen (MVV TB) Ausgabe 2024/1 (28.08.2024)
- [24] DIN EN 12101-6:2022-11; Rauch- und Wärmefreihaltung – Teil 6: Festlegungen für Differenzdrucksysteme – Bausätze. DIN Media GmbH, Berlin
- [25] DIN EN 12101-13:2022-11; Rauch- und Wärmefreihaltung – Teil 13: Differenzdrucksysteme – Rauchschutz-Druckanlagen (RDA) – Planung, Bemessung, Einbau, Abnahmeprüfung, regelmäßige Funktionsprüfung und Instandhaltung. Deutsche Fassung EN 12101-13:2022. DIN Media GmbH, Berlin.
- [26] VDMA-Einheitsblatt 24188:2011-06; Rauchschutzmaßnahmen in Treppenträumen – Rauchableitung, Rauchverdünnung, Rauchfreihaltung. DIN Media GmbH, Berlin
- [27] John R.: Lüftungssysteme zur Rauchfreihaltung von Treppenträumen, Teil 6, Seite 836, Ki Klima – Kälte – Heizung 11/1979
- [28] DIN EN 15650:2010-09; Lüftung von Gebäuden – Brandschutzklappen; Deutsche Fassung EN 15650:2010. DIN Media GmbH, Berlin
- [29] DIN EN 81-72:2020-11; Sicherheitsregeln für die Konstruktion und den Einbau von Aufzügen - Besondere Anwendungen für Personen- und Lastenaufzüge – Teil 72: Feuerwehraufzüge; Deutsche Fassung EN 81-72:2020. DIN Media GmbH, Berlin
- [30] VDMA Informationsblatt Nr. 5 „Stromversorgung in sicherheitstechnischen Anlagen – Maschinelle Rauchabzugsanlagen“ (Februar 2019)
- [31] VDMA Informationsblatt Nr. 6 „Funktionserhalt von elektrischen Leitungsanlagen – Maschinelle Rauchabzugsanlagen“ (Januar 2017)
- [32] Ostertag, D., Kuhn J. und Zitzelsberger J.; Bericht über Forschungsvorhaben „Rauchfreihaltung/Entrauchung von Räumen und Gebäuden Grundlagenermittlung für die Erstellung bauaufsichtlicher Richtlinien (Entrauchung – Grundlagen), Band B: Überdruckbelüftungsanlagen für Sicherheitstreppe in Hochhäusern“, T 3029, Fraunhofer IRB Verlag, München, 2002
- [33] GEG – Gesetz zur Einsparung von Energie und zur Nutzung erneuerbarer Energien zur Wärme- und Kälteerzeugung in Gebäuden* (Gebäudeenergiegesetz – GEG); Ausfertigungsdatum: 08.08.2020; „Gebäudeenergiegesetz vom 8. August 2020 (BGBl. I S. 1728), das zuletzt durch Artikel 1 des Gesetzes vom 16. Oktober 2023 (BGBl. 2023 I Nr. 280) geändert worden ist

- [34] Musterbauordnung – MBO – Fassung November 2002 zuletzt geändert durch Beschluss der Bauministerkonferenz vom 22./23.09.2022
- [35] DIN EN 54-20:2009-02; Brandmeldeanlagen – Teil 20: Ansaugrauchmelder; Deutsche Fassung EN 54-20:2006+AC:2008. DIN Media GmbH, Berlin
- [36] DIN EN 54-7:2018-10; Brandmeldeanlagen – Teil 7: Rauchmelder – Punktförmige Rauchmelder nach dem Streulicht-, Durchlicht- oder Ionisationsprinzip; Deutsche Fassung EN 54-7:2018. DIN Media GmbH, Berlin
- [37] DIN EN 54-12:2015-10; Brandmeldeanlagen – Teil 12: Rauchmelder - Linienförmiger Melder nach dem Durchlichtprinzip; Deutsche Fassung EN 54-12:2015 und Berichtigung 1:2018-08; Brandmeldeanlagen – Teil 12: Rauchmelder - Linienförmiger Melder nach dem Durchlichtprinzip; Deutsche Fassung EN 54-12:2015, Berichtigung zu DIN EN 54-12:2015-10 DIN Media GmbH, Berlin

DIN EN 12101-7:2011-08, Rauch- und Wärmefreihaltung – Teil 7: Entrauchungskanalstücke; Deutsche Fassung EN 12101-7:2011. DIN Media GmbH, Berlin

DIN EN 12101-10:2006-01, Rauch- und Wärmefreihaltung – Teil 10: Energieversorgung; Deutsche Fassung EN 12101-10:2005. DIN Media GmbH, Berlin

DIN EN 12101-10 Berichtigung 1:2009-07, Rauch- und Wärmefreihaltung – Teil 10: Energieversorgung; Deutsche Fassung EN 12101-10:2005, Berichtigung zu DIN EN 12101-10:2006-01; Deutsche Fassung EN 12101-10:2005/AC:2007. DIN Media GmbH, Berlin

Weiterführende Literatur

Leitfaden Ingenieurmethoden des Brandschutzes, Technischer Bericht 04/01, 4. Überarbeitete und ergänzte Auflage, Vereinigung zur Förderung des Deutschen Brandschutzes (2020), Herausgeber: Jochen Zehfuß

Prof. Dr.-Ing. R. Detzer; Rauchausbreitung in Gebäuden, BrandAktuell Ausgabe 2/98, zu beziehen über www.fvlr.de

Prof. Dr. H.J. Gerhardt; Überprüfung der 1 NRWG/200 m²-Regel; Aachen; 2010, zu beziehen über www.fvlr.de

Überprüfung der Rauchabschnittsgröße; Parameterstudie, Prof. Dr.-Ing. R. Detzer, Hamburg; erhältlich über www.fvlr.de

FVLR-Richtlinie 06:2010-08, Sicherstellung der Wirkungsweise von beweglichen Rauchschürzen in Hallen mit Laufkränen, FVLR Fachverband Tageslicht und Rauchschutz e. V.

**VDMA-Informationsblätter aus der Reihe
„Sicherheit in Gebäuden und
Infrastruktureinrichtungen“**

Informationsblatt Nr. 1 „Zuluftführung für
maschinelle Rauchabzugsanlagen“ (07/2017)

Informationsblatt Nr. 2 „Wechselwirkung von
Löschanlagen und MRA/NRA“ (01/2017)

Informationsblatt Nr. 3 „Notwendige Zeiten für
Selbstrettung, Rettung und Löschangriff“
(05/2023)

Informationsblatt Nr. 4 „Prinzipien zur Rauch-
ableitung“ (01/2017)

Informationsblatt Nr. 5 „Stromversorgung in
sicherheitstechnischen Anlagen – Maschinelle
Rauchabzug-Anlagen“ (02/2019)

Informationsblatt Nr. 6 „Funktionserhalt von
elektrischen Leitungsanlagen – Maschinelle
Rauchabzugsanlagen“ (01/2017)

Informationsblatt Nr. 7 „Anforderung an die
Entrauchung in den neuen Muster- Sonderbau-
richtlinien/-verordnungen“ (01/2017)

Informationsblatt Nr. 8 „Verwendung von Brand-
schutz- und Entrauchungsklappen mit CE-Kenn-
zeichnung“ (01/2020)

Informationsblatt Nr. 9 „Abschlüsse für Über-
strömöffnungen“ (01/2020)

Informationsblatt Nr. 10 „Sichere Treppenräume
in Gebäuden unterhalb der Hochhausgrenze mit
Druckbelüftungsanlagen“ (01/2020)

Informationsblatt Nr. 11 „Rauchableitung aus
einem Aufzugsschacht über einen Treppenraum
– Sonderlösung“ (04/2025)

Informationsblatt Nr. 12 „Nutzung von Ent-
rauchungs-/Lüftungsanlagen zur Reduktion von
infektiösen Aerosolen in Gebäuden“ (09/2021)

Anhang A: Brandzersetzungsprodukte, Herkunft und Zusammensetzung

Untersuchungen über die Brandzersetzungsprodukte verschiedener Brandgüter führen tendenziell immer zu denselben Ergebnissen. So besteht hinsichtlich der anorganischen Brandzersetzungsprodukte ein direkter Zusammenhang zwischen Brandgut und Rauch. Es kommen nur diejenigen chemischen Elemente im Rauch vor, die auch im Brandgut enthalten waren.

Bei den **anorganischen Brandgasen** handelt es sich nahezu ausschließlich um die Gase Kohlenmonoxid, Kohlendioxid, Cyanwasserstoff (Blausäure), nitrose Gase wie Stickstoffdioxid, des Weiteren Ammoniak, Phosgen, Chlorwasserstoff und Chlor, Schwefelwasserstoff, Schwefeldioxid sowie Phosphorwasserstoff.

Zu den **organischen Brandzersetzungsprodukten** zählen hauptsächlich aromatische Kohlenwasserstoffe (Aromaten) wie Benzol und Styrol und polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK) wie Benzpyren sowie Ruß.

Blausäure, Stickoxide oder Ammoniak können demnach nur dann Bestandteile des Rauchs sein, wenn stickstoffhaltige Brandgüter am Brandgeschehen beteiligt waren.

Bei jedem Brand kohlenstoffhaltigen Brandguts – und damit bei allen Bränden im Wohn- und gewerblichen Bereich – kommen Kohlenmonoxid und Kohlendioxid in unterschiedlichen Konzentrationen vor.

Für das Vorkommen organischer Brandzersetzungsprodukte gilt: wenn organisches, also kohlenstoffhaltiges Material verbrennt, findet man überwiegend Aromaten im Rauch, unabhängig von der Zusammensetzung des Brandguts.

Diese Aromaten entstehen durch den „Transformationsprozess“ der Pyrolyse in der Flamme, egal, ob Würfelzucker, Holz, PVC-Rohr, Altpapier, Kakaopulver oder PE-Folie verbrennt. Die leichtflüchtigen Aromaten verbinden sich dann zu den schwerflüchtigen PAK und schließlich zu Ruß.

Wird der Rauch nicht abgeführt, kann sich die Rauchzusammensetzung mit der Zeit im Raum verändern, da die organischen Rauchbestandteile in der Rauchschiicht miteinander reagieren können. Dadurch können weitere gefährliche Reaktionsprodukte entstehen. Beispielsweise bilden sich immer mehr kurzkettige Aldehyde wie das Acrolein, die stark reizend auf die Atemwege wirken und auch in größerer Entfernung vom Brandherd noch wahrnehmbar sind.

Wie bei den anorganischen, so ist auch bei den organischen Brandzersetzungsprodukten die Konzentration der einzelnen Rauchbestandteile abhängig von den Brandbedingungen wie Sauerstoffzufuhr, Feuchte oder Temperatur.

Alle anorganischen Brandgase sind bei entsprechender Konzentration giftig. Die Konzentration des Kohlenmonoxids kann einstellige Prozentzahlen (mehrere zehntausend Parts per Million (ppm)) erreichen und ist damit durch Häufigkeit, Menge und Toxizität eine der gefährlichsten anorganischen Verbindungen im Rauch. Schon geringe Konzentrationen machen Menschen orientierungslos, erschweren die Bewegung, führen zu einer Fluchtunfähigkeit und bei steigender Dosis letztlich zum Tod. Fehlender Brandgeruch ist kein sicheres Indiz dafür, dass kein Kohlenmonoxid vorhanden ist.

Sachschäden richten die anorganischen Brandgase in der Regel nicht an, da sie nach dem Brand durch gezielte Lüftung und damit Verdünnung fast vollständig nach außen abgeführt werden können mit der Folge, dass deren Verweilzeit im Raum begrenzt bleibt. Eine Ausnahme bilden saure Gase wie der Chlorwasserstoff (HCl), die sich korrosiv auf im Raum befindliche Gegenstände und auch Bauprodukte auswirken können.

Organische Brandzersetzungsprodukte können Krebs erzeugen. Ihre Toxizität hängt ebenfalls von der aufgenommenen Menge und der Häufigkeit der Exposition ab.

Sie verursachen zudem oft immense Sachschäden, da sie sich in den Innenräumen an den Oberflächen niederschlagen und an den Gegenständen haften bleiben. So kommt es beispielsweise bei Bränden in der Lebensmittelbranche und anderen produzierenden Bereichen oft zu enormen Brandfolgeschäden, weil die Maschinen aufwendig von den organischen Rauchbestandteilen gesäubert werden müssen, dadurch lange Betriebsausfallzeiten entstehen und die gelagerten Produkte nicht mehr zum Verkauf geeignet sind.

Anhang B: Weitere Diagramme zu Kapitel 7

Bild 49

Erforderlicher Entrauchungsvolumenstrom bei der Rauchableitung durch Schichtung; Höhe der raucharmen Schicht: $h_{SG} = 2,5 \text{ m}$

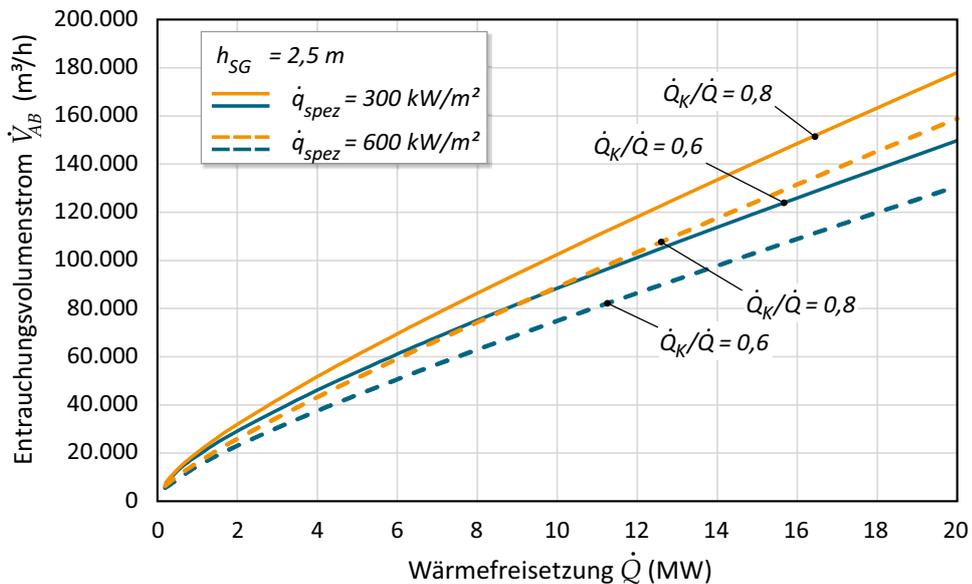
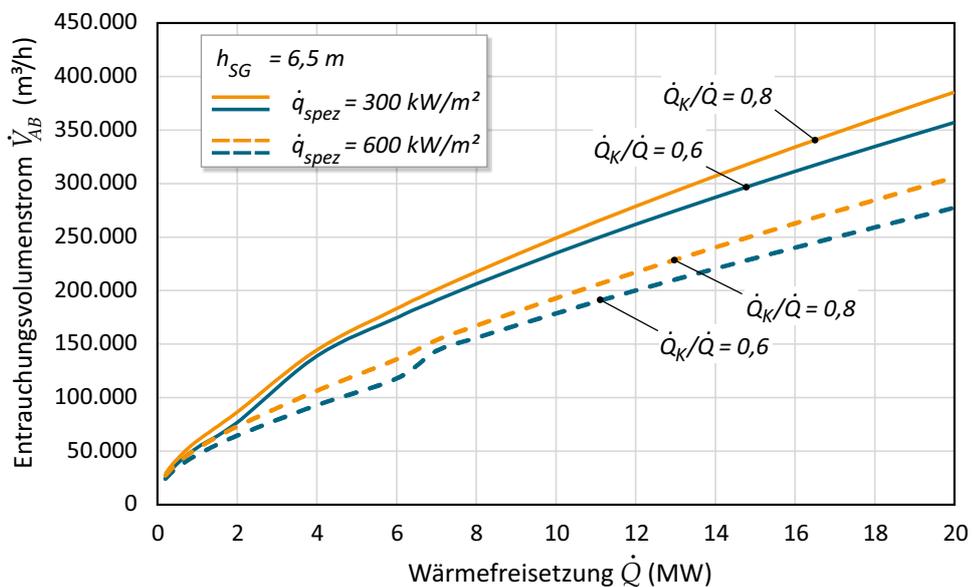


Bild 50

Erforderlicher Entrauchungsvolumenstrom bei der Rauchableitung durch Schichtung; Höhe der raucharmen Schicht: $h_{SG} = 6,5 \text{ m}$



Quelle: VDMA

Bild 51

Bezogener Extinktionskoeffizient in Abhängigkeit des Raumvolumens und des Entrauchungsvolumenstroms, 5 Minuten nach Brandbeginn

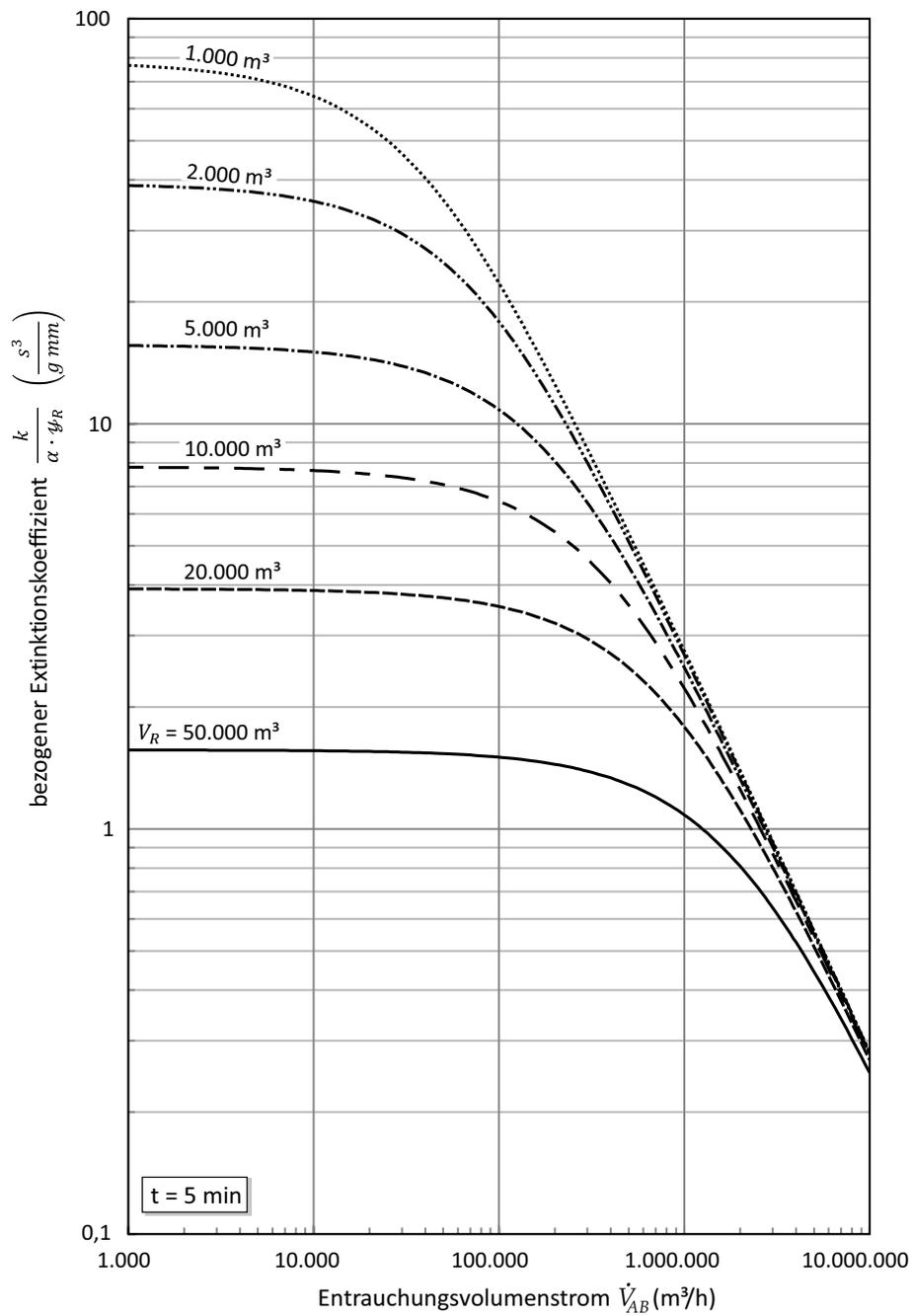
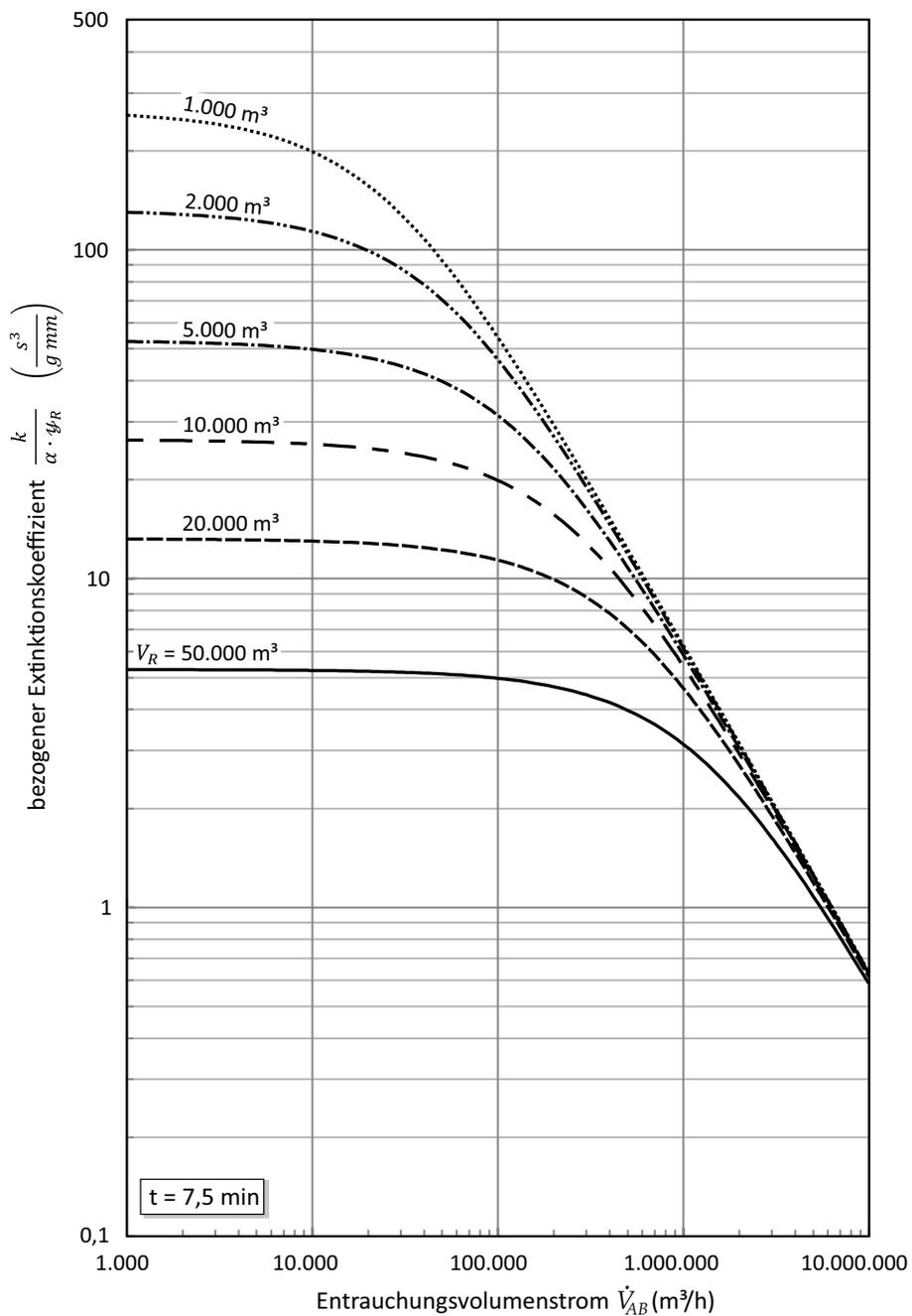


Bild 52

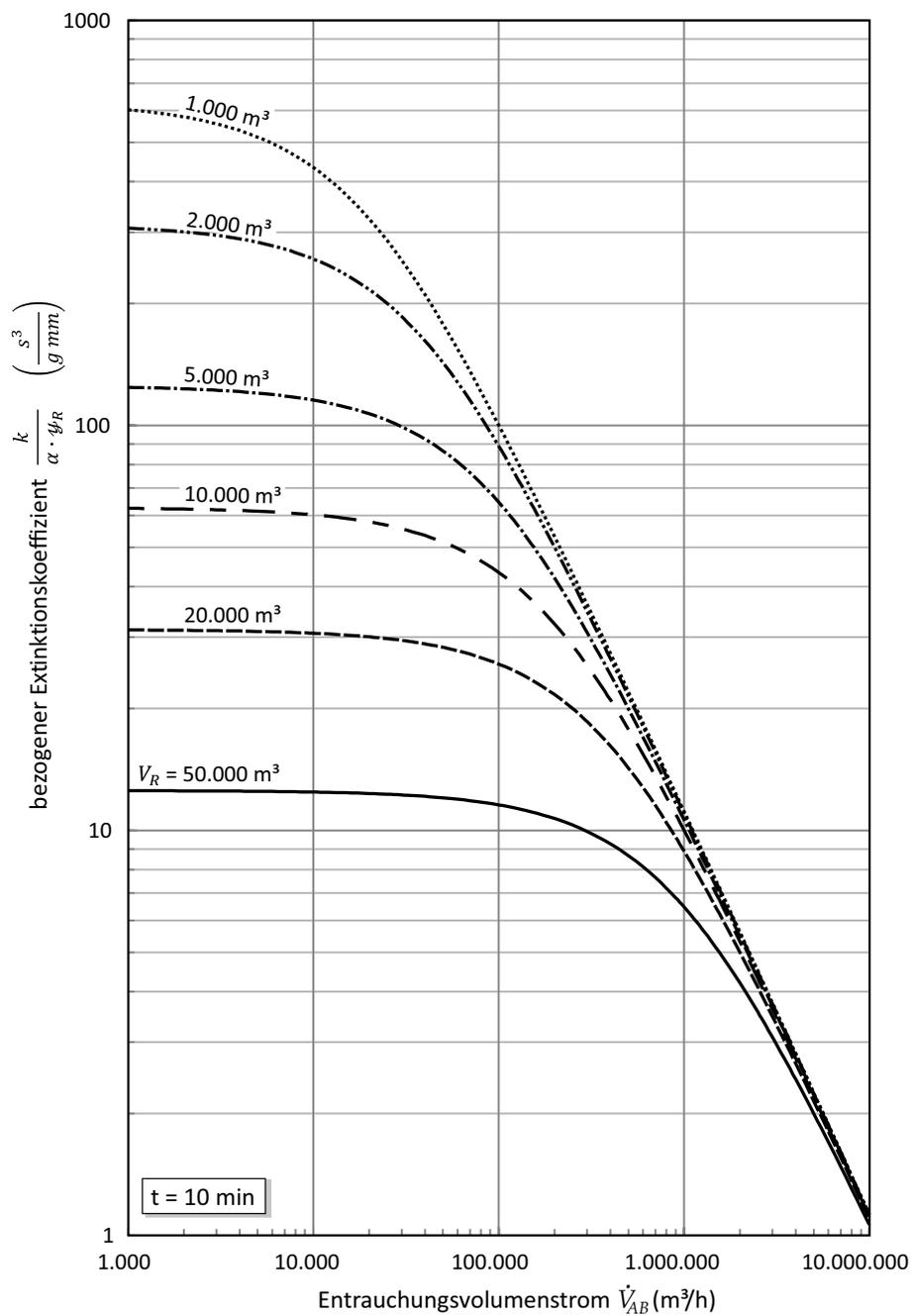
Bezogener Extinktionskoeffizient in Abhängigkeit des Raumvolumens und des Entrauchungsvolumenstroms, 7,5 Minuten nach Brandbeginn



Quelle: VDMA

Bild 53

Bezogener Extinktionskoeffizient in Abhängigkeit des Raumvolumens und des Entrauchungsvolumenstroms, 10 Minuten nach Brandbeginn



Quelle: VDMA

Anhang C: Berechnungsbeispiele

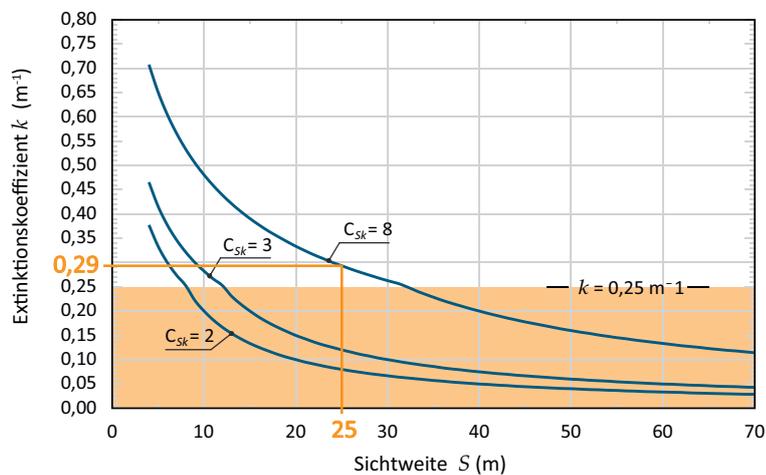
C.1 Entrauchung durch Verdünnung

Für einen Ausstellungsraum soll der Entrauchungsvolumenstrom bestimmt werden, der erforderlich ist, um innerhalb der ersten fünf Minuten nach Ausbruch eines Brandes Bedingungen für die Selbstrettung von Personen zu gewährleisten.

Randbedingungen:

Grundfläche des Raums: $A_R = 41 \text{ m} \times 12,2 \text{ m} = 500 \text{ m}^2$
 (lichte) Raumhöhe: $H_R = 4 \text{ m}$
 erforderliche Sichtweite: $S = 25 \text{ m}$
 zu erkennendes Objekt: hinterleuchtetes Rettungswegzeichen
 Brandlast: vorwiegend Holz bzw. zellulosehaltige (Ausstellungs-)Gegenstände

- Bestimmung des max. zulässigen Extinktionskoeffizienten nach Bild 16 mit $S = 25 \text{ m}$ und $C_{sk} = 8$ (hinterleuchtetes Rettungswegzeichen)



Quelle: VDMA, TROX X-FANS GmbH

Aus dem Diagramm folgt für den Extinktionskoeffizienten $k = 0,29 \text{ m}^{-1}$.

2. Bestimmung des bezogenen Extinktionskoeffizienten $\frac{k}{\alpha \cdot Y_R}$

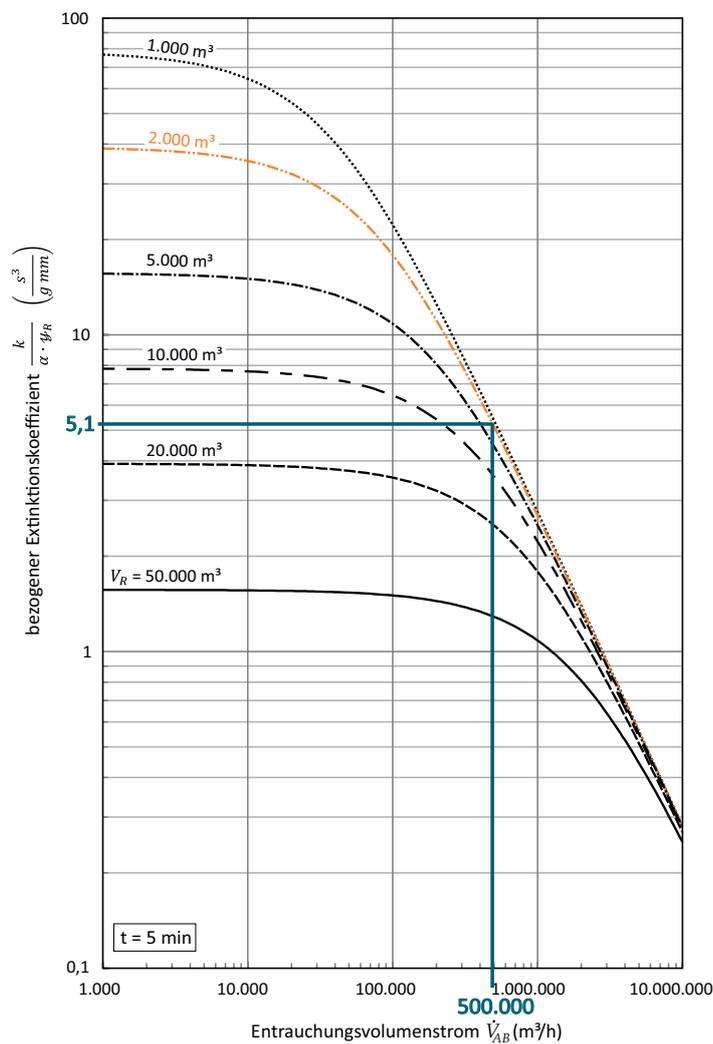
Für den Brennstoff Holz gilt für die Rußausbeute $Y_R = 1,2 \cdot 10^{-3} \text{ g/kJ}$ (siehe Tabelle 2). Nach VDI 6019 Blatt 1 [11] ist für Ausstellungsräume eine schnelle Brandausbreitung anzunehmen; für den Brandintensitätskoeffizienten folgt damit aus Tabelle 4: $\alpha = 0,047 \text{ kW/s}^2$

Mit diesen Werten resultiert für den bezogenen Extinktionskoeffizienten

$$\frac{k}{\alpha \cdot Y_R} = \frac{0,29 \text{ m}^{-1}}{0,047 \frac{\text{kW}}{\text{s}^2} \cdot 1,2 \cdot 10^{-3} \frac{\text{g}}{\text{kJ}}} \cdot \frac{1 \text{ m}}{1.000 \text{ mm}} = 5,14 \frac{\text{s}^3}{\text{g} \cdot \text{mm}}$$

3. Ermittlung des erforderlichen Entrauchungsvolumenstroms zur Verdünnung

Der erforderliche Volumenstrom ergibt sich aus Bild 51 (Anhang B) für $t = 5 \text{ min}$ bei einem Rauminhalt von $V_R = A_R \cdot H_R = 500 \text{ m}^2 \cdot 4 \text{ m} = 2.000 \text{ m}^3$ zu $500.000 \text{ m}^3/\text{h}$.



C.2 Entrauchung durch Schichtung mit MRA

Für den in C.1 beschriebenen Ausstellungsraum soll der Volumenstrom für die maschinelle Entrauchung durch Schichtung ermittelt werden. Dieser Volumenstrom soll so bemessen sein, dass für die Dauer der Selbstrettung (bis zu fünf Minuten nach Ausbruch eines Brandes) eine raucharme Schicht mit einer Höhe von 2,5 m aufrecht erhalten bleibt.

1. Bestimmung der relevanten Wärmefreisetzungsrate nach Gleichung (43) und der Größe der Brandfläche

Mit dem Brandintensitätskoeffizienten $\alpha = 0,047 \text{ kW/s}^2$ gem. Tabelle 4 für eine schnelle Brandausbreitung (vgl. auch Beispiel C.1) folgt für die Wärmefreisetzungsrate fünf Minuten nach Ausbruch des Brandes:

$$\begin{aligned}\dot{Q} &= \alpha \cdot t^2 \\ &= 0,047 \text{ kW/s}^2 \cdot 300^2 \text{ s}^2 = 4.230 \text{ kW}.\end{aligned}$$

Nach VDI 6019 Blatt 1 [11] ist für Ausstellungsräume eine spezifische Wärmefreisetzungsrate von $\dot{q} = 500 \text{ kW/m}^2$ anzunehmen. Hieraus ergibt sich für die Größe der Brandfläche

$$A_B = \frac{\dot{Q}}{\dot{q}} = \frac{4.230 \text{ kW}}{500 \frac{\text{kW}}{\text{m}^2}} = 8,46 \text{ m}^2$$

und ihr Durchmesser ist

$$D_B = \sqrt{\frac{4 \cdot A_B}{\pi}} \cong 3,3 \text{ m}.$$

2. Bestimmung des abzuführenden Massenstroms $\dot{m}_{AS}(h_{SG})$ durch Auswertung der Gleichungen (2) oder (3) an der Stelle $z = h_{SG} = 2,5 \text{ m}$.

Mit dem Durchmesser der Brandfläche ergibt sich für die Länge des Strahlformierungsbereichs

$$l_{SF} \approx 1,8 \cdot D_B = 5,94 \text{ m}.$$

Weil $h_{SG} < l_{SF}$ liegt die Höhe, in der der Massenstrom bestimmt werden soll, im Strahlformierungsbereich; zur Auswertung ist daher Gleichung (2) zu verwenden:

$$\begin{aligned}\dot{m}_{AB} = \dot{m}_{AS}(z = h_{SG}) &= 0,189 \cdot \pi \cdot D_B \cdot h_{SG}^{1,5} \\ &= 0,189 \cdot \pi \cdot 3,3 \text{ m} \cdot (2,5 \text{ m})^{1,5} \cong 7,75 \text{ kg/s}.\end{aligned}$$

3. Bestimmung des Entrauchungsvolumenstroms aus Gleichung (12)

$$\dot{V}_{AB} = \frac{\dot{m}_{AB}}{353,18 \frac{\text{K kg}}{\text{m}^3}} \cdot \left(\frac{0,7 \cdot \dot{Q}_K}{\dot{m}_{AB} \cdot c_p} + T_{ZU} \right)$$

mit $\dot{m}_{AB} = \dot{m}_{AS}(z = h_{SG})$ und $\dot{Q}_K = 0,7 \cdot \dot{Q}$ (Gleichung (5))

$$\dot{V}_{AB} = \frac{7,75 \text{ kg/s}}{353,18 \frac{\text{K kg}}{\text{m}^3}} \cdot \left(\frac{0,7 \cdot 0,7 \cdot 4.230 \text{ kW}}{7,75 \text{ kg/s} \cdot 1,01 \text{ kJ}/(\text{kg K})} + 293,15 \text{ K} \right) \cong 12,25 \text{ m}^3/\text{s} = 44.100 \text{ m}^3/\text{h}.$$

4. Ermittlung des erforderlichen Entrauchungsvolumenstroms zur Einhaltung einer mittleren Rauchschichttemperatur von $T_{AB,grenz} = 200 \text{ }^\circ\text{C}$ nach Gleichung (14):

$$\begin{aligned} \dot{V}_{AB} &= \frac{0,7 \cdot \dot{Q}_K \cdot T_{AB,grenz}}{353,18 \frac{\text{K kg}}{\text{m}^3} \cdot c_p \cdot (T_{AB,grenz} - T_{ZU})} \\ &= \frac{0,7 \cdot 0,7 \cdot 4.230 \text{ kW} \cdot 473,15 \text{ K}}{353,18 \frac{\text{K kg}}{\text{m}^3} \cdot 1,01 \text{ kJ}/(\text{kg K}) \cdot 473,15 \text{ K} - 293,15 \text{ K}} \cong 15,3 \text{ m}^3/\text{s} = 55.080 \text{ m}^3/\text{h}. \end{aligned}$$

Für den Entrauchungsvolumenstrom ist der unter Punkt 4 ermittelte Wert, also ca. $55.000 \text{ m}^3/\text{h}$, relevant!

5. Bestimmung der erforderlichen Anzahl von Absaugstellen nach Gleichung (33):

$$n = \left\lceil \frac{\dot{V}_{AB}}{\dot{V}_{AB,i,max}} \right\rceil$$

Der über eine einzelne Absaugstelle maximal abführbare Volumenstrom resultiert aus Gleichung (31):

$$\dot{V}_{AB,i,max} = 4,16 \cdot \gamma \cdot \Delta h_o^{2,5} \cdot \sqrt{\frac{T_o - T_u}{T_u}}$$

mit

$\gamma = 1$ (Annahme, dass die Absaugstelle(n) im mittleren Raumbereich in ausreichender Entfernung zu den Wänden angeordnet werden können),

$\Delta h_o = H_R - h_{SC} = 4 \text{ m} - 2,5 \text{ m} = 1,5$ (die Absaugöffnung(en) ist/sind deckenbündig angeordnet),

$T_o = 473,15 \text{ K}$,

$T_u = 293,15 \text{ K}$,

$$\dot{V}_{AB,i,max} = 4,16 \cdot \gamma \cdot 1,5 \text{ m}^{2,5} \cdot \sqrt{\frac{473,15 \text{ K} - 293,15 \text{ K}}{293,15 \text{ K}}} \cong 9 \text{ m}^3/\text{s} = 32.400 \text{ m}^3/\text{h}.$$

Für die notwendige Zahl von Absaugstellen folgt damit

$$n = \left\lceil \frac{55.000 \text{ m}^3/\text{h}}{32.400 \text{ m}^3/\text{h}} \right\rceil = \lceil 1,7 \rceil = 2.$$

Es sind zwei Absaugstellen erforderlich; der Mindestabstand der beiden Absaugstellen zueinander beträgt nach Gleichung (34):

$$S_{min} = 0,9 \cdot \sqrt{\dot{V}_{AB,i}} = 0,9 \cdot \sqrt{15,3 \text{ m}^3/\text{s}} \cong 3,5 \text{ m}.$$

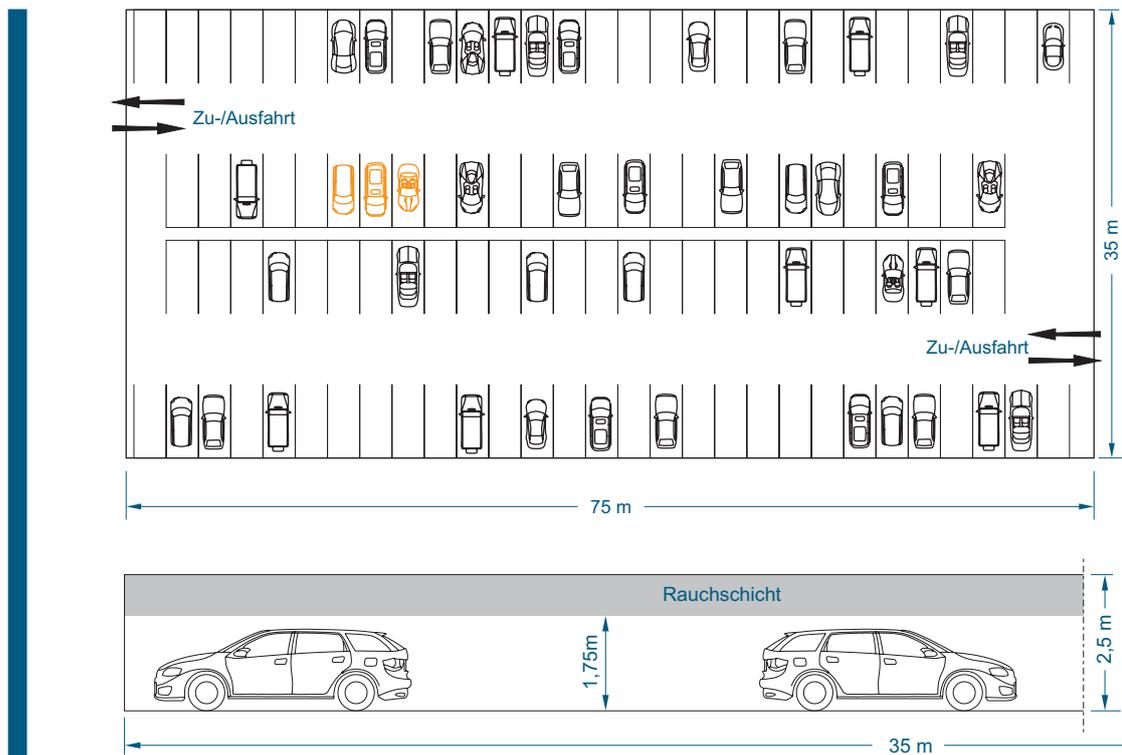
6. Erforderliche Zuluftfläche nach Gleichung (35):

$$A_{ZU} = \frac{\dot{V}_{AB}}{u_{ZU}} = \frac{15,3 \text{ m}^3/\text{s}}{1 \text{ m/s}} = 15,3 \text{ m}^2.$$

C.3 Beispiel einer Garagenentrauchung durch Schichtbildung mit MRA

Für das Beispiel einer Garage soll der notwendige Entrauchungsvolumenstrom zur maschinellen Entrauchung durch Schichtung für das Brandereignis drei nebeneinander parkender Fahrzeuge ermittelt werden. Der Volumenstrom soll so bemessen sein, dass für die Dauer der Selbstrettung (bis zu 15 Minuten nach Ausbruch eines Brandes) eine raucharme Schicht mit einer Höhe von 1,75 m aufrecht erhalten bleibt. Die Garage ist nicht gesprinkelt. Abmessungen der Garage:

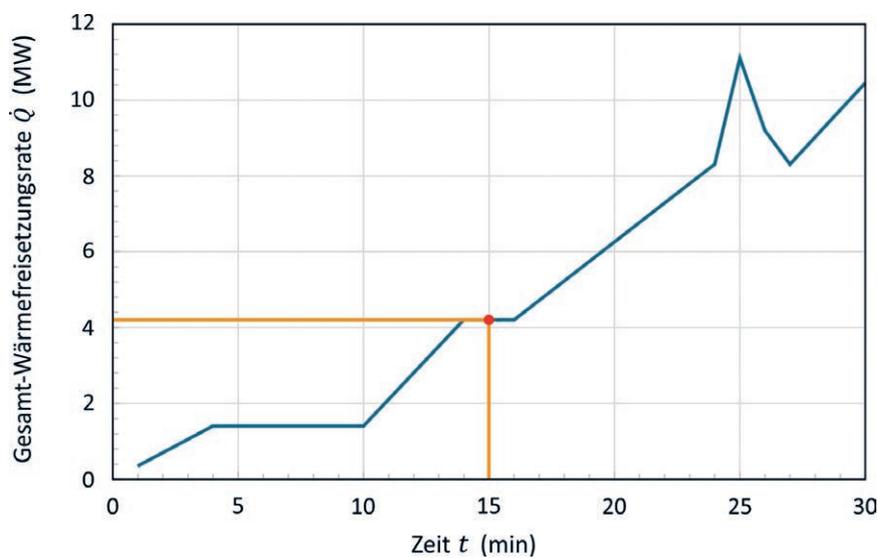
Länge $L = 75\text{ m}$, Breite $B = 35\text{ m}$, Höhe $H = 2,5\text{ m}$, Grundfläche $A \approx 2.625\text{ m}^2$, raucharme Schichthöhe $h_{sc} = 1,75\text{ m}$, zwei Zu-/Ausfahrten mit je einer Breite von 6 m und einer Höhe von 2 m.



Quelle: VDMA, TROX X-FANS GmbH

- Bestimmung der relevanten Wärmefreisetzungsrate gemäß VDI 2053 Blatt 2 [13] für einen PKW-Brand von drei PKW (Fall 2), ausgehend vom mittleren PKW.

Gemäß [13] beträgt die Wärmefreisetzungsrate zum Zeitpunkt der Betrachtung 15 Minuten nach der Brandentstehung $\dot{Q} = 4.200 \text{ kW}$.



Quelle: VDMA, TROX X-FANS GmbH

- Bestimmung des abzuführenden Massenstroms $\dot{m}_{AB} = \dot{m}_{AS}(h_{SG})$ durch Auswertung der Gleichungen (2) oder (3) an der Stelle $z = h_{SG} = 1,75 \text{ m}$.

Der Umfang des Brandherdes für die drei am Brand beteiligten PKW beträgt nach 15 Minuten gemäß [13] $U_B = 21 \text{ m}$. Die nahezu rechteckige Brandfläche wird mit $A_B = 6 \text{ m} \times 4,5 \text{ m} = 27 \text{ m}^2$ abgeschätzt. Aus den Werten folgt ein (hydraulischer) Durchmesser von $D_B = 4 \cdot A_B / U_B = 5,14 \text{ m}$. Damit ergibt sich für die Länge des Strahlformierungsbereichs $l_{SF} \approx 1,8 \cdot D_B = 9,3 \text{ m}$. Weil $h_{SG} < l_{SF}$, liegt die Höhe, in der der Massenstrom bestimmt werden soll, im Strahlformierungsbereich; zur Auswertung ist daher Gleichung (2) zu verwenden:

$$\begin{aligned} \dot{m}_{AB} = \dot{m}_{AS}(z = h_{SG}) &= 0,189 \cdot U_B \cdot h_{SG}^{1,5} \\ &= 0,189 \cdot 21 \text{ m} \cdot (1,75 \text{ m})^{1,5} \cong 9,2 \text{ kg/s.} \end{aligned}$$

3. Bestimmung des Entrauchungsvolumenstroms aus Gleichung (12):

$$\dot{V}_{AB} = \frac{\dot{m}_{AB}}{353,18 \frac{K \cdot kg}{m^3}} \cdot \left(\frac{0,7 \cdot \dot{Q}_K}{\dot{m}_{AB} \cdot c_p} + T_{ZU} \right)$$

mit $\dot{m}_{AB} = \dot{m}_{AS}(z = h_{SG})$ und $\dot{Q}_K = 0,7 \cdot \dot{Q}$ (Gleichung (5))

$$\dot{V}_{AB} = \frac{9,2 \frac{kg}{s}}{353,18 \frac{K \cdot kg}{m^3}} \cdot \left(\frac{0,7 \cdot 0,7 \cdot 4.200 \text{ kW}}{9,2 \frac{kg}{s} \cdot 1,01 \text{ kJ}/(\text{kg K})} + 293,15 \text{ K} \right) \cong 13,45 \text{ m}^3/\text{s} = 48.226 \text{ m}^3/\text{h}.$$

4. Bestimmung der Temperatur in der Rauchsicht (Gleichung (11)):

$$T_{AB} = \frac{0,7 \cdot \dot{Q}_K}{\dot{m}_{AB} \cdot c_p} \cdot T_{ZU}$$

$$T_{AB} = \frac{0,7 \cdot 0,7 \cdot 4.200 \text{ kW}}{9,2 \frac{kg}{s} \cdot 1,01 \text{ kJ}/(\text{kg K})} + 293,15 \text{ K} = 515 \text{ K} = 242 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Weil die Rauchgastemperatur über 200 °C beträgt, wird der abzuführende Volumenstrom nach Gleichung (14) zur Begrenzung der Rauchgastemperatur auf $T_{AB,grenz} = 200 \text{ }^\circ\text{C}$ neu berechnet.

5. Ermittlung des erforderlichen Entrauchungsvolumenstroms zur Einhaltung einer mittleren Rauchsichttemperatur von nach Gleichung (14):

$$\dot{V}_{AB} = \frac{0,7 \cdot \dot{Q}_K \cdot T_{AB,grenz}}{353,18 \frac{K \cdot kg}{m^3} \cdot c_p \cdot (T_{AB,grenz} - T_{ZU})}$$

$$= \frac{0,7 \cdot 0,7 \cdot 4.200 \text{ kW} \cdot 473,15 \text{ K}}{353,18 \frac{K \cdot kg}{m^3} \cdot 1,01 \text{ kJ}/(\text{kg K}) \cdot (473,15 \text{ K} - 293,15 \text{ K})} + 293,15 \text{ K} \cong 15,17 \text{ m}^3/\text{s} = 54.595 \text{ m}^3/\text{h}.$$

Für den Entrauchungsvolumenstrom ist der unter Punkt 5 ermittelte Wert, also ca. 54.600 m³/h, relevant!

6. Der über eine einzelne Absaugstelle maximal abführbare Volumenstrom resultiert aus Gleichung (31):

$$\dot{V}_{AB,i,max} = 4,16 \cdot \gamma \cdot \Delta h_o^{2,5} \cdot \sqrt{\frac{T_o - T_u}{T_u}}$$

mit

$\gamma = 1$ (Annahme, dass die Absaugstelle(n) im mittleren Raumbereich in ausreichender Entfernung zu den Wänden angeordnet werden können),

$\Delta h_o = H_R - h_{SG} = 2,5 \text{ m} - 1,75 \text{ m} - 0,1 \text{ m} = 0,65 \text{ m}$ (Abstand zwischen der Unterkante der Absaugöffnung(en) und der Rauchsichtgrenze; die Öffnung(en) sind in einer Entrauchungsleitung mit einem Abstand von 0,1 m zur Decke angeordnet),

$T_o = 473,15 \text{ K}$,

$T_u = 293,15 \text{ K}$,

$$\dot{V}_{AB,i,max} = 4,16 \cdot 1 \cdot (0,65 \text{ m})^{2,5} \cdot \sqrt{\frac{473,15 \text{ K} - 293,15 \text{ K}}{293,15 \text{ K}}} \cong 1,11 \text{ m}^3/\text{s} = 3997 \text{ m}^3/\text{h}.$$

7. Die notwendige Anzahl der Absaugstellen ist nach Gleichung (33):

$$n = \left\lceil \frac{\dot{V}_{AB}}{\dot{V}_{AB,i,max}} \right\rceil$$

$$n = \left\lceil \frac{54.595 \text{ m}^3/h}{3997 \text{ m}^3/h} \right\rceil = \lceil 13,6 \rceil = 14.$$

8. Bestimmung der Größe der Absaugstellen

Nebenbedingung zur Bestimmung des maximalen Absaugdurchmessers (Gleichung (32)):

$$D_{AB,max} < \frac{\Delta h_0}{2}.$$

Der maximale Durchmesser der Absaugstelle beträgt:

$$D_{AB,max} < \frac{0,65}{2} \text{ m} = 0,325 \text{ m}.$$

Der Mindestabstand r der Absaugstellen zueinander beträgt nach Gleichung (34):

$$S_{min} = 0,9 \cdot \sqrt{\dot{V}_{AB,i}} = 0,9 \cdot \sqrt{\frac{3997}{3600}} \text{ m} \cong 0,948 \text{ m}.$$

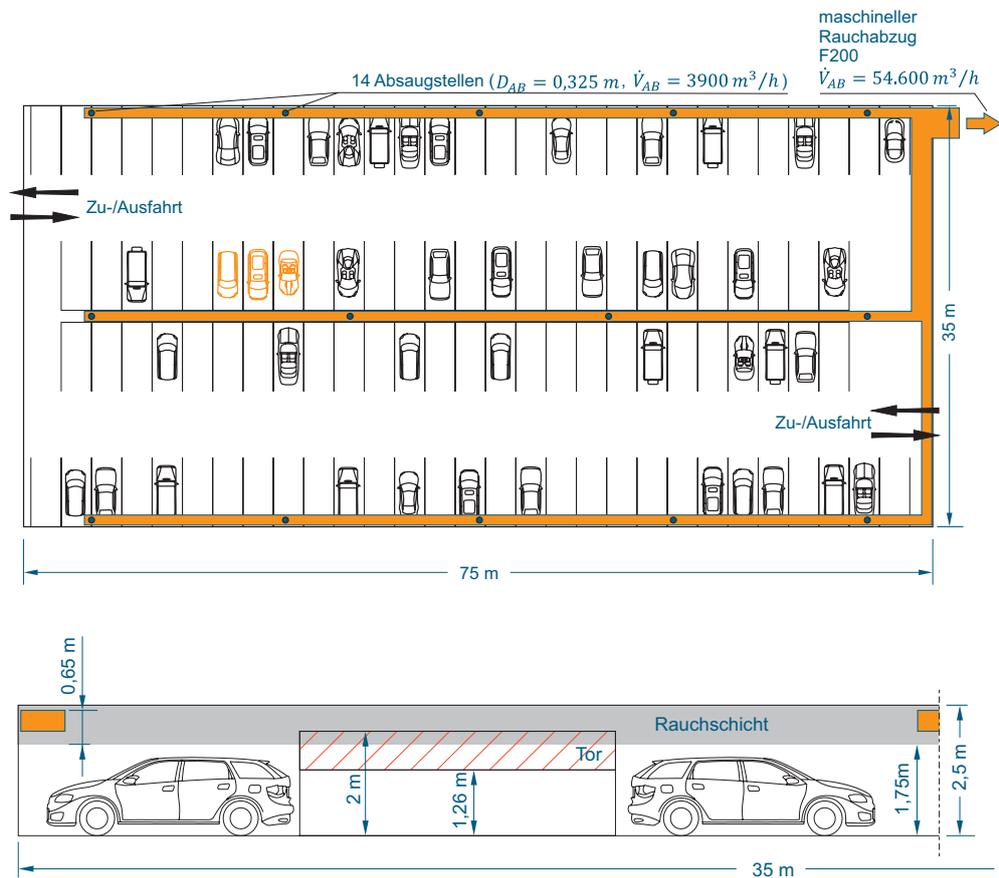
9. Zur Erreichung einer Schichtenbildung ist eine Nachströmfläche nach Gleichung (35) erforderlich:

$$A_{ZU} = \frac{\dot{V}_{AB}}{u_{ZU}} = \frac{15,17 \text{ m}^3/s}{1 \text{ m/s}} = 15,17 \text{ m}^2.$$

Die Nachströmung muss bodennah und impulsarm mit Geschwindigkeiten $\leq 1 \text{ m/s}$ erfolgen, wobei die Oberkante der Nachströmöffnung unterhalb der Rauchsichtgrenze liegen muss.

Für die Nachströmöffnungen werden die Tore der beiden Zufahrten mit je einer Breite von 6 m berücksichtigt. Die erforderliche Höhe der Nachströmflächen ergibt sich aus

$$h_{ZU} = \frac{A_{ZU}}{2 \cdot B_{Tor}} = \frac{15,17 \text{ m}^2}{2 \cdot 6 \text{ m}} = 1,26 \text{ m}^2.$$



Quelle: VDMA, TROX X-FANS GmbH

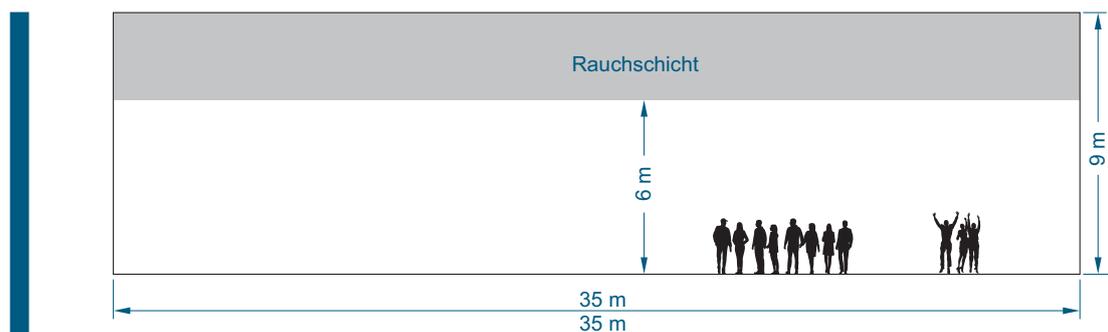
- Höhe der raucharmen Schicht $h_{SG} = 1,75 \text{ m}$
- Dicke der Rauchschicht unterhalb der Absaugöffnung $h_o = 0,65 \text{ m}$
- Höhe der Oberkante Zuluftöffnung bei Torbreite $B = 6 \text{ m}$ $h_{ZU} = 1,26 \text{ m}$
(Begrenzung der Höhe h_{ZU} der Zuströmöffnungen durch Rauchschrägen)

C.4 Beispiel einer Entrauchung für eine Eventhalle durch Schichtbildung mit MRA

Für das Beispiel einer Eventhalle soll der notwendige Entrauchungsvolumenstrom zur maschinellen Entrauchung durch Schichtung ermittelt werden. Dieser Volumenstrom soll so bemessen sein, dass für die Dauer von bis zu 15 Minuten nach Ausbruch eines Brandes eine raucharme Schicht mit einer Höhe von 6 m aufrecht erhalten bleibt.

Abmessungen der zu entrauchenden Halle:

Länge $L = 35\text{ m}$, Breite $B = 35\text{ m}$, Höhe $H = 9\text{ m}$, Grundfläche $A = 1.225\text{ m}^2$,
raucharme Schichthöhe $h_{SG} = 6\text{ m}$

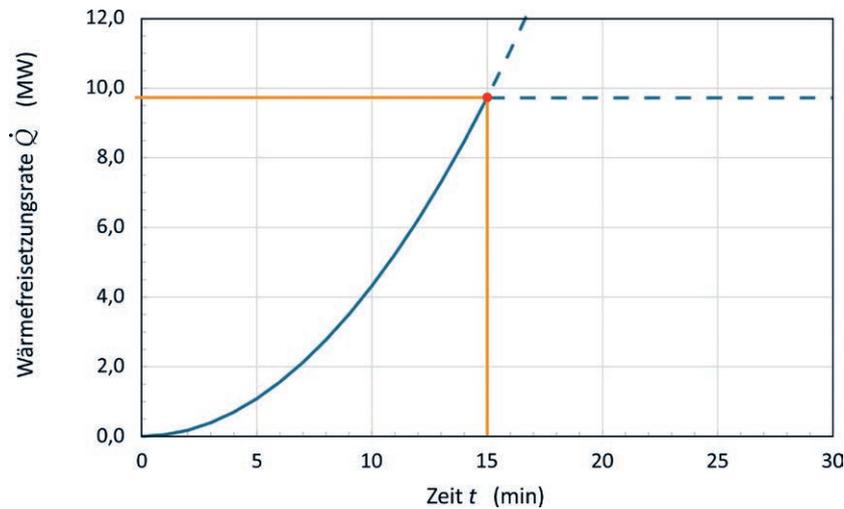


Quelle: VDMA, TROX X-FANS GmbH

1. Bestimmung der relevanten Wärmefreisetzungsrate nach Gleichung (43) und der Größe der Brandfläche

Mit dem Brandintensitätskoeffizienten $\alpha = 0,012\text{ kW/s}^2$ gem. Tabelle 4 für eine mittlere Brandausbreitungsgeschwindigkeit folgt für die Wärmefreisetzungsrate 15 Minuten nach Ausbruch des Brandes:

$$\begin{aligned}\dot{Q} &= \alpha \cdot t^2 \\ &= 0,012\text{ kW/s}^2 \cdot 900^2\text{ s}^2 = 9.720\text{ kW}.\end{aligned}$$



Quelle: VDMA, TROX X-FANS GmbH

Es wird eine spezifische Wärmefreisetzungsrate von $\dot{q} = 300 \text{ kW/m}^3$ angenommen. Hieraus ergibt sich für die Größe der Brandfläche

$$A_B = \frac{\dot{Q}}{\dot{q}} = \frac{9720 \text{ kW}}{300 \frac{\text{kW}}{\text{m}^2}} = 32,4 \text{ m}^2$$

und der Durchmesser

$$D_B = \sqrt{\frac{4 \cdot A_B}{\pi}} \cong 6,42 \text{ m.}$$

2. Bestimmung des abzuführenden Massenstroms $\dot{m}_{AB} = \dot{m}_{AS}(h_{SG})$ durch Auswertung der Gleichungen (2) oder (3) an der Stelle $z = h_{SG} = 6 \text{ m}$.

Mit dem Durchmesser der Brandfläche ergibt sich für die Länge des Strahlformierungsbereichs

$$l_{SF} = 1,8 \cdot D_B = 1,8 \cdot 6,42 = 11,56 \text{ m.}$$

Weil $h_{SG} < l_{SF}$ liegt die Höhe, in der der Massenstrom bestimmt werden soll, im Strahlformierungsbereich; zur Auswertung ist daher Gleichung (2) zu verwenden:

$$\begin{aligned} \dot{m}_{AB} = \dot{m}_{AS}(z = h_{SG}) &= 0,189 \cdot \pi \cdot D_B \cdot h_{SG}^{1,5} \\ &= 0,189 \cdot \pi \cdot 6,42 \text{ m} (6 \text{ m})^{1,5} \cong 56,05 \text{ kg/s.} \end{aligned}$$

3. Bestimmung des Entrauchungsvolumenstroms aus Gleichung (12):

$$\dot{V}_{AB} = \frac{\dot{m}_{AB}}{353,18 \frac{K \text{ kg}}{m^3}} \cdot \left(\frac{0,7 \cdot \dot{Q}_K}{\dot{m}_{AB} \cdot c_p} + T_{ZU} \right)$$

mit $\dot{m}_{AB} = \dot{m}_{AS}$ ($z = h_{SG}$) und $\dot{Q}_K = 0,7 \cdot \dot{Q}$ (Gleichung (5))

$$\dot{V}_{AB} = \frac{56,05 \text{ kg/s}}{353,18 \frac{K \text{ kg}}{m^3}} \cdot \left(\frac{0,7 \cdot 0,7 \cdot 9720 \text{ kW}}{56,05 \text{ kg/s} \cdot 1,01 \text{ kJ/(kg K)}} + 293,15 \text{ K} \right) \cong 59,88 \text{ m}^3/\text{s} = 215.550 \text{ m}^3/\text{h}.$$

4. Bestimmung der Temperatur in der Rauchschiicht (Gleichung 12):

$$T_{AB} = \frac{0,7 \cdot \dot{Q}_K}{\dot{m}_{AB} \cdot c_p} \cdot T_{ZU}$$

$$T_{AB} = \frac{0,7 \cdot 0,7 \cdot 9720 \text{ kW}}{56,05 \text{ kg/s} \cdot 1,01 \text{ kJ/(kg K)}} + 293,15 \text{ K} = 377,28 \text{ K} = 104,1 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Die Rauchgastemperatur liegt unter $200 \text{ }^\circ\text{C}$.

5. Bestimmung der erforderlichen Anzahl von Absaugstellen nach Gleichung (33):

$$n = \left\lceil \frac{\dot{V}_{AB}}{\dot{V}_{AB,i,max}} \right\rceil.$$

Der über eine einzelne Absaugstelle maximal abführbare Volumenstrom resultiert aus Gleichung (31):

$$\dot{V}_{AB,i,max} = 4,16 \cdot \gamma \cdot \Delta h_o^{2,5} \cdot \sqrt{\frac{T_o - T_u}{T_u}}$$

mit

$\gamma = 1$ (Annahme, dass die Absaugstelle(n) im mittleren Raumbereich in ausreichender Entfernung zu den Wänden angeordnet werden können)

$\Delta h_o = H_R - h_{SG} = 9 \text{ m} - 6 \text{ m} = 3 \text{ m}$ (die Absaugöffnung(en) ist/sind deckenbündig angeordnet)

$T_o = 377,28 \text{ K}$

$T_u = 293,15 \text{ K}$

$$\dot{V}_{AB,i,max} = 4,16 \cdot 1 \cdot (3 \text{ m})^{2,5} \cdot \sqrt{\frac{377,28 \text{ K} - 293,15 \text{ K}}{293,15 \text{ K}}} \cong 34,74 \text{ m}^3/\text{s} = 125.063 \text{ m}^3/\text{h}.$$

Für die notwendige Anzahl von Absaugstellen folgt damit

$$n = \left\lceil \frac{215640 \text{ m}^3/\text{h}}{125063 \text{ m}^3/\text{h}} \right\rceil = \lceil 1,72 \rceil = 2.$$

Nebenbedingung zur Bestimmung des maximalen Absaugdurchmessers Gleichung (32):

Abstand Unterkante Abströmstelle zu Schichtgrenze: $\Delta h_o = 3 \text{ m}$

$$D_{AB,max} < \frac{\Delta h_o}{2}$$

$$D_{AB, max} < \frac{3}{2} m = 1,5 m.$$

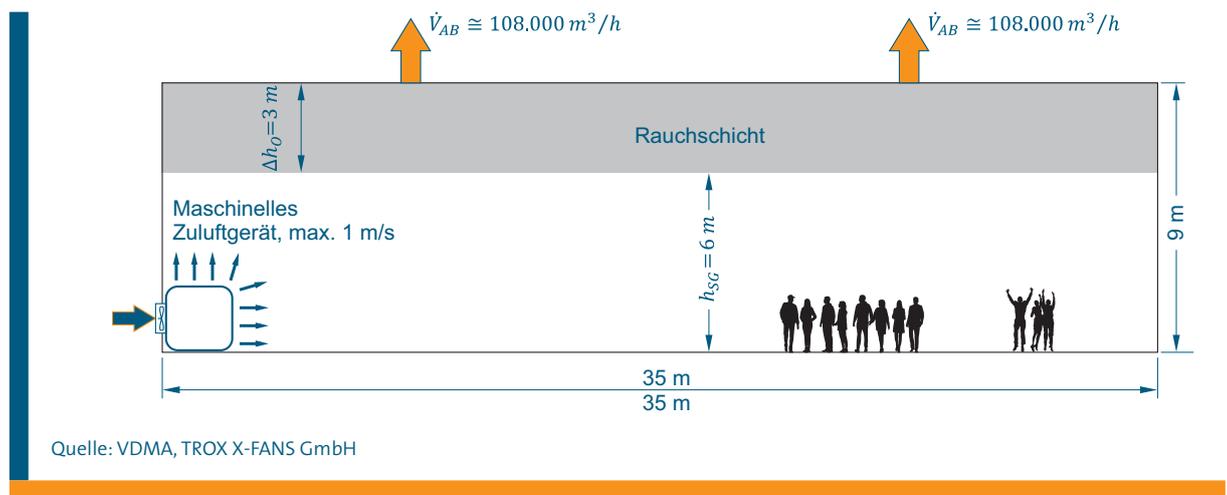
Der Mindestabstand der Absaugstellen zueinander beträgt nach Gleichung (34):

$$S_{min} = 0,9 \cdot \sqrt{\dot{V}_{AB,i}} = 0,9 \cdot \sqrt{34,74} m \cong 5,30 m.$$

Erforderliche Zuluftfläche nach Gleichung (35):

$$A_{ZU} = \frac{\dot{V}_{AB}}{u_{ZU}} = \frac{59,9 m^3/s}{1 m/s} = 59,9 m^2.$$

Die erforderliche Zuluftfläche ist verhältnismäßig groß. Daher soll die Zuluftführung maschinell erfolgen. Hierzu sollten Zulufteinrichtungen mit $\dot{V}_{ZU} = \dot{V}_{AB}$ und Zuluftgeschwindigkeiten $\leq 1 m/s$ eingesetzt werden.



Höhe der raucharmen Schicht $h_{SG} = 6 m$

Dicke der Rauchschicht unterhalb der Absaugöffnung $\Delta h_o = 3 m$

Die notwendige Zuströmung erfolgt über maschinelle Zuluftgeräte mit einer integrierten Verteil-einrichtung. Bei einem Zuluftvolumenstrom von je $25.000 m^3/h$ pro Gerät werden neun Geräte benötigt.

Impressum

VDMA e. V.

Allgemeine Lufttechnik
Lyoner Straße 18
60528 Frankfurt am Main
www.vdma.org/allgemeine-lufttechnik

Kontakt

Christine Montigny (M.Sc.)
Telefon +49 69 6603-1860
E-Mail christine.montigny@vdma.org

Für Inhalt und Form zeichnen die Autoren
verantwortlich.

Design

DesignStudio

Titelbild

TROX X-FANS GmbH

Satz und Druck

Druck- und Verlagshaus
Zarbock GmbH & Co. KG
Frankfurt am Main

© 2024 by VDMA Allgemeine Lufttechnik, Frankfurt

VDMA

Allgemeine Lufttechnik

Lyoner Straße 18

60528 Frankfurt am Main

Telefon +49 69 6603-1860

Internet www.vdma.org/allgemeine-lufttechnik



www.vdma.org/allgemeine-lufttechnik