

Allgemeine Lufttechnik



Sicherheit in Gebäuden und Infrastruktureinrichtungen

Grundlagenpapier Entrauchung

Unterstützende Maßnahmen für Selbst- und Fremdrettung,
Löschangriff, Sach- und Umweltschutz



Sicherheit in Gebäuden und Infrastruktureinrichtungen

Grundlagenpapier Entrauchung

Unterstützende Maßnahmen für Selbst- und Fremdrettung, Löschangriff, Sach- und Umweltschutz

Vorwort

Da sich in den letzten Jahren in Deutschland trotz einer umfangreichen Diskussion zum Thema Rauchabzug bisher zwischen der Wissenschaft und dem Baurecht noch kein abschließender Konsens aller Beteiligten Kreise zur Notwendigkeit und zum Umgang ergeben hat, bat der VDMA einige der anerkanntesten Experten (siehe Kapitel 13) auf diesem Gebiet, ein Grundlagenpapier zum Rauchabzug zu erarbeiten. Damit möchte der VDMA eine technisch fundierte Basis schaffen, von der aus künftig Sinn und Nutzen, Planung und Ausführung besser beurteilt und wieder ein Konsens zwischen den verschiedenen beteiligten Parteien geschaffen werden kann. Dieses Grundlagenpapier will dabei helfen, das für die jeweilige Aufgabe passende Entrauchungsprinzip zu erkennen, die richtige Projektierung und auch die jeweils erforderliche Anlagenausführung zu finden.

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 große Bedeutung zu.

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

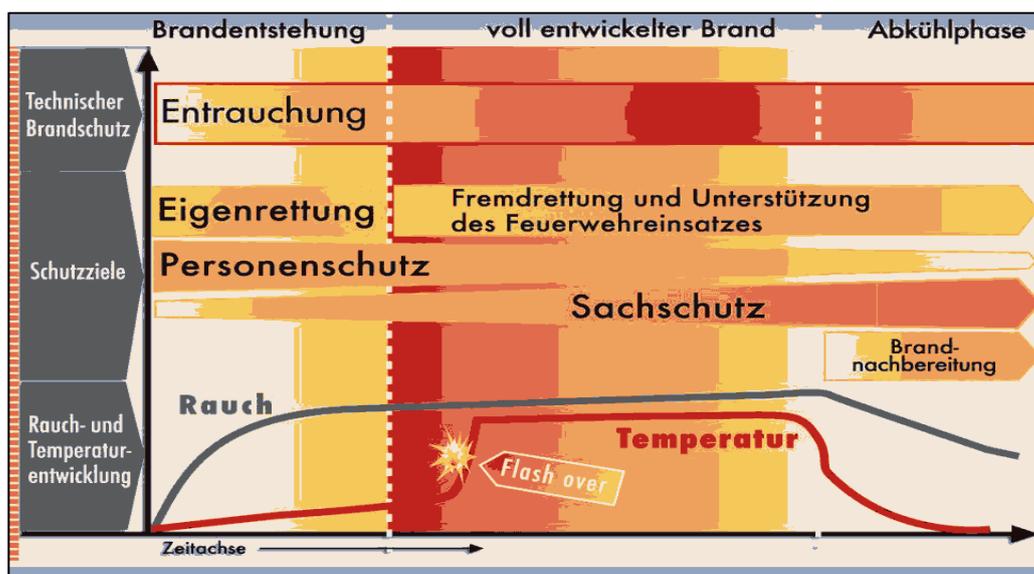


Bild 1: Typisch zeitlicher Verlauf bei einem Brand.
Quelle: TROX TLT GmbH

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

Der Oberbegriff RWA (Rauch- und Wärmeabzug-Anlage) umfasst unterschiedliche Anlagentechniken, mit denen verschiedene Schutzziele erfüllt werden können (siehe Bild 2).

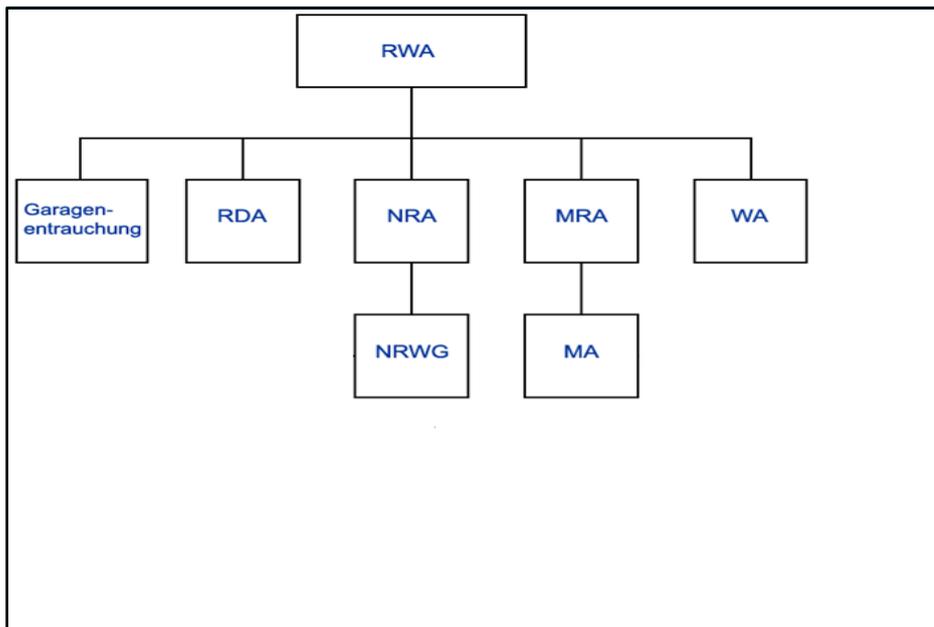


Bild 2: RWA-Anlagentechniken
Quelle: FVLR e.V

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.

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.

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.

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

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

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

2 Anwendungsbereich

Dieses Grundlagenpapier schafft eine technisch fundierte Basis, damit Schutzziele und Realisierungen unterschiedlicher Entrauchungskonzepte besser beurteilt und umgesetzt werden können.

Dieses Grundlagenpapier 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 sind für die Anwendung dieses Dokumentes erforderlich bzw. hilfreich.

DIN 14011, Begriffe aus dem Feuerwehrgesetz

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); Bemessung, Anforderungen und Einbau

DIN EN 12101-1, Rauch- und Wärmefreihaltung – Bestimmungen für Rauchschränke: Anforderungen und Prüfverfahren

DIN EN 12101-2, Rauch- und Wärmefreihaltung – Festlegungen für natürliche Rauch- und Wärmeabzugsgeräte: Anforderungen und Prüfverfahren

DIN EN 12101-3, Rauch- und Wärmefreihaltung – Festlegungen für maschinelle Rauchabzugsgeräte: Anforderungen und Prüfverfahren

DIN EN 12101-6, Rauch- und Wärmefreihaltung – Differenzdrucksysteme

DIN EN ISO 13943, Brandschutz – Vokabular

VDI 3564, Empfehlungen für den Brandschutz in Hochregalanlagen

4 Definitionen

4.1 Brandabschnitt

gegenüber angrenzenden Räumen abgeschlossener Abschnitt innerhalb eines Gebäudes, bestehend aus einem oder mehreren Räumen oder Nutzungseinheiten, die von raumabschließenden Bauteilen mit einer bestimmten Feuerwiderstandsdauer begrenzt sind

4.2 Brandausbreitung

räumliche Ausweitung eines Brandes über die Brandausbruchsstelle hinaus

4.3 Branddauer

Zeit zwischen dem Ausbruch eines Brandes und seinem Ende

4.4 Brandfläche

Grundfläche, auf der es zum betrachteten Zeitpunkt brennt

4.5 Brandgase

gasförmige Bestandteile der Verbrennungsprodukte

4.6 Brandlast

Wärmeenergie, die bei dem vollständigen Verbrennen aller brennbaren Stoffe in einem Bereich frei werden könnte

4.7 Brandverlauf

Entwicklung eines Brandes nach Ort, Zeit und Intensität

4.8 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

4.9 Flash-over

Übergang vom brandlastgesteuerten in den ventilationsgesteuerten Brand

4.10 Fremdrettung

durch die aktive Hilfe Dritter eingeleitete und durchgeführte Rettung

4.11 Hilfsfrist

die Zeit zwischen dem Entdecken eines Schadensereignisses und Wirksamwerden der Maßnahmen

Anmerkung: Die Hilfsfrist setzt sich zusammen aus Alarmierungszeit, Ausrückezeit, Anmarschzeit, Erkundungszeit und Entwicklungszeit

4.12 Rauch

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

4.13 Rauchableitung

ereignisabhängige Maßnahme zur Rauchabfuhr, jedoch mit nicht vorhersagbaren quantifizierbaren Ergebnissen

4.14 Raucharme Schicht

Abstand zwischen Fußboden und Unterseite der Rauchsicht

Anmerkung: Eine wesentliche Zielgröße der raucharmen Schicht ist in der Regel eine Höhe von mindestens 2,50 m.

4.15 Rauch- und Wärmeabzug

Öffnungen oder Geräte in einem Gebäude, um den Abzug von Rauch, Brandgasen und Wärme bei einem Brand zu ermöglichen

4.16 Rauch- und Wärmeabzugsanlage

System, in der Regel bestehend aus Rauch- und Wärmeabzug, Steuerung, Energieversorgung, Zuluft und rauchabschnittsbildenden Komponenten zur Ableitung von Rauch und Wärme aus Gebäuden

4.17 Rettungsweg (in Gebäuden), notwendiger Rettungsweg

baurechtlich notwendiger Teil der baulichen Anlage, über den Personen die Anlage verlassen oder gerettet werden können

Anmerkung: Als Rettungswege gelten u. a.

Flure, Treppenträume, Ausgänge, Rettungsbalkone, Laubengänge, Rettungstunnel.

4.18 Selbstrettung

von den betroffenen Personen selbst eingeleitete und ohne Hilfe Dritter durchgeführte Rettung

4.19 Sicherheitstreppe

Treppenraum innerhalb oder außerhalb eines Gebäudes in den bestimmungsgemäß kein Rauch eintreten darf

5 Entrauchungsziele

Die Maßnahmen zur Entrauchung bilden zur Selbstrettung, Fremdrettung und Brandbekämpfung und für den Sachschutz eine wesentliche Voraussetzung. 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) verbessert 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 zählt eine wirksame Entrauchung.

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

Personenschutz

Dies soll vor allem durch die Verwendung bestimmter Baustoffklassen (z. B. kein B 3 = leicht entflammbar zulässig) und die Einhaltung von maximal erlaubten Rettungsweglängen erreicht werden.

Nachbarschaftsschutz

Dies soll vor allem durch die Einhaltung von Mindestabständen der Gebäude untereinander und zu Grundstücksgrenze, sowie bestimmter Bauteilklassen, z. B. der harten Bedachung für Dächer, erreicht werden.

Umweltschutz

Dies soll vor allem durch die Verwendung bestimmter Baustoffe (z. B. keine Baustoffe, die krebserregende Stoffe freisetzen) und durch die Einhaltung bestimmter Baustoffklassen (z. B. kein B 3 = leicht entflammbar) erreicht werden.

Werden nun in baurechtlichen Vorschriften Regelungen zur Rauchableitung bzw. zum Rauchabzug veröffentlicht, sollen diese bei Einhaltung der quantitativen Grenzen des Baurechts (z. B. Einhaltung der maximal erlaubten Fluchtweglänge) entsprechend dem sogenannten „Grundsatzpapier Entrauchung“ vor allem der Unterstützung der Feuerwehr bei deren Löschangriff dienen. Dazu finden sich in den bauaufsichtlichen Regelwerken z. T. Mindestvorgaben zu der Bemessung und zu den Produkten. Das Baurecht erlaubt zum Teil auch die Verwendung von nicht qualifizierten Öffnungen zur Rauchableitung, für die nach Liste C der Bauregelliste keine technischen Anforderungen oder Verwendbarkeitsnachweise gestellt werden.

Neben den 3 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)
- Erfolgshaftung
- usw.

Zur Einhaltung dieser zusätzlichen Schutzziele ist im Regelfall meist eine qualifizierte Entrauchungsanlage sinnvoll und notwendig. Hierzu finden Sie in diesem „Grundlagenpapier Entrauchung“ zahlreiche weiterführende Informationen.

Werden die quantitativen Grenzen des Baurechts überschritten, ist dies in jedem Einzelfall mit der unteren Bauaufsichtsbehörde abzustimmen. Zur Kompensation dieser Abweichungen wird dann ebenfalls in vielen Fällen eine qualifizierte Entrauchungsanlage (qualifizierte Rauchabzugsgeräte nach DIN EN 12101 mit einer qualifizierten Projektierung z. B. nach DIN 18232) eingesetzt (siehe Bild 3).

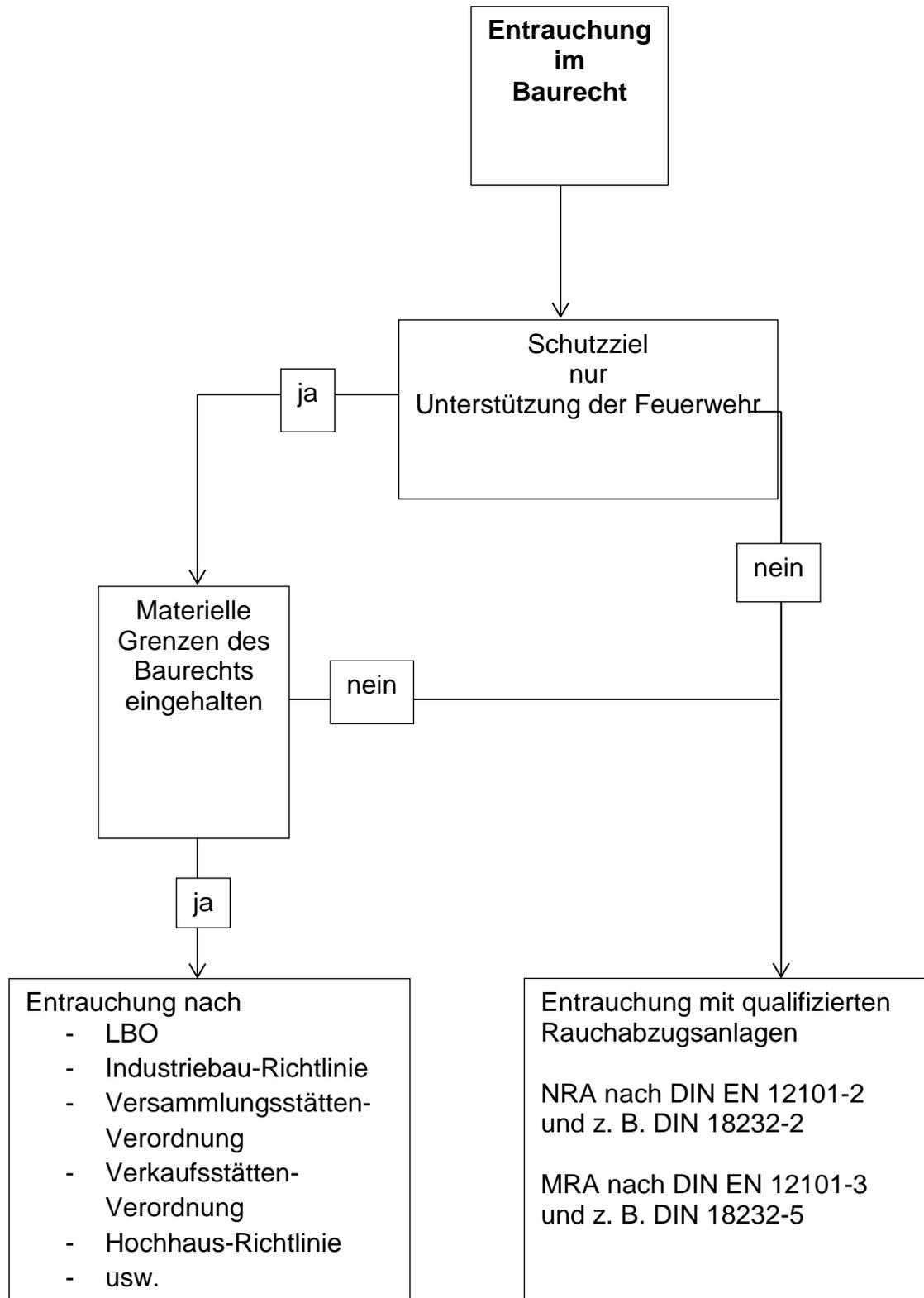


Bild 3: Zusammenhang zwischen den verschiedenen Schutzzielen, der Einhaltung von baurechtlich vorgegebenen Grenzen und den für die Entrauchung zu beachtenden Regeln
Quelle: VDMA e.V.

Bauherren Verantwortung

Weiter können auch zivilrechtliche Anforderungen z. B. der Versicherer (Rauchschäden übersteigen die Brandschäden häufig um ein Vielfaches) wirksam durch die Entrauchung erfüllt werden.

Insbesondere ist bei niedrigenergetischen Bränden ein frühzeitiges Absinken des Rauches in den Rettungsweg zu beobachten. Dieses Phänomen ist bei der Dimensionierung von Entrauchungsanlagen zur „Sicherstellung von Rettungswegen“ zu berücksichtigen. Weiterhin ist zu beachten, dass die Rettungswege meist gleichzeitig die Angriffswege der Feuerwehr sind. Die Einsatzkräfte der Feuerwehr können zwar sich selbst durch entsprechende Ausrüstung gegen Rauch und sonstige Einwirkungen wie z. B. erhöhte Wärmestrahlung schützen, aber nicht die schlechte und fehlende Sicht durch den Rauch kompensieren.

Damit die Anforderungen an die Rettungswege und die Angriffswege der Feuerwehr erfüllt werden, ist bei Räumen > 200 m² meist eine raucharme Schicht notwendig. Der Begriff „raucharm“ berücksichtigt, dass ein geringfügiger Raucheintrag z. B. durch Schwadenbildung allgemein akzeptiert wird.

Ein anderes Schutzziel kann darin bestehen, die unkontrollierte Rauchausbreitung aus dem vom Brandherd betroffenen Raumbereich in benachbarte Bereiche zu verhindern.

Für Räume in die kein Rauch eindringen darf, z. B. Sicherheitstreppe, werden Differenzdruckanlagen eingesetzt.

Die Prinzipien der Entrauchung und Rauchableitung umfassen im Allgemeinen die Bereiche:

1. **Rauchableitung durch Verdünnung**
Vermischen des Rauches mit unkontaminierter Luft und Ableitung von Rauch und Wärme
2. **Entrauchung durch Schichtung**
Schaffung von raucharmen Schichten durch natürliche oder maschinelle Rauchabzugsanlagen
3. **Rauchabschnittsbildung**
Verhinderung von Rauchübertritt von einem Rauchabschnitt in benachbarte Be-

reiche mittels baulicher Abtrennung oder unter Einsatz lufttechnischer Maßnahmen

4. **Rauchfreihaltung (z. B. Sicherheitstreppe)**
Verhinderung des Eindringens von Rauch in selbst brandlastfreie Räume durch Überdruck

6 Gefährdungen durch Rauch

Die Entstehung von Schadstoffen bei einem Brand hängt wesentlich vom verbrennenden Stoff selbst (z. B. Zusammensetzung, Heizwert, Oberfläche, Trocknungsgrad) und den Umgebungsbedingungen (z. B. Sauerstoffkonzentration) ab. Die vom Brandgut abgegebene Rauchmenge (Quellterm) ist dabei auch schon bei kleineren Brandlasten erheblich.

Der bei einem Brand entstehende Rauch [1] ist das Ergebnis einer Vermischung der bei der Verbrennung entstehenden gasförmigen, flüssigen und festen (z. B. Ruß) Verbrennungsprodukte mit der Umgebungsatmosphäre. Dieser Rauch wirkt sich auf Personen in toxikologischer Hinsicht (atemwegsreizend, narkotisierend) und sichtbehindernd aus. Die Beeinträchtigung von Humanfunktionen kann hierbei durch die Schadstoff- bzw. Partikelkonzentration und / oder die Dosis erfolgen. Die vorgenannten Auswirkungen bestimmen neben individuellen Eigenschaften das Verhalten von Personen während der Selbstrettungsphase.

Die pro **Masseneinheit** des brennenden Stoffes entstehende Masse an Rauch und seiner Komponenten ist vom Stoff und den Bedingungen des chemischen Umsatzes abhängig. Beim Stoff sind die insbesondere die Sicht beeinträchtigenden festen Bestandteile des Rauchs durch seine chemische Zusammensetzung überwiegend dann bestimmend, wenn die Verbrennung mit offener Flamme bei hinreichend hoher Sauerstoffkonzentration der Umgebungsatmosphäre erfolgt. Verändern sich die Verbrennungsbedingungen infolge kleiner Zündinitiale oder zu geringem Sauerstoffgehalt in Richtung Verschwelung, oder enthält der Stoff flammhemmende Zusätze, verschiebt sich die Rauchproduktion zu höheren Massenanteilen hin (also mehr Rauchpartikel). Ähnliche Auswirkungen haben die Randbedingungen der Verbrennung bezüglich der Zusammensetzung der Umgebungsatmosphäre und deren Temperatur. Derartige Bedingungen liegen zum Beispiel bei unterventilierten Bränden vor.

Die mögliche **Ausbeute** an Rauchpartikeln beim Brand unterliegt deshalb einer sehr großen Schwankungsbreite. Diese kann bei mit offener Flamme frei abbrennenden Stoffen unter 0,01 g/g liegen; bei unterventilierten Bränden oder bei Produkten mit einem hohen C/H Verhältnis im Molekül und/oder flammhemmenden Zusätzen (zum Beispiel bestimmte polymerisierte Kohlenwasserstoffe) können Werte über 0,25 g/g erreicht werden. Einschlägige Angaben zu den Bandbreiten findet man in der Fachliteratur [2; 3].

Da im konkreten Fall einer brandschutztechnischen Bewertung der Gefährdung durch Rauch in einem Gebäude die das Brandgeschehen bestimmenden Szenarien hinsichtlich Brandausbruchsort und einbezogenen Stoffen im Voraus häufig nur unzureichend bekannt sind, ist es sinnvoll, für die Bemessung Rauchpotentiale zu Grunde zu legen, die auf der sicheren Seite liegen.

Detailliertere Aussagen zu anorganischen und zu organischen Brandprodukten sind im Anhang A wiedergegeben.

Im Anhang B ist unter anderem dargestellt, welche Auswirkungen sich bei unzureichender bzw. fehlender Rauchabführung in der Anfangsphase eines Brandes für die Sichtbarkeit bzw. Erkennungsweite ergeben können.

Der Anhang C zeigt beispielhaft, welche Verdünnung des Rauchs für eine hinreichende Erkennungsweite erforderlich ist.

7 Prinzipien für Entrauchung und Rauchableitung für unterschiedlich große Räume

7.1 Rauchableitung durch Verdünnung

Steht bei Brandräumen nicht die Bildung raucharmer Schichten zur sicheren Evakuierung, Brandbekämpfung oder für den Sachschutz im Vordergrund, kann für diese Räume auch das Prinzip der Verdünnung des Rauchs zur Anwendung kommen. Hierbei ist wegen der starken Durchmischung jedoch immer von einer vollständigen Verrauchung des Raumes auszugehen.

Die Verdünnung kann zusätzlich dazu verwendet werden, durch eine Reduzierung der Rauchgastemperatur die Selbstentzündung des noch unverbrannte Bestandteile enthaltenden Rauchs (Backdraft mit ggf. nachfolgendem Flash-over) zu verhindern oder zeitlich zu verzögern. In den verrauchten Räumen können nur mit einem unrealistisch großen Aufwand tolerierbare Sichtweiten und Schadstoffkonzentrationen erreicht werden, die eine - auch kurzzeitige - Anwesenheit von Menschen ermöglichen würden. Der für ausreichende Sichtweiten und Schadstoffkonzentrationen in der Regel technisch kaum umsetzbare erforderliche Frischluftmassenstrom hängt im Wesentlichen von der freigesetzten Rauchmasse und deren Zusammensetzung ab und ist dabei weitgehend unabhängig von der Größe des Brandraumes. Diese Rauchmasse und -zusammensetzung wiederum ist abhängig von der Art und Masse der verbrannten Stoffe und den Randbedingungen, unter denen die Verbrennung abläuft sowie von der Vermischung der zuströmenden Frischluft mit dem heißen Rauch.

Die Temperatur des Rauchs ist dabei direkt abhängig von der dem Brandgeschehen zur Verfügung stehenden und in den Rauchplume einströmenden Frischluft.

Die Erkennungsweite in verrauchten Räumen ist hauptsächlich abhängig von der Partikelkonzentration, von der Reizwirkung des Rauchs, von der Beleuchtung und vom Kontrast der zu erblickenden Gegenstände, z. B. der Fluchtwegkennzeichen.

Die toxische Wirkung des Rauchs ist einerseits auf die Giftigkeit der anorganischen Brandgase (Kohlenmonoxyd, Kohlendioxyd, Cyanwasserstoff, Stickstoffoxyde, etc.) und andererseits auf die Wirkung der organischen Brandzersetzungsprodukte (aromatische Kohlenwasserstoffe Benzol, Styrol, etc.; polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe Benzpyren etc. und Ruß) zurückzuführen.

Die Masse von sowohl freigesetzten Partikeln als auch gesundheitsschädlichen Gasen als Folge der chemischen Umwandlungsprozesse während des Brandverlaufs werden von der verbrennenden Masse des insgesamt vorhandenen Brandgutes, seinen stofflichen Eigenschaften und den vorliegenden Randbedingungen bestimmt. Zur Bemessung von Partikelmassen und gesundheitsschädlichen Gasen werden in der Regel Werte herangezogen, die in kleinskaligen Untersuchungen ermittelt wurden. Die Übertragung von solchen Labordaten auf reale Brände erfordert für die Festlegung dieser Massen Sicherheitszuschläge, da z. B. bei der im Labor durchgeführten Verbrennung von reinem trockenem Holz weniger Rußpartikel und Schadstoffe entstehen, als bei der Verbrennung unter realen Bedingungen.

Die erforderlichen Verdünnungsverhältnisse (v_{\min} = die Masse der zur Verdünnung zugeführten Frischluft bezogen auf die Masse des durch die Verbrennung entstehenden Rauchs) können aufgrund der oben geschilderten komplexen Zusammenhänge sehr unterschiedlich sein, je nachdem, ob sie zur Absenkung auf ein bestimmtes Temperaturniveau, zum Erreichen von vorgegebenen Mindestsichtweiten oder zulässiger Schadstoffkonzentrationen dienen sollen.

Während die erforderliche Verdünnung zur Temperaturbegrenzung lediglich von der Wärmefreisetzung und der Festsetzung des Temperaturgrenzwertes abhängig ist (Verhinderung des Flash-over oder direkter Personenschutz), sind die Festlegungen zu den notwendigen Verdünnungsverhältnisse zur Herstellung von Sichtweiten und zulässigen Gaskonzentrationen wesentlich komplexer. So ist bei der Verbrennung von trockenem Holz ein Verdünnungsverhältnis von $v_{\min} = 18$ und bei der Verbrennung von Heizöl von $v_{\min} = 1400$ erforderlich (25 m Sichtweite, nachleuchtendes Fluchtwegkennzeichen, Beleuchtungsstärke im Fluchtweg 80 lx, Flüchtende sind nicht mit dem Fluchtweg vertraut). Für Brände aus Mischfraktionen (Holz, Spanplatten und Kunststoffen) liegt die Bandbreite der Werte zwischen $v_{\min} = 18$ und $v_{\min} = 1400$, unter der Berücksichtigung der stofflichen Anteile [4-7].

Zur Unterschreitung gesundheitsgefährdender Konzentrationen z. B. von Kohlenmonoxid (CO) als wesentliche Verbrennungskomponente mit bekannten Gefährdungswerten, ist ein Verdünnungsverhältnis von $v_{\min} = 160$ bis $v_{\min} = 200$ erforderlich. Ist aufgrund der Zusammensetzung der Brandlast damit zu rechnen, dass weitere Schadstoffe in relevanten Konzentrationen auftreten können, so ist das mindestens erforderliche Verdünnungsverhältnis für diese Verhältnisse zu prüfen. Da aber die Wirkprinzipien von Zusammensetzungen jeweils verschiedener Giftstoffe unterschiedlicher Konzentrationen noch nicht hinreichend untersucht sind, und die Zusammensetzung jeweils abhängig vom Brandgeschehen ist, können keine Pauschalangaben über generell erforderliche Gesamtverdünnungsfaktoren gemacht werden.

Setzt man bei der Verbrennung von Heizöl den erforderlichen Verdünnungsfaktor zur Sichtweitenbegrenzung $v_{\min} = 1400$ an, so ist wegen der sehr starken Verdünnung damit auch eine Gesundheitsgefährdung hinsichtlich des CO-Grenzwertes ausgeschlossen.

7.1.1 Kleine Räume (< 200 m²)

In kleinen Räumen (< 200 m²) ist das Konzept einer Rauchschiebung bei fortentwickelten Brandgeschehen in der Regel nicht mehr umsetzbar – der Raum verraucht vollständig, da infolge des Brandgeschehens der Rauch sich im gesamten Raum ausbreitet. Daher dient die zugeführte Frischluft in Verbindung mit gleichzeitiger Abströmung vor allem der Verdünnung und zur Verhinderung der Gefahr eines Flash-overs. Der hierzu erforderliche Frischluftmassenstrom zur hinreichenden Verdünnung richtet sich dabei nach der beim Brand freigesetzten Wärme.

Die Zufuhr von Frischluft bei der Verdünnung ist nicht an eine impulsarme Einbringung in Bodennähe gebunden. Eine auf das Brandgeschehen einwirkende Einströmgeschwindigkeit von > 3 m/s führt jedoch zu einem „Anfachen“ des Brandes und damit zu einer Steigerung der Brandleistung. Zur Abströmung können sowohl Öffnungen in der Fassade, als auch Schächte und Kanäle genutzt werden. Sofern die Abströmung aus dem verrauchten Bereich passiv erfolgt und die Frischluftzuströmung durch Erzeugung eines Überdrucks aus dem nicht verrauchten Bereich, z. B. durch die Überdrucklüfter der Feuerwehr, erfolgen soll, ist zu gewährleisten, dass der Abströmquerschnitt aus dem Brandraum frühzeitig und mit hinreichender Größe sicher geöffnet wird.

Im Regelfall bestimmt der (zu kleine) Abströmungsquerschnitt den einbringbaren Frischluftstrom und nicht etwa die (theoretische) Leistung des Zuluftventilators.

Soll eine Selbstentzündung des Rauchs verhindert werden, muss die Rauchtemperatur durch frühzeitige Einmischung eines hinreichend großen Frischluftstroms in den verrauchten Raum begrenzt werden. Für verschiedene zulässige Rauchtemperaturen wird der notwendige Frischluftmassenstrom in Abhängigkeit von der Brandleistung in Bild 4 dargestellt.

Der aus einem vollständig verrauchten Raum abzuführende Rauchmassenstrom entspricht dabei weitgehend dem Frischluftmassenstrom.

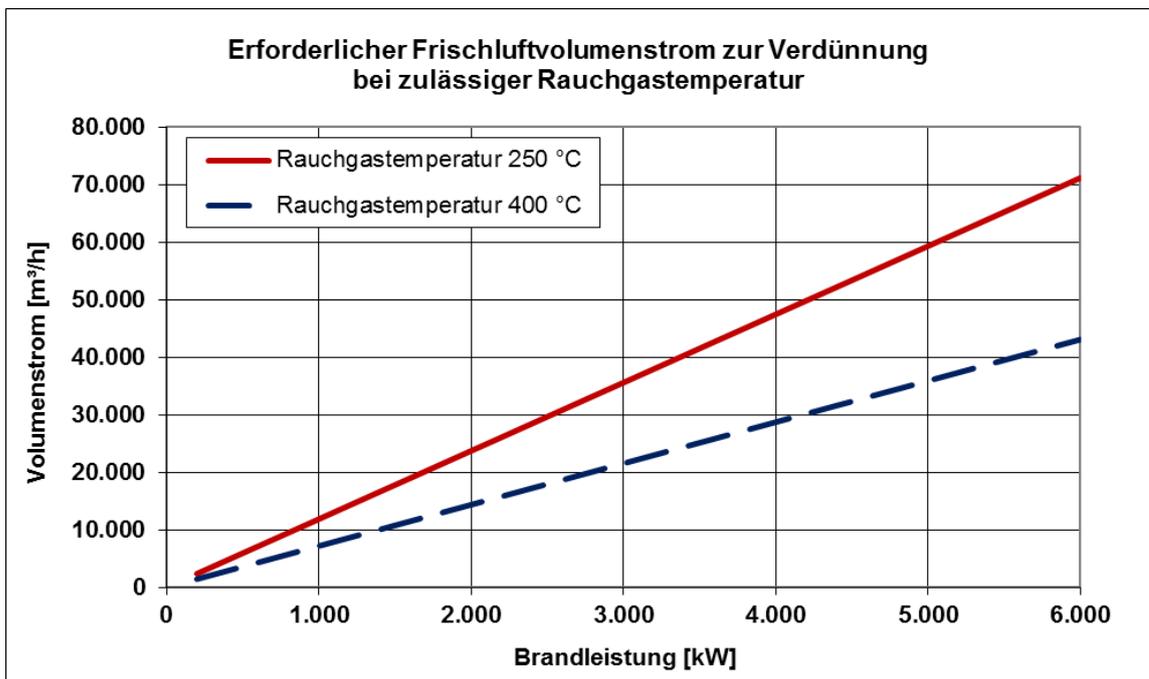


Bild 4: Erforderlicher Volumenstrom zur Begrenzung von Rauchtemperaturen
Quelle: I.F.I. GmbH

Die in Bild 4 gezeigten notwendigen Volumenströme zur Temperaturbegrenzung sind auch in kleinen Räumen in der Regel realisierbar.

Für die Erzeugung hinreichend großer Sichtweiten oder der Einhaltung von kurzfristig zumutbaren Konzentrationen sind dagegen (siehe Bild 5 bzw. 6) deutlich höhere Volumenströme erforderlich. Diese sind aber besonders für kleine Räume nicht mehr realisierbar.

Um eine wirkungsvolle Brandbekämpfung zu ermöglichen, kann der Fokus bei kleinen Räumen daher nur auf eine Begrenzung der Rauchtemperaturen gelegt werden, die unterhalb der Bedingungen für einen Flash-over liegen müssen.

7.1.2 Mittlere und große Räume ($\geq 200 \text{ m}^2$)

Die zugeführte Frischluft zur Verdünnung kann bei ausreichendem Volumenstrom der Herstellung von hinreichenden Sichtweiten und der Herstellung einer so geringen Schadstoffkonzentration in der verrauchten Raumatmosphäre dienen, dass eine Schädigung der Gesundheit durch Einatmen des Rauch-Luftgemisches bei einem kurzzeitigem Aufenthalt bis zu 30 Minuten vermieden wird. Der erforderliche Frischluftmassenstrom zur hinreichenden Verdünnung richtet sich im Wesentlichen nach dem anzusetzenden Bewertungskriterium (Temperatur, Sichtweite, Konzentration) und der beim Brand freigesetzten Rauchpartikelmenge und der anderen Schadstoffe.

Hinsichtlich der Sichtweite sollte eine Partikel- und Aerosolkonzentration von 40 mg/m^3 , entspricht einer Sichtweite von 10 m bei reflektierenden Fluchtwegskennzeichen,

generell nicht überschritten werden. In Abhängigkeit von der Brandleistung, dem Brandgut, den Verbrennungsbedingungen, des Kontrastes am Fluchtwegskennzeichen und der Stärke der Umgebungsbeleuchtung wird zur Einhaltung der Sichtweitenkriterien ein sehr großer Frischluftmassenstrom erforderlich. Dieser führt bei einer Verbrennung einer Mischbrandlast von 25 % Kunststoff und 75 % Holz zu einer Rauchtemperatur von $48 \text{ }^\circ\text{C}$ bei einer Sichtweite von 10 m und zu einer Rauchtemperatur von nur $28 \text{ }^\circ\text{C}$ bei einer Sichtweite von 35 m. Die erforderlichen Zuluftvolumenströme, die auch den abzuführenden Rauchvolumenströmen entsprechen, können in Abhängigkeit von der Brandleistung des Brandes Bild 5 entnommen werden. Die Volumenströme sind jedoch erheblich größer als zur Kontrolle der Rauchtemperaturen.

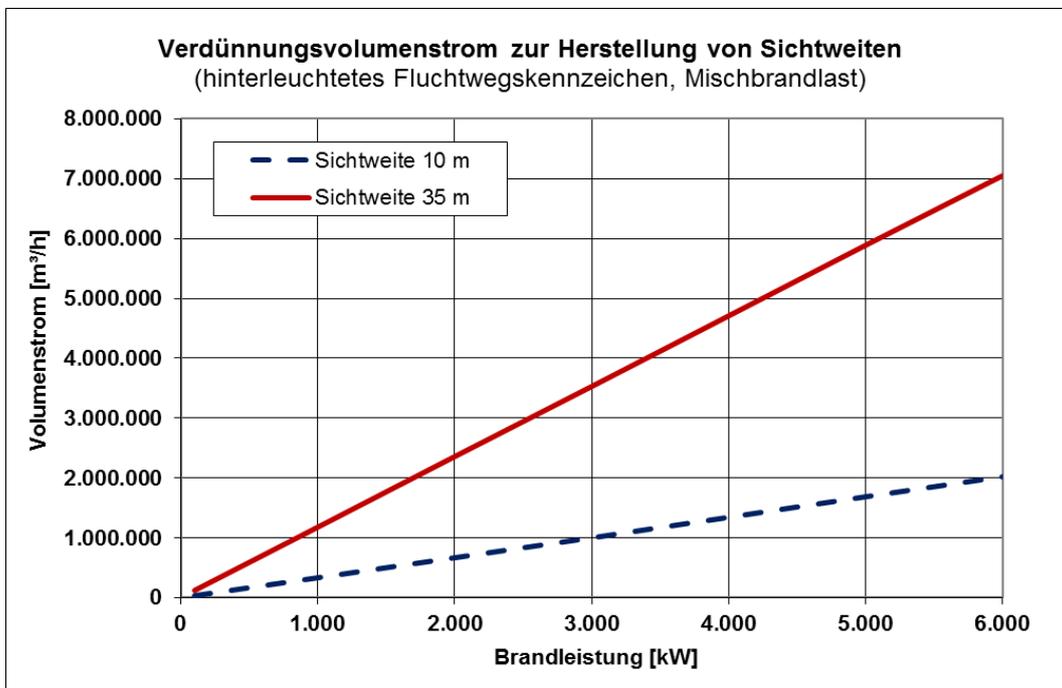


Bild 5: Erforderlicher Verdünnungsvolumenstrom zur Einhaltung von Sichtweiten bei Fluchtwegskennzeichen
Quelle: I.F.I. GmbH

Setzt man zur Schaffung einer kurzfristig zumutbaren Konzentration der Schadstoffe im Rauch das in der Literatur oft veröffentlichte übliche Verdünnungsverhältnis von $v = 1$ (m^3 Rauch) zu 200 (m^3 Frischluft) an, so werden in Abhängigkeit von der Art der Brandlast und der (beim Brand entstehenden) Brandleistung die in Bild 6 dargestellten Frischluftvolumenströme benötigt. Da hier der erforderliche Luftbedarf der betrachteten Brandstoffe bei einer stöchiometrischen Verbrennung kaum unterschiedlich ist, weichen die erforderlichen Frischluftvolumenströme bei der Verbrennung von Holz und

der Verbrennung einer Mischbrandlast kaum voneinander ab. Es zeigt sich, dass etwa die gleichen Zuluftvolumenströme für die Herstellung kurzzeitig zumutbarer Konzentrationen und zur Herstellung von Sichtweiten in einer Größe von nur ca. 6,5 m benötigt werden.

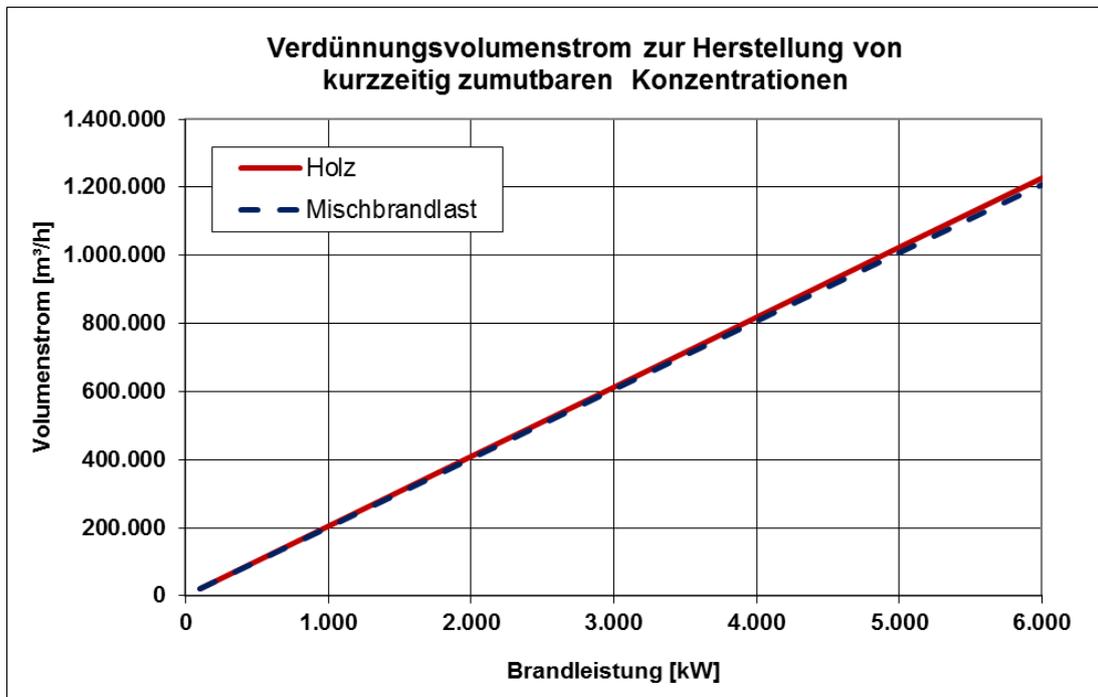


Bild 6: Erforderlicher Verdünnungsvolumenstrom zur Einhaltung gesundheitlich unbedenklicher Konzentrationen
Quelle: I.F.I. GmbH

Aufgrund des hohen Frischluftbedarfs und der damit verbundenen extremen Abkühlung des Rauch-Luftgemisches ist eine natürliche Abströmung aus dem verrauchten Raum nur mit vollkommen unrealistisch großen Rauchabström- und Frischlufternachströmflächen möglich (siehe Bild 7). Eine natürliche Zu- und Abströmung kann daher nur maximal (wenn überhaupt möglich!) bei sehr kleinen Brandleistungen realisiert werden.

Sofern maschinelle Entrauchungsanlagen zur Verdünnung eingesetzt werden (auch das ist nur bei sehr kleinen Brandleistungen möglich), sollten die eingesetzten Rauchventilatoren im Unterdruckbetrieb verwendet werden, um eine Rauchausbreitung in nicht verrauchte Bereiche zuverlässig zu verhindern, d.h. Absaugung des Rauchs. Die Frischlufternachströmung kann dabei passiv durch das Schaffen von Nachströmöffnungen erfolgen.

Da bei der Verdünnung keine Beschränkungen der Einströmgeschwindigkeiten zur Aufrechterhaltung von Schichten zu beachten sind, ist in diesem Fall lediglich zu berücksichtigen, dass der Druckverlust zur Einströmung der Frischluft in den Brandraum nicht mehr als 50 Pa beträgt (entspricht einer

Einströmgeschwindigkeit von ca. 9,4 m/s), damit die Türen des betroffenen Raumes noch geöffnet werden können. Die zulässige Türöffnungskraft darf dabei 100 N nicht überschreiten.

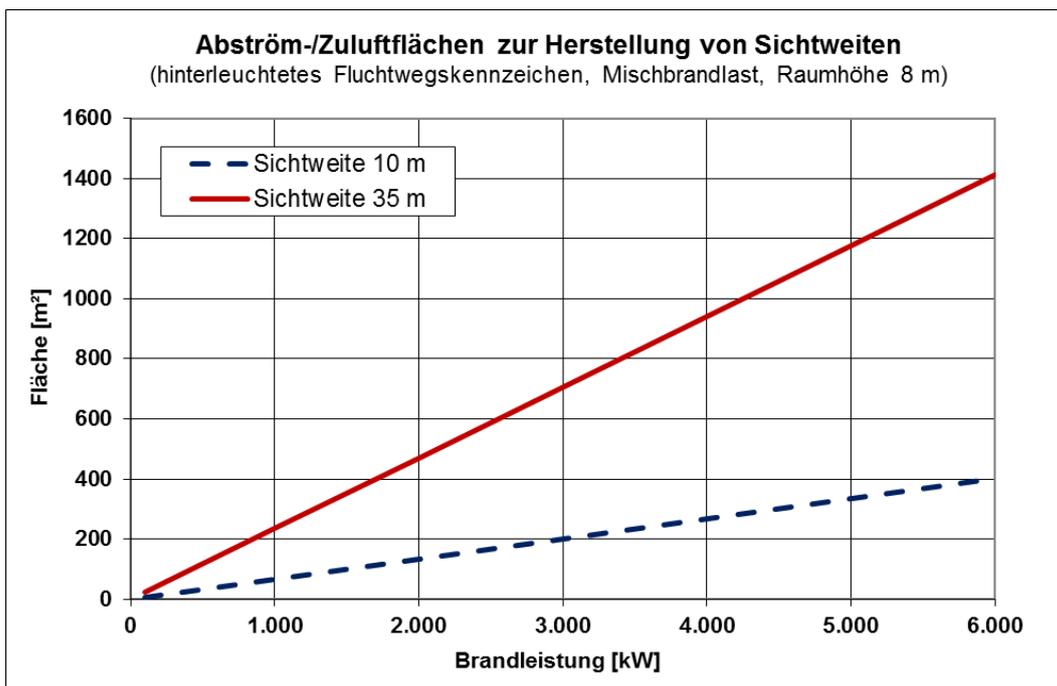


Bild 7: Erforderliche Abström- und Nachströmflächen einer natürlichen Entrauchung zur Einhaltung von Sichtweiten bei Fluchtwegskennzeichen, Mischbrandlast und einer Raumhöhe von 8 m
Quelle: TROX TLT GmbH

Eine Belüftung mit Druckbelüftern der Feuerwehr kann aufgrund der notwendigen sehr hohen durch den Brandraum zu führenden Volumenströme weder zur Erzeugung von hinreichenden Sichtweiten noch zur Erreichung zumutbarer Schadstoffkonzentrationen im Brandraum eingesetzt werden. Jedoch sind diese Ventilatoren gut geeignet, in nicht druckbelüfteten Treppenträumen eingedrungenen Rauch wieder abzuführen, wenn eine Abströmungsöffnung am oberen Ende des Treppenraumes durch die Feuerwehr geschaffen werden kann.

Das Eindringen von Rauch in Fluchtwege oder Zugangswege zum Brandraum kann mit den Druckbelüftern reduziert werden, wenn eine Abströmung aus dem Brandraum geschaffen werden kann. Die Lüfter werden zudem üblicherweise eingesetzt zur Rauchableitung nach einem Brandereignis (siehe Bild 8).

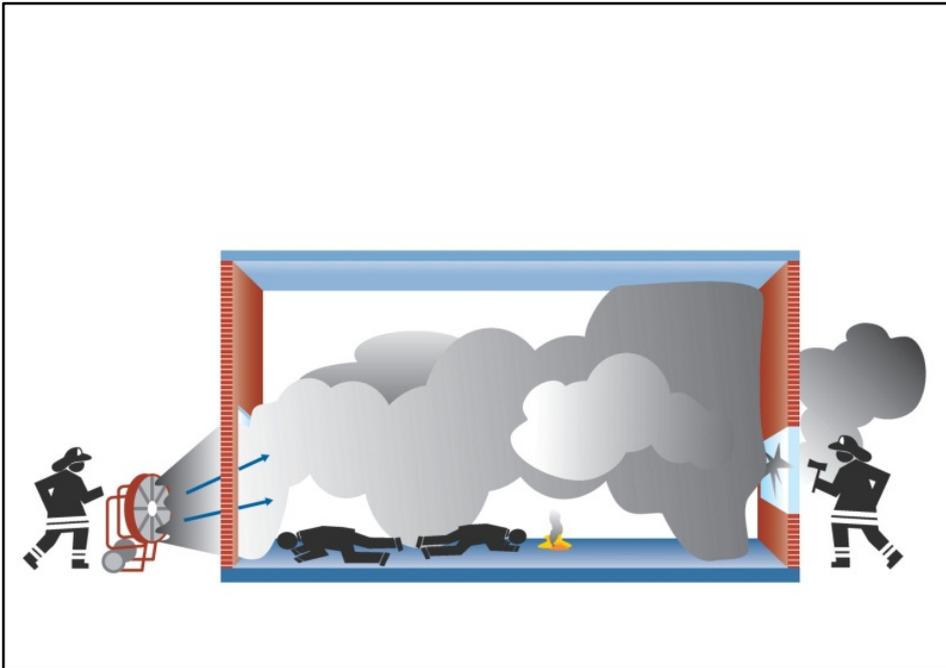


Bild 8: Mobile Druckbelüfter der Feuerwehr zur Rauchableitung nach einem Brandereignis
Quelle: TROX TLT GmbH

Außerhalb von Räumen liegende Fluchtwege

Sollen die Betrachtungen der Rauchverdünnung auf brandlastfreie Fluchtflure außerhalb der eigentlichen Brandräume gelegt werden, so ist hier als Ausgangsbasis der Verdünnungsberechnungen der aus dem Brandraum in den Flur eintretende Rauchvolumenstrom anzusetzen. Dieser ist dabei nicht nur vom Volumen des Brandraumes und dem Brandgeschehen abhängig, sondern auch von der Lage der Verbindungstür zwischen Brandraum und Flur. Dabei ist auch die zeitliche Entwicklung des Brandgeschehens von entscheidender Bedeutung. Sofern bei dem Brandgeschehen keine Schichtung eintritt, ist ein 400 m^2 großer Raum mit einer Raumhöhe von 8 m bei einer **schnellen Brandausbreitung** (Ausbreitungskoeffizient $\alpha = 0,047$) bereits nach $2 \text{ min } 30 \text{ s}$ so stark verrauchte, dass der Grenzwert der Gesundheitsgefährdung (Verdünnungsverhältnis $v = 200$) und damit auch eine Sichtweite von nur $6,5 \text{ m}$ bereits unterschritten wird.

Bei einer **mittleren Brandausbreitungsgeschwindigkeit** (Ausbreitungskoeffizient $\alpha = 0,0117$) wird dieser Wert nach 4 min erreicht.

Die zum Zeitpunkt der Grenzwertunterschreitung vorliegenden Brandleistungen sind dabei mit $\dot{Q} = 700 \text{ kW}$ bei mittlerer Ausbreitungsgeschwindigkeit und $\dot{Q} = 1100 \text{ kW}$ bei schneller Brandausbreitung immer noch recht klein.

Rauch tritt bei diesem Brandvorgang bereits nach ca. 1 min aus dem Brandraum in den Fluchtweg ein, der jedoch anfänglich weder den Grenzwert der Sichtweite noch den der Schadstoffkonzentration überschreitet. Der erforderliche Volumenstrom zur Verdünnung des Rauchs im Fluchtweg selbst ist sehr stark vom betrachteten Zeitpunkt und den Geometrien abhängig und kann daher nicht allgemein angegeben werden.

7.2 Entrauchung durch Schichtung

7.2.1 Kleine Räume (< 200 m²)

Die Ausbreitung des Rauchs wird bestimmt durch die Brandquelle, die einen nach oben gerichteten Thermikstrom (Plume) erzeugt. Da die aus dem unteren Bereich durch den Verbrennungsprozess und durch Konvektion entnommene und die auf dem Strömungsweg dem Thermikstrahl durch Induktion zugemischte Umgebungsluft auch im unteren Bereich wieder ersetzt werden muss, ergibt sich in nicht entrauchten Räumen zwangsläufig eine Rezirkulation des Rauchs im gesamten Brandraum [8].

Das heißt: In kleineren Räumen finden unmittelbar nach Brandbeginn Rückströmungen aus dem verrauchten Deckenbereich in den bodennahen Aufenthaltsbereich statt.

Die hier beschriebenen Strömungsprozesse sind den Heizungs- und Klimatechnikern schon seit langem bekannt; Konvektionsheizsysteme nutzen diese Zusammenhänge seit Jahrhunderten. Die Rauchausbreitung im Brandfall ist mit diesen Strömungsprozessen direkt vergleichbar, lediglich hinsichtlich der Intensität ist der Brand etwas Besonderes.

Die Bewertung von Rauchströmungen im Brandfall kann sich deshalb auf seit langem bewährte Erkenntnisse der Strömungstechnik abstützen.

Da darüber hinaus in kleinen Räumen zum einen die nutzbaren Zu- und Abluftquerschnitte begrenzt sind und andererseits die für eine Schichtung max. erlaubten Einstromgeschwindigkeiten zu beachten sind, können für kleine Räume im Regelfall keine stabilen Rauchsichten nachgewiesen werden.

7.2.2 Mittlere und große Räume (≥ 200 m²)

Bei der Entrauchung durch Schichtung werden allein durch strömungstechnische Maßnahmen in Räumen ab ca. 200 m² Fläche zwei voneinander horizontal getrennte Schichten erzeugt; eine unterhalb der Raumdecke sich aufbauende Rauchsicht und eine im Aufenthaltsbereich der Personen befindliche raucharme Schicht, in der z. B. Rettungsmaßnahmen vorgenommen werden können und die nahezu keine Beeinträchtigung für die Sicht bietet (siehe Bild 9).

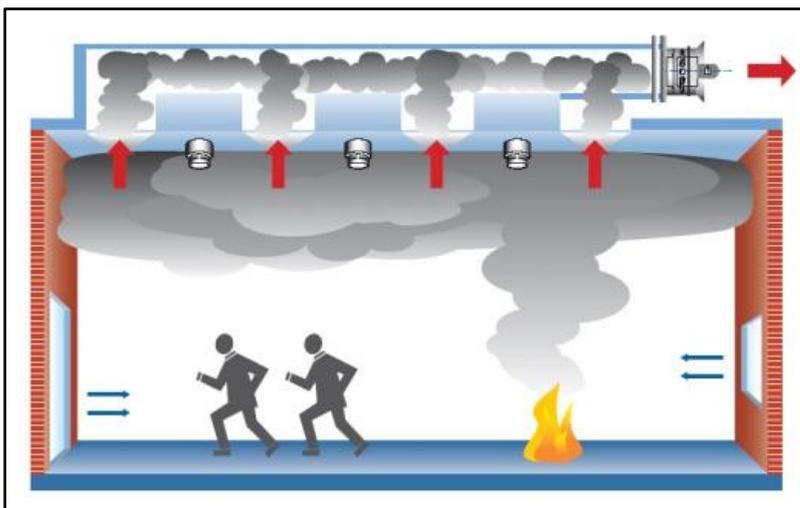


Bild 9: Rauchschichtung bei Einsatz von MRA
Quelle: TROX TLT GmbH

Erreicht wird dies dadurch, dass der sich durch das Brandgeschehen entwickelnde Thermikstrahl Schadstoffe und Rußpartikel nach oben in den Deckenbereich transportiert. Auf dem Wege nach oben nimmt der Thermikstrahl Luft aus der Umgebung auf

und vergrößert dabei sein Volumen und seine Masse, verringert aber seine Temperatur. Dieser eingemischte Luftanteil ist deutlich größer als der an der Brandstelle entstandene Rauchmassenstrom.

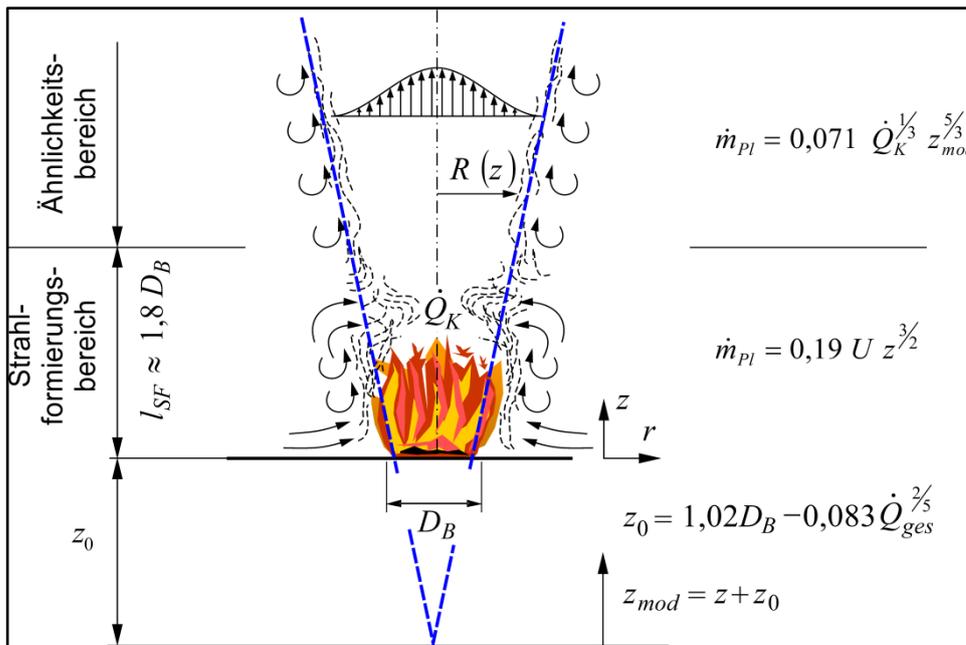


Bild 10: Schematische Darstellung des Thermikstrahls
Quelle: Imtech AG

Bild 10 zeigt schematisch den Thermikstrahl unterteilt nach dem Formierungsbereich im brandnahen Umfeld und dem Ähnlichkeitsbereich. Die nebenstehende Gleichung beschreibt die Zunahme des Massenstromes im Ähnlichkeitsbereich durch Induktion in Abhängigkeit von der Lauflänge des Strahles, beginnend mit dem virtuellen Ursprung, dessen Abstand von der Brandfläche mit z_0 aufgeführt ist. Die Gesamtlauflänge ermittelt sich dann aus dem Abstand von der Brandfläche zuzüglich des Abstandes des virtuellen Ursprunges z_0 . Die Massenzunahme im Strahlformierungsbereich folgt einer anderen Gesetzmäßigkeit. Sie ist maßgeblich abhängig vom Umfang der Brandfläche.

Damit eine Entrauchung stattfinden und der Thermikvolumenstrom im oberen Hallenbereich abgeführt werden kann, ist dieser abgeführte Volumenstrom im unteren Raumbereich bodennah und impulsarm durch unkontaminierte zugeführte Zuluft zu ersetzen.

Unter diesen Bedingungen können sich die erwähnten Schichten im Raum ausbilden.

Die Schichtgrenze ergibt sich in einer Raumhöhe, in welcher der abgeführte Rauchvolumenstrom mit dem nach oben transportierten Volumenstrom übereinstimmt.

Da die Volumenzunahme überproportional mit dem Laufweg des Thermikstrahles erfolgt, ist die Höhe der angesetzten raucharmer Schicht von entscheidender Bedeutung für die Dimensionierung von Rauchabzugsanlagen.

Die Druckverluste sind jeweils an den Ab- und Zuluftöffnungen zu überwinden. Bei natürlichen Entrauchungseinrichtungen muss dies durch den Auftriebsdruck, der sich aus der Dichtedifferenz zwischen der Rauchschiicht und der Außenluft sowie der Dicke der Rauchschiicht ergibt, aufgebracht werden. Bei mechanischer Ableitung muss dieser Druckabfall durch den Entrauchungsventilator überwunden werden.

In der Regel werden in Räumen größer 200 m² erforderliche Schichthöhen von mindestens h_{SG} = 2,5 m über Boden angesetzt. Die dazu erforderlichen Volumenströme zeigt Bild 11 in Abhängigkeit von der Brandleistung am Brandherd und der Dichtekorrektur. Von Einfluss ist auch die flächenspezifische Brandleistung.

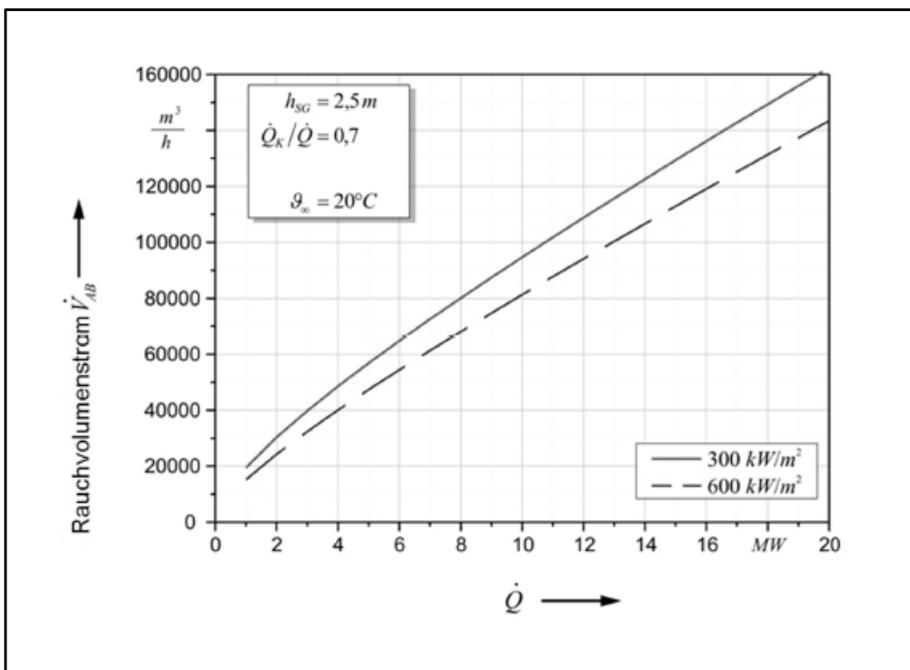


Bild 11: Erforderliche Volumenströme zur Sicherstellung von 2,5 m raucharmer Schicht
Quelle: Imtech AG

Plume-Gleichung nach Heskestad (gültig im Ähnlichkeitsbereich)

$$\dot{m}_{pl} = 0,071 \dot{Q}_K^{1/3} (z + z_0)^{5/3}$$

mit

$$z_0 = 1,02 D_B - 0,083 \dot{Q}_{ges}^{2/5}$$

Plume-Gleichung nach Hinkley (gültig im Strahlformierungsbereich)

$$\dot{m}_{pl} = 0,19 U z^{3/2}$$

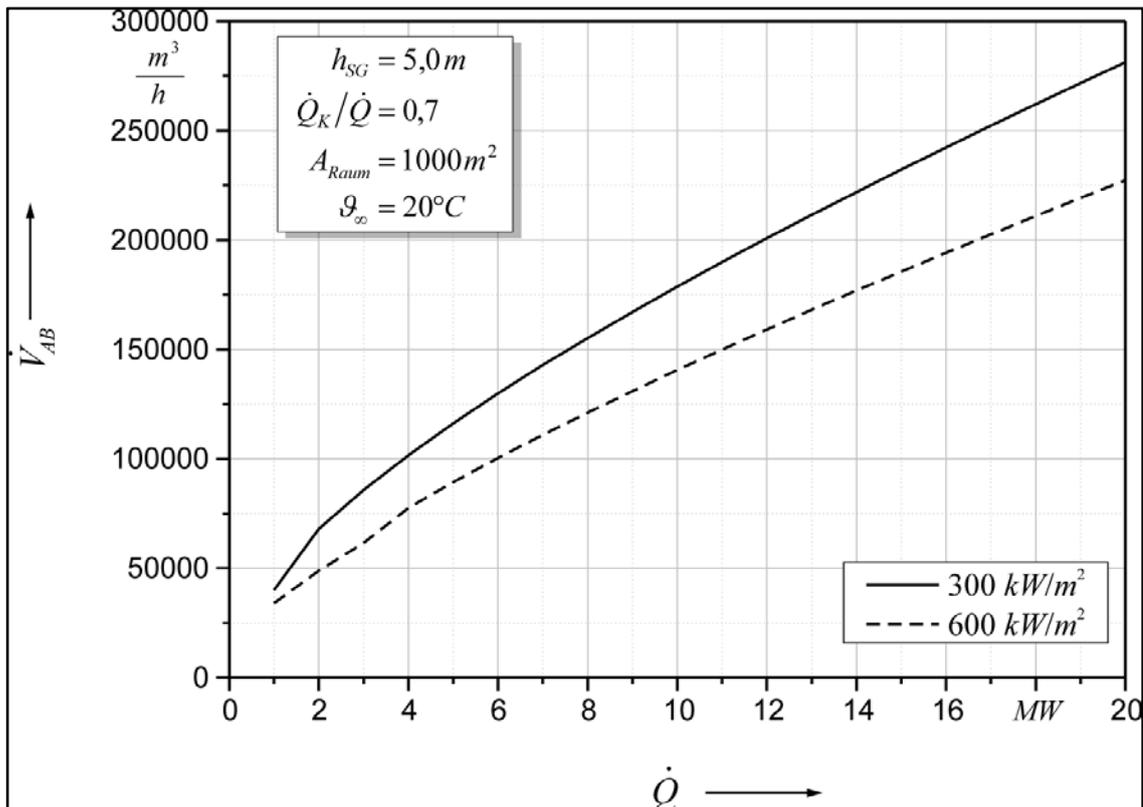


Bild 12: Erforderliche Volumenströme zur Sicherstellung einer 5 m raucharmen Schicht
Quelle: Imtech AG

In Bildern 11 und 12 sind die beiden in den einschlägigen Normen (DIN 18232-2 für NRA und DIN 18232-5 für MRA) genannten flächenspezifischen Brandleistungen von 300 kW/m^2 und 600 kW/m^2 eingetragen.

Damit sich bei diesem Zusammenhang von Zu- und Abluft eine stabile Trennung zwischen der Rauchschiicht und der raucharmen Schicht einstellt und erhalten bleibt, sind einige Randbedingungen einzuhalten, zum Beispiel:

- Bei mehreren Rauchabschnitten in einem Raum ist die notwendige Zuluffläche auf einen Rauchabschnitt zu bemessen. Als natürliche Zuluftöffnungen können verwendet werden:
 - Eigenständige Zulufteinrichtungen
 - Tore, Türen oder Fenster, die automatisch geöffnet werden können.



Bild 13: Hinweisschild für die Zuluftöffnung
Quelle: FVLR e.V.

Die Kennzeichnung der Zuluftöffnungen ist erforderlich, damit Mitarbeiter diese nicht durch Regale, Container, usw. zustellen (siehe Bild 13).

- Die Zuluftnachströmung in den relevanten Rauchabschnitt muss deutlich unterhalb der Rauchschiicht möglichst impulsarm (mit niedriger Eintrittsgeschwindigkeit $< 1 \text{ m/s}$) erfolgen.
- Die Zuluftnachströmung muss zeitgleich mit Auslösung des Rauchabzuges zur Verfügung stehen.

- Bei der natürlichen Entrauchung sollte grundsätzlich eine natürliche Nachströmung (ausreichend große Zuluftfläche) gewählt werden. Maschinelle Schichtzulftsysteme können ebenfalls und auch zusätzlich verwendet werden.
- Es sollte ein Abstand zwischen der Oberkante der Zuluftöffnung und der Rauchschichtunterkante von ca. 1 m eingehalten werden.
- Die Nachströmöffnung ist so auszubilden, dass keine in die Rauchschicht hineinwirkenden Strömungskomponenten entstehen (ungünstig sind z. B. in Richtung Brandraum gekippte Fensterflügel).
- Technische Einrichtungen, wie z. B. Lüftungsanlagen, bei denen die Zuluftdurchlässe im oberen Raumbereich angeordnet sind, müssen im Brandfall schnellstmöglich – am besten automatisch – abgeschaltet werden. Eine maschinelle Zuluft über bodennahe Schichtluft- oder Quellluftauslässe unterstützt die Ausbildung der raucharmen Schicht und kann im Brandfall in Betrieb bleiben.
- Bei der maschinellen Entrauchung kann neben der natürlichen Nachströmung auch eine bodennahe impulsarm zugeführte maschinelle Nachströmung gewählt werden. Die Zuluft-Eintrittsgeschwindigkeit in den Raum bzw. in den betroffenen Rauchabschnitt soll auch hier < 1 m/s betragen.
- Bei Räumen mit natürlicher Entrauchung sind die Rauchabzugsöffnungen gleichmäßig verteilt an der höchsten Stelle des Rauchabschnittes anzuordnen. Es ist darauf zu achten, dass nur die NRA-Einrichtungen in dem vom Brand betroffenen Rauchabschnitt geöffnet werden. In benachbart gelegenen Rauchabschnitten sollten die NRA-Einrichtungen geschlossen bleiben.
- Eine Verteilung von mindestens einem NRWG pro 200 m^2 Bodenfläche muss eingehalten werden [9].

- Die Abstände der Absaugstellen zur Rauchschichtgrenze müssen auch bei maschineller Entrauchung die Plug-holing-Effekte berücksichtigen.
- Die zulässigen Rauchabschnittsflächen [10] dürfen nicht überschritten werden.

8 Rauchabschnittsbildung

8.1 Allgemeines

Bei größeren Räumen ist es häufig erforderlich, Rauchabschnitte zu bilden, bzw. Gebäudebereiche so weit voneinander abzuschirmen, dass über einen längeren Zeitraum der Rauchübertritt von einem Gebäudeteil in den anderen verhindert wird. Dieses kann durch bauliche Maßnahmen wie Rauchschränzen oder Trennwände erfolgen. Sind derartige Lösungen nicht möglich oder aus architektonischen Gründen nicht erwünscht, können auch lufttechnische Maßnahmen in Form von Absaugungen zur Direkterfassung von Rauch eingesetzt werden.

Die Auslösegruppen der automatischen Brandmeldeanlagen müssen auf die Rauchabschnitte abgestimmt sein.

8.2 Rauchabschnittsbildung durch bauliche Maßnahmen

Statische oder bewegliche Rauchschränzen, die von der Decke in den Raum hinein reichen, bilden zusammen mit den Wänden als bauliche Maßnahme die Grenzen der Rauchabschnitte. Die zu projektierende Rauchschichtdicke muss seitlich von der Rauchschränze gehalten und damit an einer weiteren horizontalen Ausbreitung gehindert werden. Damit kann die Rauchschichtdicke maximal der vorhandenen Rauchschränzhöhe entsprechen.

Bei raucharmen Schichten < 4 m muss die Rauchschränzenunterkante noch $0,5$ m in die raucharme Schicht hineinführen, um die bei diesen geringen Höhen besonders kritische Situation des Überlaufens von Rauch in benachbarte Abschnitte zu verhindern.

Anforderungen an Rauchschrürzen sind in DIN EN 12101-1 zusammengefasst.

Die Rauchschrürzen müssen möglichst dicht zum Baukörper anschließen.

Liegen die Decken auf Deckenträgern größerer Bauhöhe mit geschlossener Oberfläche auf, können diese als Rauchschrürzen angeordnet werden.

Soll eine Rauchschrürze im normalen Nutzungsfall des Gebäudes nicht oder nicht in ihrer vollen Höhe sichtbar sein, können auch von der Decke abrollbare Konstruktionen eingesetzt werden. Damit solche beweglichen Rauchschrürzen nicht mit eventuell vorhandenen Deckenkränen kollidieren, sind Sicherungsmaßnahmen vorzusehen [11].

8.3 Rauchabschnittsbildung durch lufttechnische Maßnahmen

Ist die Ausbildung von Rauchabschnitten weder durch statische noch durch bewegliche Rauchschrürzen möglich, können auch lufttechnische Maßnahmen zur Ausbildung von Rauchabschnitten eingesetzt werden. Hierzu gehören Rauch-Direkterfassungssysteme (z. B. „Drallhauben“, „Drallrohre“ usw.).

Hiermit verbunden sind:

- a) Durch die Erfassung des Rauches in unmittelbarer Nähe zum Brandherd wird die Lauflänge des Thermikstrahles minimiert und der in den Strahl eingetragene Luftanteil durch Induktionsprozesse reduziert. Damit verbunden ist auch eine Minimierung des abzusaugenden Rauchstromes.
- b) Die Rauchausbildung im Raum wird im Wesentlichen verhindert.

Die Entwicklung der Direkterfassung erfolgt in Analogie zur Ableitung von Schadstoffen in der Industrie, bei der die beim Produktionsprozess entstehenden Gefahrstoffe möglichst unmittelbar an der Entstehungsstelle erfasst und abgeführt werden.

Bei Direkterfassungen handelt es sich strömungstechnisch um Senkenströmungen, die eine ausgesprochen geringe Tiefenwirkung aufweisen. Der Grund liegt in der raschen Geschwindigkeitsabnahme ausgehend von der Absaugstelle, die in der 3. Potenz mit dem Abstand abnimmt.

Da Schadstoffströmungen, die aufgrund thermischer Einflüsse eine Eigenbewegung besitzen, nur sehr begrenzt durch Einzelabsaugöffnungen erfasst werden können, ist vorzugsweise das im Folgenden beschriebene System anzuwenden.

Ist der Strömungsimpuls der zu erfassenden Strömung höher als der durch die Absaugung bewirkte Strömungsimpuls in Richtung zur Absaugstelle, wird der Schadstoffstrom an der Erfassungsstelle vorbeigeführt.

Die zur Rauch-Direkterfassung geeigneten Erfassungselemente müssen folgende Eigenschaften erbringen:

- Gleichförmiges linienförmiges Absaugen
- Der Unterdruck an der Erfassungsstelle muss mindestens so groß sein, dass der Strömungsimpuls einer mit Eigenbewegung ausgestatteten Rauchströmung aufgenommen werden kann.

Beide Forderungen werden von einer Strömungsform erreicht, die in der Natur bei Wirbelstürmen auftritt. Die Basis für ein derartig um ein Zentrum mit hoher Umfangsgeschwindigkeit rotierendes Strömungsfeld bildet die Überlagerung von Unterdruckgebieten, die technisch durch zyklische Anordnung von Strömungssenken realisiert wird.

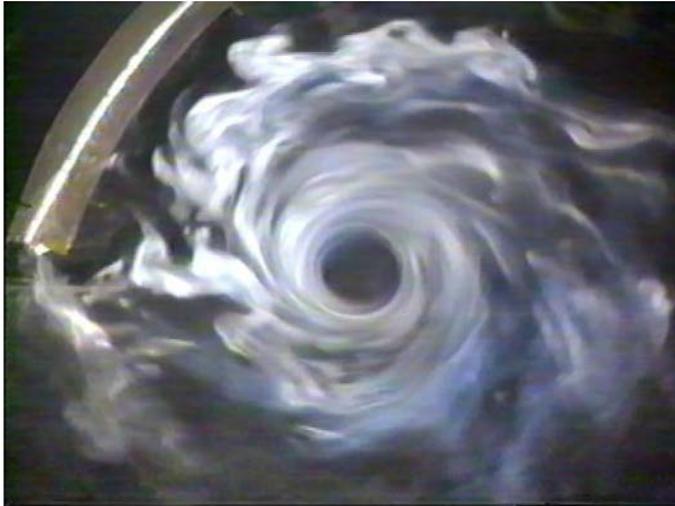


Bild 14: Wirbel-/Drallströmung im Querschnitt, sichtbar gemacht durch Rauchzugabe
Quelle: Imtech AG

Die Umfangsgeschwindigkeiten in Zentrumsnähe erreichen dabei auch in kleinem Maßstab Werte von ca. 250 km/h. Damit verbunden sind Unterdrücke im Zentrum von $> 1\ 000\ \text{Pa}$, wie sie sonst mit keiner anderen Erfassungseinrichtung aufgebracht werden können.

Längs der Drehachse, die sich von Absaugung zu Absaugung erstreckt, bleiben die Unterdrücke konstant, sodass sich eine gleichförmige, linienförmige Erfassung einstellt. Bild 14 zeigt einen Querschnitt durch die Drallströmung mit dem im Strömungsinnen liegenden Drallzentrum.

Durch die auf logarithmischen Spiralen zum Zentrum verlaufenden Stromlinien wird der Stoffstrom in das Drallzentrum geleitet und dort zur Absaugstelle geführt.

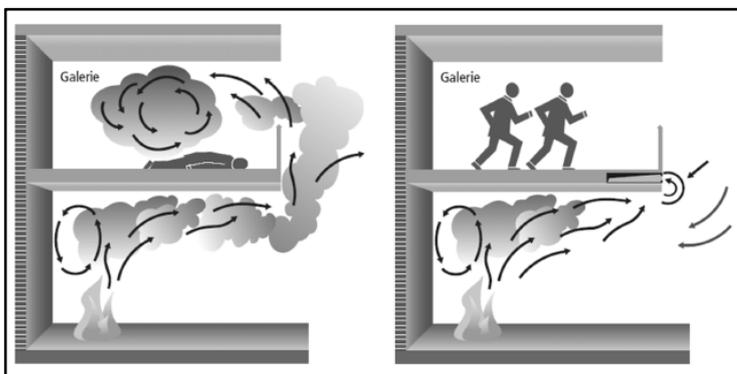


Bild 15: Wirkung einer Direkterfassung von Rauch bei Galerien
Quelle: TROX TLT GmbH

Mit derartigen Erfassungseinrichtungen lassen sich u. a. folgende Problemfelder lösen:

- Rauchübertritt in Gebäudeteile mit großen Raumhöhen oder an Treppenaufgängen
- Rauchfreihaltung von Galeriebereichen
- Aufbau nicht baulich getrennter Rauchabschnitte.

Diese Rauchabschnittsbildung kann durch Direkterfassungselemente in Form von Drallelementen erfolgen.

Typische Anwendungsbeispiele hierfür sind, neben den schon erwähnten Galerien auch Gänge und Tunnel für ankommende Reisende in Flughäfen, Gepäckausgaben in Flughäfen oder Rauchabschnittsbildung in Tiefgaragen, z. B. an Auffahrtsrampen sowie Verbindungsgänge in unterirdischen Verkehrsanlagen.



Bild 16: Rauchabschnittsbildung durch Drall- oder Wirbelhaube
Quelle: TROX TLT GmbH

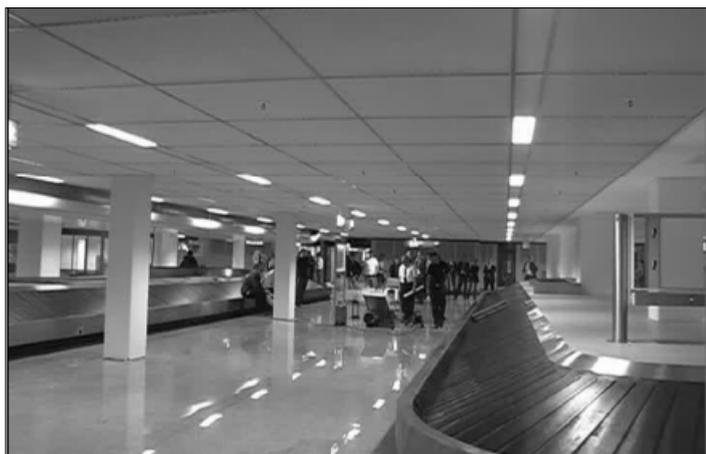


Bild 17: Beispiel einer Rauchabschnittsbildung durch Drall- oder Wirbelhauben
Quelle: Imtech AG

8.4 Rauchabschnittsbildung bei geöffneten Türen

Da Rauch eine höhere Temperatur aufweist als die Luft der Umgebung, wird ein Druckgefälle zwischen der Rauchschrift und der Umgebung erzeugt mit der Folge, dass bei hinreichend abgesunkener Rauchschrift Rauch unterhalb des oberen Türsturzes einer zwischen Brandraum und Umgebung

geöffneten Türe abströmt. Um dieses zu verhindern, sind Luftströmungen erforderlich, die entgegen der Strömungsrichtung des Rauches in den Brandraum eintreten. Dieses kann durch entsprechende Rauchabführung im Brandraum erreicht werden.

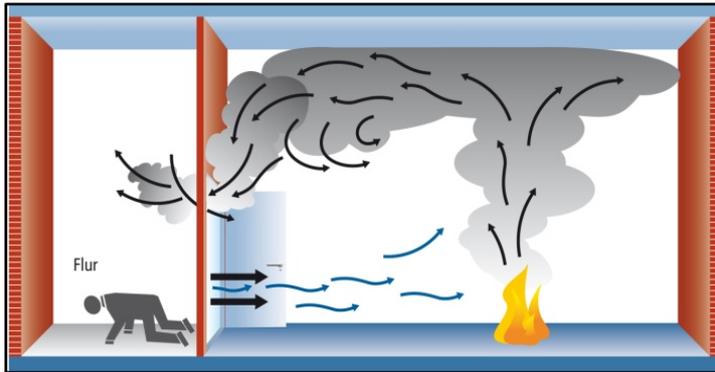


Bild 18: Türbereich ohne Abschirmung
Quelle: TROX TLT GmbH

Da die erforderlichen Luftströme abhängig sind von der Temperaturdifferenz zwischen Rauch und Umgebung, können zur Abschirmung von Türen erhebliche Luftströme erforderlich werden (siehe Bild 19).

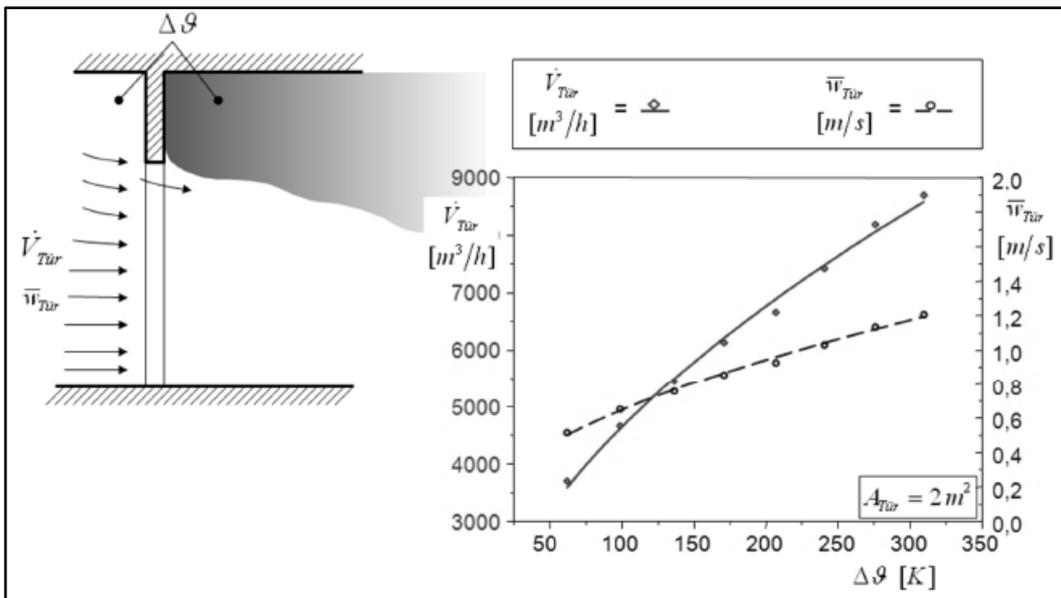


Bild 19: Beispiel einer Türabschirmung durch Volumenströme
Quelle: Imtech AG

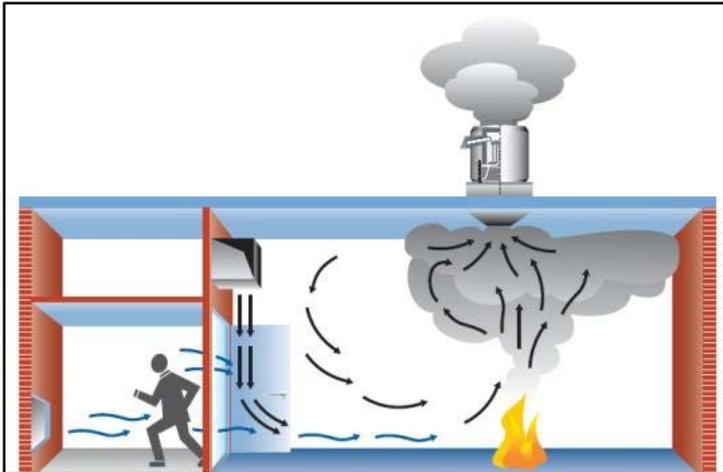


Bild 20: Beispiel einer Abschirmung von Türbereichen durch Luftschleier
Quelle: TROX TLT GmbH

Wenn die erforderlichen Volumenströme durch eine andere Maßnahme nicht zur Verfügung stehen, kann die Türöffnung auch durch eine zusätzliche Luftschleiereinrichtung geschützt werden.

Durch die nach unten gerichtete Strömung des Luftschleiers wird in Verbindung mit der einströmenden Frischluft und der Rauchabführung aus dem Brandraum verhindert, dass Rauch über die in Bild 20 dargestellte Türöffnung in benachbarte Räume eindringt.

9 Beispiele für die Entrauchung von Großgaragen und Hochregallagern

9.1 Allgemeines

Nachstehend werden Beispiele für die Entrauchung von speziellen Sonderbauten dargestellt. Bei den beschriebenen Großgaragen und Hochregallagern kann man aufgrund besonderer Rahmenbedingungen auf folgende Regeln zurückgreifen.

9.2 Geschlossene Großgaragen

9.2.1 Allgemeines

Die Auswahl eines Entrauchungskonzeptes für geschlossene Großgaragen (> 1 000 m²), bei denen z. B. die baurechtlich zulässigen Rauchabschnittsgrößen überschritten werden, hängt vor allem von der Fläche und Höhe des Garagenraums und dem zu erreichenden Schutzziel ab.

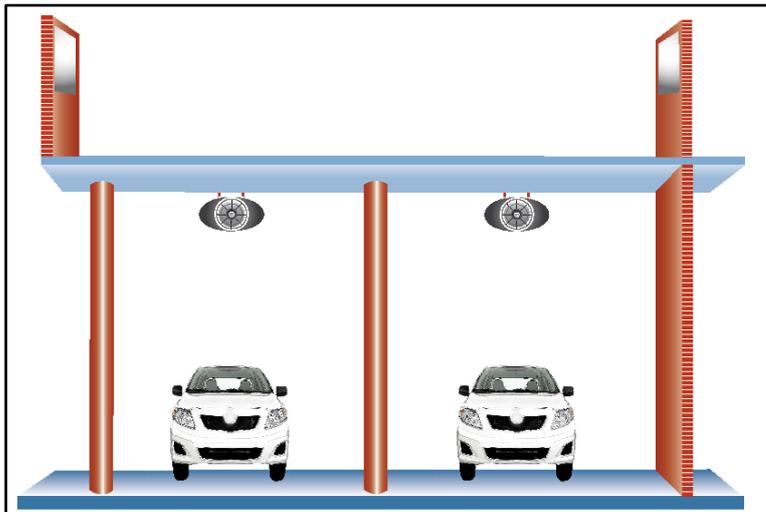


Bild 5 a Jet-Ventilatoren

Quelle: TROX TLT GmbH

9.2.2 Entrauchung einer Großgarage mittels NRA

Liegt eine Garage mit mindestens 3,5 m lichter Höhe überwiegend unter Erdniveau und ist die Decke gleichzeitig das Dach (z. B. begrünte Dachfläche), kann diese Garage

über eine NRA entrauchet werden. Hier ist die Zuluftnachführung, z. B. über separate Schächte, einzubringen.

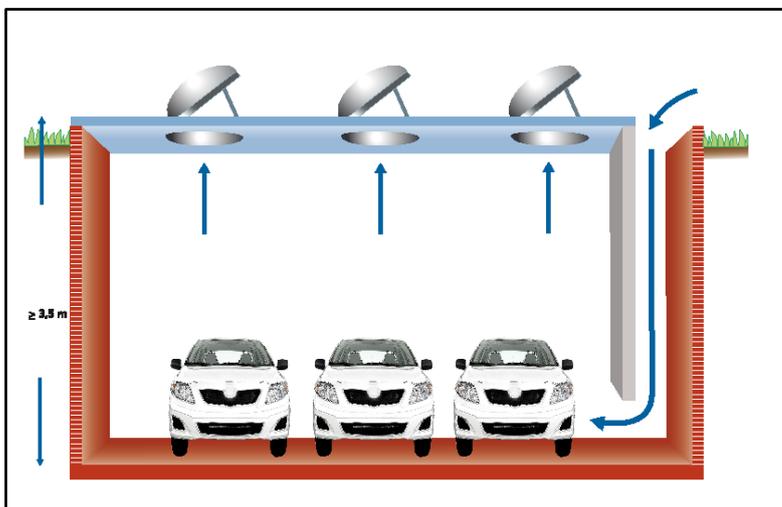


Bild 3 Unterirdische Garage mit NRA im Dach eingebaut

9.2.3 Entrauchung einer Garage mittels MRA

In Tiefgaragen mit oberer Bebauung und mit mindestens 3,5 m Raumhöhe, kann eine traditionelle maschinelle Rauchabzugsanlage eingesetzt werden. Die Projektierung kann nach DIN 18232-5 erfolgen.

9.2.4 Entrauchung einer Garage mittels Lüftungsanlage

Bei Großgaragen handelt es sich oft um geschlossene Baukörper in den tieferen Geschosslagen, zumeist ohne die Möglichkeit einer natürlichen Lüftung. Es können im Normalbetrieb hohe Emissionen durch Kfz-Abgase entstehen, die einen Luftaustausch zwingend notwendig machen.

Bei der konventionellen Lüftungsanlage, die nach einigen Garagenverordnungen auch zur Rauchabfuhr mit verwendet werden darf, erfolgt die Luftführung über ein komplexes Kanalsystem innerhalb der Garage zu einem meist doppelstufigen Axialventilator, der in der Regel auf dem Dach der Tiefgarage oder in einer Technikzentrale innerhalb des Parkhauses installiert ist.

Bei der Detektion eines Brandes bekommt hierdurch die Entrauchungsfunktion der Anlage gegenüber der Lüftungsfunktion dem Grundsatz nach die höhere Priorität. Bei der

Umschaltung der Anlage vom normalen Szenario "Lüftungsbetrieb" zum "Entrauchungsbetrieb" bedeutet das in den meisten Fällen einen Einsatz der gesamten Lüftungsleistung. Der betroffene Rauchabschnitt wird aber durch solche Maßnahmen im Gegensatz zu einer richtig bemessenen Entrauchungsanlage nach Abschnitt 9.2.3, nicht wirksam vor Verrauchung geschützt.

9.2.5 Entrauchung einer Garage mittels Impulsventilatoren

Besonders für Tiefgaragen mit Raumhöhen mit weniger als 3,5 m ist nicht mehr von der Ausbildung getrennter Schichten auszugehen. Es ist von einer kompletten Verrauchung auszugehen. Hier werden Impuls- oder Jet-Ventilatoren eingesetzt, die den Rauch horizontal in bestimmte Bereiche des Raumes schieben. Dort werden die Rauchgase über eine traditionelle maschinelle Rauchabzugsanlage aus dem Raum und dem Gebäude herausgeleitet. Der Anordnung, Art und Verteilung der Zuluftnachführung ist eine hohe Bedeutung beizumessen.

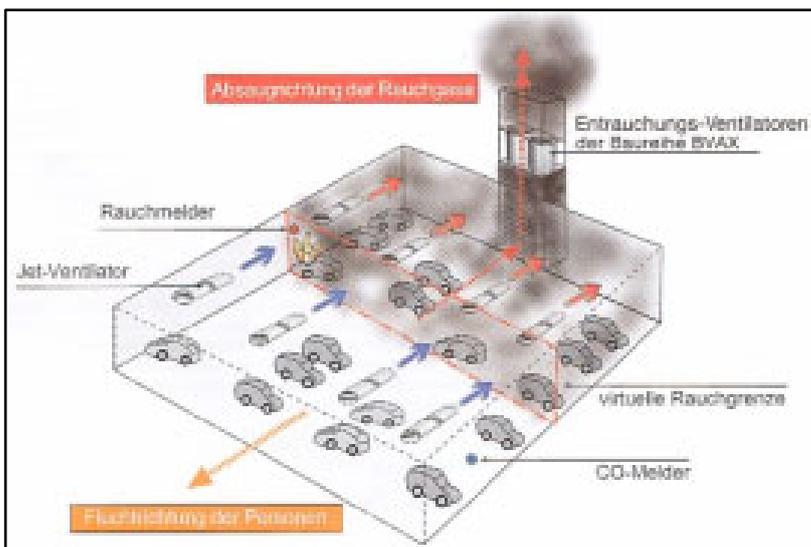


Bild 23: Garage mit Impulsventilatoren und MRA
Quelle: TROX TLT GmbH

Es entstehen so Raumbereiche, die geringer mit Rauch belastet und solche, die intensiv verraucht sind. Durch die gering verrauchten Bereiche kann die Feuerwehr unter Sichtbedingungen zur Brandbekämpfung vorgehen. Die Auslösung einer solchen auch „Garagenentrauchung“ genannten Anlage erfolgt über eine flächendeckende BMA nach VDE 0833.

Ist der Brandfall detektiert, laufen zuerst die Ventilatoren der traditionellen MRA an, die im Raum bereits in Verbindung mit der erforderlichen Zuluft eine Grundströmung bilden.

Dann erfolgt die Evakuierung der Garage nach deren Abschluss erst die Impuls- oder Jet-Ventilatoren zugeschaltet werden. Für die Projektierung einer solchen Garagenentrauchung wird zurzeit eine europäische Norm (EN 12101-11) erarbeitet.



Bild 24: Impulsventilatoren unter der Decke einer Tiefgarage
Quelle: TROX TLT GmbH

9.3 Entrauchung von Hochregallagern

Der Begriff des „Hochregallagers“ bzw. der „Hochregalanlage“ wird von verschiedenen Beteiligten oft sehr unterschiedlich verstanden und angewendet. Das Hochregallager ist ein Raum, in dem neben einer Produktion oder auch Konfektionierung unter anderem auch hohe Regale stehen, und in dem sich im Regelfall Menschen aufhalten. Die Hochregalanlage ist normalerweise eine raumfüllende vollautomatische Lagermaschine, wo im Regelfall außer für Wartungsarbeiten der Aufenthalt von Menschen nicht erlaubt ist.

Je nach Interpretation ist für die fachgerechte Auslegung und Ausführung einer Rauchabzugsanlage das jeweilige Schutzniveau zu untersuchen. Ohne RWA wird bei den im Hochregallager vorhandenen sehr großen Brandlasten und guten Ventilationsbedingungen auch ein großer und hoher Raum in wenigen Minuten verrauchen.

Wird eine installierte RWA über Thermomaximalmelder (Grundausstattung der natürlichen Rauchabzugsgeräte nach DIN EN 12101-2) ausgelöst, wird die Entrauchung bei den vorhandenen sehr großen Raumhöhen erst sehr spät wirksam, der Raum wird im Regelfall bereits erheblich verraucht sein.

Wird die installierte RWA dagegen über eine Brandmeldeanlage oder zumindest über zusätzliche Rauchmelder aktiviert, wird sich durch die erheblich frühzeitigere Auslösung auch in solch hohen Räumen eines Hochregallagers eine untere raucharme Schicht bilden können (siehe VDI 3564).

Mit einer Rauchabzugsanlage können verschiedene funktionale Anforderungen zum Erreichen unterschiedlicher Schutzziele erfüllt werden.

Dies sind unter anderen folgende Schutzziele:

A Unterstützung von Personen, die sich beim Ausbruch eines Brandes in den Räumen aufhalten zur Selbstrettung. Hierzu ist in der Regel die Bildung einer raucharmen Schicht im unteren Raumbereich erforderlich.

B Damit Personen, die nicht selbst den Raum verlassen können, durch Dritte (überwiegend durch die Feuerwehr) gerettet werden können, muss diese, wenn sie den Raum betritt, auch eine ausreichende Sicht haben. Für die Fremdrettung ist ebenfalls eine ausreichende raucharme Schicht erforderlich.

C Damit die eintreffende Feuerwehr den Brand möglichst noch im Innenangriff bekämpfen kann, ist das schnelle Erkennen von Brandherden unverzichtbar. Auch hier unterstützt die raucharme Schicht die Feuerwehr.

D Durch eine fachgerecht geplante und installierte RWA wird sich im Brandfall die Rauchsicht im oberen Raumbereich konzentrieren. Einrichtungsgegenstände aber auch Gebäudeteile im unteren Raumbereich werden durch den Rauch nicht oder nur gering kontaminiert.

Durch die abfließende Wärmemenge wird die thermische Belastung des Gebäudes erheblich reduziert. Liegen alle Brandlasten im raucharmen Bereich, sind auch die sogenannten Wipfelbrände nicht oder erst zeitverzögert am Brandgeschehen beteiligt.

E Ist das Feuer gelöscht oder geht es darum, den Raum bzw. das Gebäude wieder betreten zu können, muss aller entstandener Rauch abgeleitet werden können.

Bei der Konzeption einer Rauchabzugsanlage für Hochregallager ist die wesentlichste Fragestellung, ob sich in dem Raum im Brandfall Personen aufhalten können (Selbstrettung) und ob die Feuerwehr den Raum zur Rettung und/oder zum Löschangriff betreten muss. In diesen Fällen ist eine Rauch- und Wärmeabzugsanlage vorzusehen, die raucharme Schichten ausbilden wird. Die Projektierung kann nach DIN 18232 durchgeführt werden.

In Fällen einer vollautomatischen Lagermaschine kann die erforderliche Entrauchungsanlage nach VDI 3564 ausgeführt werden.

9.3.1 Entrauchung von Hochregallagern mit anwesenden Personen

Häufig sind in der Praxis große Räume vorhanden, in denen sich Produktions- oder Konfektionierungsarbeitsplätze befinden und gleichzeitig einige höhere Regale vorhanden sind. Im Brandfall sind hier die Schutzziele A, B, C, D und E (siehe 9.3) zu realisieren, das heißt, es ist eine raucharme Schicht vorzusehen.

Der Nachweis und die Projektierung dieser raucharmen Schicht können z. B. nach DIN 18232-2 für NRA oder nach DIN 18232-5 für MRA erfolgen.

Ein weiterer in der Praxis häufig vorzufindender Fall ist, dass ein Raum ohne Produktions- oder Konfektionierungsarbeitsplätze nahezu ausschließlich mit hohen Regalen ausgerüstet ist, wobei aber diese Regale manuell bedient werden.

Auch hier ist im Brandfall die Selbst- und Fremdrettung zu realisieren sowie die Feuerwehr beim Innenangriff zu unterstützen, da diese Lager im Gegensatz zu den vollautomatischen Hochregallagern oftmals auch nicht mit Regal-Sprinkleranlagen versehen sind. Hier sind also ebenfalls die Schutzziele A, B, C, D und E (siehe 9.3) zu beachten. Deshalb sind auch diese Lager mit einer raucharmen Schicht zu konzeptionieren.

9.3.2 Entrauchung von Hochregallagern ohne anwesenden Personen

Die vollautomatischen Hochregalanlagen, die von anderen Räumen durch eine Schleuse getrennt die Waren vollautomatisch zu- und abgeführt bekommen und diese dann ebenfalls vollautomatisch ein- und auslagern, erfordern im Brandfall keine Selbst- und Fremdrettungsmaßnahmen, da in diesem Lager der Aufenthalt von Personen, mit Ausnahme von Wartungsarbeiten, nicht stattfindet. Damit spielen die Schutzziele A und B hier keine Rolle. Sind diese Hochregalanlagen nach der VDI 3564 ausgeführt, ist darüber hinaus eine Regalsprinklerung vorgesehen, so dass auch die Feuerwehr hier keinen Innenangriff vornehmen muss. Damit entfällt auch die Anforderung auf das Schutzziel C.

Wird von Seiten des Betreibers auf das Schutzziel D verzichtet, müsste in diesem Fall nur das Schutzziel E berücksichtigt werden. Hier ist deshalb nur eine allerdings sehr reduzierte Rauchabzugsanlage erforderlich. VDI 3564 gibt hierzu entsprechende Projektierungsvorgaben.

10 Rauchableitung aus Kellerräumen

Kellerräume werden bei einem Brand schnell verrauchen, da sie in der Regel niedrig und in kleinere Flächen unterteilt sind. Wegen der meist fehlenden sofortigen Entrauchung bilden sich auch schnell hohe Temperaturen und durch eine zunehmend unvollständige Verbrennung explosive Gasgemische. Öffnet die Feuerwehr dann bei ihrem Einsatz Türen oder Fenster zu diesem Raum, besteht die Gefahr der Durchzündung.

Weiter besteht bei fehlender Entrauchung die Gefahr der Rauchverschleppung in benachbarte Nutzungseinheiten (z. B. den Treppenraum) und durch den beim Löschen entstehenden Wasserdampf ergibt sich eine nicht zu unterschätzende Verbrühungsgefahr für die Einsatzkräfte.

Wird dagegen zu einem möglichst frühen Zeitpunkt nach der Brandentstehung das Raumvolumen durchspült, kann neben einer Temperaturbegrenzung auch die Explosionsgefahr im Gasgemisch reduziert werden. Dafür muss ein entsprechender maschineller Rauchabzug mit automatischer Frühauslösung (über Rauchmelder) installiert sein und eine Alarmierung der Feuerwehr erfolgen.

Eine Projektgruppe im Arbeitsausschuss DIN 18232 erarbeitet zurzeit einen entsprechenden Normenentwurf zur Kellerentrauchung.

11 Rauchfreihaltung von bestimmten Rettungswegen

11.1 Allgemeines

Anlagen zur Rauchfreihaltung haben die Aufgabe, Flucht- und Rettungswege, insbesondere Sicherheitstreppenräume, rauchfrei zu halten, um flüchtenden Personen die Flucht zu ermöglichen und den Einsatzkräften der Feuerwehr die Fremdrettung und die Durchführung von Löschmaßnahmen zu erleichtern. Soll das Eindringen von Rauch in Rettungswege verhindert werden, die offen (offene Gänge, Fluchttunnel, etc.), durch größere Leckagen (Lichtöffnungen etc.) oder durch Türen mit dem Brandraum in Verbindung stehen, so kann dies nur durch eine gezielte Frischluftströmung von den zu schützenden Bereichen in den Brandbereich erreicht werden. Eine solche Strömung kann sich dann einstellen, wenn entweder im Brandraum ein entsprechender Unterdruck gegenüber dem zu schützenden Raum oder in dem zu schützenden Raum ein Überdruck zum Brandraum erzeugt wird. Bei einem Unterdruck im Brandraum ist darüber hinaus sicherzustellen, dass eine permanente Frischluftnachströmung zum zu schützenden Raum erfolgt.

Bei einem Überdruck im zu schützenden Bereich (Treppenraum, Fluchttunnel, Flur, etc.) muss sichergestellt sein, dass eine permanente, hinreichend große Abströmung aus dem Brandraum erfolgt. Diese Anlagen werden in der Regel Differenzdruck-Anlage oder Differenzdruck-System genannt.

11.2 Treppenräume

Die Anforderungen an Druckdifferenzanlagen für Treppenräumen sind in der VDMA 24188 geregelt. Wesentliche Eckpunkte daraus sind im Anhang D aufgeführt.

11.3 Rauchfreihaltung von Fluren oder Fluchttunneln

Für Flure und Fluchttunnel sind die in Sicherheitstrepptenräumen verwendeten Systeme sinngemäß anzuwenden. Hierbei sind die Begrenzung des Maximaldrucks (maximale Türöffnungskraft 100 N) und die Sicherstellung einer minimalen Durchströmungsgeschwindigkeit (minimal 1 m/s, maximal 5 m/s) aus dem zu schützenden Rettungsweg in den Brandbereich hinein als wesentliche Auslegungsgrößen zu beachten.

12 Sonderbauten mit komplexen Geometrien

Für Regelbauten und Sonderbauten ohne Abweichungen für die es Verordnungen oder Richtlinien gibt, ist die Ausführung der Entrauchungsanlage baurechtlich meist geregelt. Bei Gebäuden die nicht geregelt sind oder deren Aufbau sehr komplexe Strukturen aufweisen, empfiehlt sich zur Festlegung des Entrauchungskonzeptes die Durchführung einer Entrauchungsstudie, die mit CFD-Analysen oder in Form von Modellversuchen durchgeführt werden kann.

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.

13 Beteiligte Autoren

Dipl.-Ing. Dieter Brein, Karlsruher Institut für Technologie (KIT) Karlsruhe
(Forschungsstelle für Brandschutztechnik, Hertzstraße 16, 76187 Karlsruhe, dieter.brein@kit.edu)

Prof. Dr.-Ing. Rüdiger Detzer, Imtech AG Hamburg
(Imtech AG, Tilsiter Straße 162, 22047 Hamburg, ruediger.detzer@imtech.de)

Prof. Dr. - Ing. Hans-Joachim Gerhardt und **Dipl.-Ing. Bernd Konrath**, Institut für Industrie- Aerodynamik, Aachen
(I.F.I. GmbH, Welkenrather Straße 120, 52074 Aachen, info@ifi-aachen.de)

Dipl.-Ing. Udo Jung, TROX TLT GmbH, Bad Hersfeld
(TROX TLT GmbH, Am Weinberg 68, 36251 Bad Hersfeld, u.jung@trox-tlt.de)

Dipl. - Ing. Thomas Hegger, FVLR Detmold
(FVLR, Ernst-Hilker-Straße 2, 32758 Detmold, info@fvlr.de)

Prof. Dr. - Ing. Dietmar Hosser und **Dr.-Ing. Gary Blume**, Technische Universität Braunschweig
(Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz, Beethovenstraße 52, 38106 Braunschweig, g.blume@ibmb.tu-bs.de)

Prof. Dr. - Ing. Wolfram Klingsch, Bergische Universität Wuppertal
(BPK Brandschutz Planung Klingsch, Wahlerstraße 32, 40472 Düsseldorf, office-dus@bpk-mail.de)

Prof. Reinhard Ries und **Brandamtsrat Jürgen Walter**, Berufsfeuerwehr Frankfurt
(Berufsfeuerwehr Frankfurt, Feuerwehrstraße 1, 60435 Frankfurt am Main, juergen.walter.amt37@Stadt-frankfurt.de)

Diese Experten wurden beim VDMA organisatorisch unterstützt durch

Christine Montigny (M. Sc.)
(VDMA e.V., Lyoner Straße 18, 60528 Frankfurt am Main, christine.montigny@vdma.org).

14 Weiterführende Literatur

[1] Experimentelle Untersuchungen zur Ermittlung brandspezifischer Parameter von Büroobjekten; Kurzbericht zur VDMA-Tagung am 08.03.01; Prof. Dr.-Ing. W. Klingsch, Wuppertal

[2] Tewarson, A.: Generation of heat and gaseous, liquid and solid products in fires, in SFPE Handbook of fire protection engineering, 4. Auflage, Quincy, Massachusetts (USA) 2008

[3] Leitfaden Ingenieurmethoden des Brandschutzes, Technischer Bericht 4/01, 2. Auflage, Vereinigung zur Förderung des Deutschen Brandschutzes (2009), Kapitel 8

[4] John R.: Forschungsbericht Nr. 50 Ermittlung der erforderlichen Luftvolumenströme zur Verdünnung von Brandrauch auf ein die Gesundheit und Sichtbarkeit in Rettungswegen gewährleistendes Maß Teil 2: Optischen Brandrauchdichte; Karlsruhe 1983

[5] John R.: Forschungsbericht Nr. 59 Ermittlung der erforderlichen Luftvolumenströme zur Verdünnung von Brandrauch auf ein die Gesundheit und Sichtbarkeit in Rettungswegen gewährleistendes Maß Teil 3: Fortsetzung von Teil 2: Optischen Brandrauchdichte; Karlsruhe 1987

[6] John R.: Forschungsbericht Nr. 66 Ermittlung der erforderlichen Luftvolumenströme zur Verdünnung von Brandrauch auf ein die Gesundheit und Sichtbarkeit in Rettungswegen gewährleistendes Maß Teil 4: Brandrauch und Sichtbarkeit von Hinweiszeichen in Rettungswegen; Karlsruhe 1988

[7] John R.: Forschungsbericht Nr. 75 Ermittlung der erforderlichen Luftvolumenströme zur Verdünnung von Brandrauch auf ein die Gesundheit und Sichtbarkeit in Rettungswegen gewährleistendes Maß Teil 5: Brandversuche in natürlichem Maßstab zur Beurteilung der entstehenden Brandrauchkonzentrationen und deren Abbau sowie die daraus resultierenden Maßnahmen zum Schutz von Rettungswegen; Karlsruhe 1990

[8] Prof. Dr.-Ing. R. Detzer; Rauchausbreitung in Gebäuden, zu beziehen über www.fvlr.de

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

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

[11] Richtlinie 6, Sicherstellung der Wirkungsweise von beweglichen Rauchschürzen in Hallen mit Laufkränen, FVLR Fachverband Tageslicht und Rauchschutz e.V.

VDMA Informationsblätter**Informationsblatt 1:**

Nachströmung im Brandraum

Informationsblatt 3:

Entrauchung von Räumen im Brandfall — Notwendige Zeiten für die Entfluchtung, Rettung und Löschangriff

Informationsblatt 4:

Prinzipien zur Rauchableitung

Bauphysik Kalender 2006

Brandschutz

Ernst & Sohn Verlag, Berlin

ISBN 13 978-3-433-01920-0

Brandschutzkonzepte für Sonderbauten**Aufbau und Methodik**

Wolfgang Jansen

Books on Demand GmbH, Norderstedt

ISBN 10:3-8334-3219-5

ISBN 13:978-3-8334-3219-4

FVLR-Hefte zum Rauchschutz:

kostenlos anzufordern/downloadbar unter www.fvlr.de/publikationen

Fachplanung Entrauchung

H.-J. Gerhardt (Herausgeber)

Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart 2011

ISBN: 978-3-8167-8476-0

Rauch- und Wärmeabzug als Bestandteil moderner Brandschutzkonzepte

Eckhard Hagen
F.H Kleffmann – Verlag, Bochum
ISBN 3-87414-006-7

Rauch- und Wärmeabzugsanlagen

Karl-Heinz Quenzel, Office 213 Verlag, Berlin
ISBN 3-00000603-6

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, Chlor, Schwefelwasserstoff, Schwefeldioxid und Phosphorwasserstoff.

Zu den **organischen Brandzersetzungsprodukten** zählen hauptsächlich aromatische Kohlenwasserstoffe (Aromaten) wie Benzol und Styrol, polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK) wie Benzopyren 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 Rauchsicht 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 Rauch und Sichtweite

Im Folgenden werden Rauch und resultierende Sichtweite bei vollständiger Vermischung des Rauchs im Raum infolge ungünstiger Randbedingungen, Geometrien, Strömungsstörungen betrachtet. Die Nomenklatur zu den Anhängen B und C ist vollständig am Ende des Anhangs C angegeben.

Der bei der thermischen Verbrennung oder Verschwelung entstehende Rauchmassenstrom \dot{m}_{rauch} ist definiert als:

$$\dot{m}_{rauch} = y_{rauch} \times \dot{m} \quad (\text{Gl. B-1})$$

\dot{m} Durch Verbrennen / Verschwelen umgesetzte Masse [g/s]

y_{rauch} Rauchausbeute bei Verbrennung / Verschwelung [g/g]

Die Brandleistung \dot{Q} ist definiert als das Produkt aus durch Verbrennen umgesetzter Masse multipliziert mit ihrem Heizwert

$$\dot{Q} = \dot{m} * H_{u,eff} \quad (\text{Gl. B-2})$$

$H_{u,eff}$ effektiver unterer Heizwert der verbrennenden Masse [J/g]

In diesem einfachen Ansatz ist zu berücksichtigen, dass $H_{u,eff}$ zur Beschreibung der pro Masseneinheit freigesetzten Wärme eine veränderliche Größe ist, die von u.a. der Verbrennungsführung (brandlastgesteuerter oder ventilationsgesteuerter Brand) und stoffspezifischen Eigenschaften beeinflusst wird. Bei Mischbrandlasten zum Beispiel auch von den zuerst gezündeten Gegenständen, deren Ausbrandverhalten, flammhemmenden Zusätzen, Produktfeuchte etc. Der effektive untere Heizwert stets kleiner als der theoretische untere Heizwert bei vollständiger Verbrennung, den man aus Tabellenwerten ablesen kann, da zum Beispiel beim natürlichen Brand durch Rußbildung und/ oder andere Partikel/Aerosole ein Teil des Heizwertes nicht in Wärme umgesetzt wird. Als Anhaltswert gilt in vielen Fällen

$H_{u,eff} \approx 0,7 * H_{u,theor}$, zum Beispiel für feuchtes Holz.

Zeitlicher Verlauf der Brandleistung des Entstehungsbrandes $\dot{Q}(t)$

Der zeitliche Verlauf der Brandleistung in der Brandentstehungsphase wird häufig durch ein Zeitquadratgesetz abgebildet, wobei dies nur ein Beispiel für die Vielzahl möglicher Brandleistungsverläufe darstellt. Hiermit lässt sich sowohl das Ausbreitungsverhalten eines Brandes von einzelnen Gegenständen (Schränk, Sessel etc.) als auch von mehreren zueinander angeordneten Gegenständen bis zum Flash-over angeben. Auch bei flächig kreisförmiger Ausbreitung eines Brandes mit konstanter Ausbreitungsgeschwindigkeit ergibt sich ein Zeitquadratgesetz.

Dies kann man allgemein beschreiben durch

$$\dot{Q}(t) = \alpha * t^2 \quad (\text{Gl. B-3})$$

α Koeffizient [kW/s²],

Brandleistung in kW, Zeit in s.

Nähere Angaben findet man zum Beispiel im Leitfaden Brandschutzingenieurwesen der vfdb [3].

Die nachfolgenden Koeffizienten führen für unterschiedliche Zeiten (600/300/150/75 Sekunden) zur gleichen Brandleistung (1.055 kW), beschreiben somit unterschiedlich schnelle Brandentwicklungen.

| Brandentwicklung | Parameter α [kW/s ²] |
|------------------|---|
| langsam | 0,002931 |
| mittel | 0,011720 |
| schnell | 0,046890 |
| sehr schnell | 0,187600 |

Quelle: I.F.I. GmbH

Die Rauchausbeute y_{rauch} ist eine Größe, die von den Verbrennungsbedingungen abhängig ist. So ist beim Entstehungsbrand in seiner ersten Anfangsphase damit zu rechnen, dass dieser zunächst als

- Schwelbrand mit $y_{rauch} = 0,2$ (grober Anhaltswert) beginnt, beim Über-

gang zu einem offenen Flammenbrand mit hinreichender Ventilation bei einem plausiblen Grenzwert von 50 kW („Papierkorbbrand“) zu einer saubereren Verbrennung mit einer geringeren Ausbeute fortgesetzt wird,

- offener Flammenbrand $y_{rauch} = 0,1$ (grober Anhaltswert, bezieht Produkte mit Flammenschutzrüstung mit ein), bis der brandlastgesteuerte Brand in Abhängigkeit der Raumgröße / Raumöffnungen und den Wandeigenschaften auf einen ventilationsgesteuerten Brand übergeht auf den
- nach-Flash-over Brand mit $y_{rauch} = 0,2$ (grober Anhaltswert)

Alle y_{rauch} Kenngrößen sind im Sinne von Rechenwerten zu verstehen.

Für das Einsetzen des Flash-overs werden in der Fachliteratur verschiedene empirische Formeln aufgeführt, die jedoch nur für vergleichsweise kleine Räume Gültigkeit haben.

Ein Beispiel ist die Formel von Thomas für einen Raum mit einer geöffneten Tür oder einem geöffneten Fenster

$$\dot{Q}_{fo} = 7,8 * A_{Wand} + 378 * (A_{Vent} * h_{Vent}^{1/2}) \quad (\text{Gl. B-4})$$

mit

\dot{Q}_{fo} = Brandleistung beim Einsetzen des Flash-overs [kW]

A_{Wand} = Summe aller Oberflächen des Raums, abzüglich der Öffnung [m²]

A_{Vent} = Fläche der Ventilationsöffnung (z. B. Tür, Fenster, NRWG) [m²]

h_{Vent} = Höhe der Ventilationsöffnung [m]

Als alternativen Ansatz für das Einsetzen des Flashovers kann man über eine Wärme- und Stoffbilanz diejenige Brandleistung berechnen, bei der in einem angenommenen

Schichtenmodell (Zonenmodell mit oberer heißer und unterer kühler Zone) die obere Zone eine mittlere Temperatur von 500 - 600 °C überschreitet oder die brennbaren Oberflächen mit 20 kW/m² Wärmestrahlung beaufschlagt werden.

Somit lässt sich die Rauchausbeute in Abhängigkeit vom Brandverlauf / der Brandleistung in Näherung stark vereinfacht wie folgt darstellen:

| y_{rauch} [g/g] | Brandleistung \dot{Q} [kW] |
|-------------------|-------------------------------------|
| 0,2 | < 50 kW |
| 0,1 | 50 kW $\leq \dot{Q} < \dot{Q}_{fo}$ |
| 0,2 | $\dot{Q} > \dot{Q}_{fo}$ |

Quelle: I.F.I GmbH

Für die Masse an produziertem Rauch gilt innerhalb der genannten Grenzen allgemein im Zeitintervall (t₂ – t₁) mit angenommener Ausbreitung entsprechend einem Zeitquadratgesetz:

$$M = \int_{t_1}^{t_2} \dot{m} dt = \frac{1}{H_{u,eff}} \int_{t_1}^{t_2} \alpha t^2 dt = \frac{\alpha}{3 * H_{u,eff}} * (t_2^3 - t_1^3) \quad (Gl. B-5)$$

und somit bis zum Zeitpunkt t bei einem Brand (ab Zeitpunkt „0“) also dann, wenn y_{rauch} konstant ist (die Fallunterscheidung nach y_{rauch} in Abhängigkeit der Brandleistung ist hier nicht berücksichtigt):

$$M_{rauch} = y_{rauch} * M = y_{rauch} * \frac{\alpha}{3 * H_{u,eff}} t^3 \quad (Gl. B-6)$$

M = Abbrandmasse in einem festgelegten Zeitintervall [g]

M_{rauch} = Masse an in diesem Zeitintervall freigesetzten Rauchpartikeln [g]

α = Parameter für Branddynamik [kW/s²]

t = Zeit [s]

Erfolgt eine vollständige Vermischung des erzeugten Rauchs mit der Umgebungsluft im Raum, so ergibt sich die

Rauchkonzentration im Volumen bei völliger Vermischung

$$c_{rauch} = \frac{M_{rauch}}{V_{raum}} \quad (Gl. B-7)$$

c_{rauch} = Rauchkonzentration im Volumen [g/m³]

V_{raum} = Raumvolumen [m³]

Die Rauchkonzentration führt zu teilweiser Extinktion von Licht, wobei der Zusammenhang des Extinktionskoeffizienten mit der Rauchkonzentration der nachstehenden Gleichung folgt:

$$K = K_m * c_{rauch} \quad (Gl. B-8)$$

K = Extinktionskoeffizient [m⁻¹]

K_m = spezifische Extinktionsfläche [m²/g] (z. B. 7,6)

K_m ist eine Messgröße aus der Verbrennung / Verschwelung einer bestimmten Masse eines Stoffs in einem definierten Raumvolumen einer Versuchsanordnung und wird aus der Anwendung des Lambert-Beer-Gesetzes auf die Abschwächung eines das Volumen durchquerenden Lichtstrahls ermittelt.

Die Sichtweite oder Erkennungsweite ist mit dem Extinktionskoeffizienten nach folgender Gleichung verknüpft,

$$S = \frac{3 \dots 8}{K} \quad (Gl. B-9)$$

S = Sichtweite oder Erkennungsweite in m bei 40 lx Beleuchtungsstärke

Der Faktor 3...8 nimmt Bezug auf Eigenschaften des Rauchs (atemwegsreizend 3

führt zur Erkennungsweite, nicht atmwegs-reizend 8 führt zu Sichtweite). Die Erkennungsweite ist in Folge der Einwirkung von Reizgasen im Regelfall geringer als die Sichtweite, aber niemals größer.

Beispiel

Für einen sich „sehr schnell“ ausbreitenden Brand ergibt sich mit

$$y_{rauch} = 0,1 \text{ g/g}, \alpha = 0,047 \text{ kW/s}^2, K_m = 7,6 \text{ m}^2/\text{g}, \text{ Faktor} = 3 \text{ [m}^{-1}\text{]}, H_{u,eff} = 20 \text{ MJ/kg}$$

durch Einsetzen in die aus den vorher angegebenen Gleichungen abgeleitete Bestimmungsgleichung für die Sichtweite

$$S = \frac{(3...8) * 3 * H_{u,eff} * V_{raum}}{K_m * y_{rauch} * \alpha * t^3}$$

(Gl. B-10)

zu näherungsweise :

$$S = 5000 V_{raum} / t^3 \quad (t \text{ in s, } V \text{ in m}^3, S \text{ in m})$$

| Raumgrößen: (unverbindliche Beispiele) | | |
|--|---------|----------------|
| Kleiner Versammlungsraum | 700 | m ³ |
| Discount-Markt | 2.400 | m ³ |
| Kleine Sporthalle | 9.000 | m ³ |
| Produktions- und Lagergebäude | 30.000 | m ³ |
| Große Mehrzweckhalle | 100.000 | m ³ |

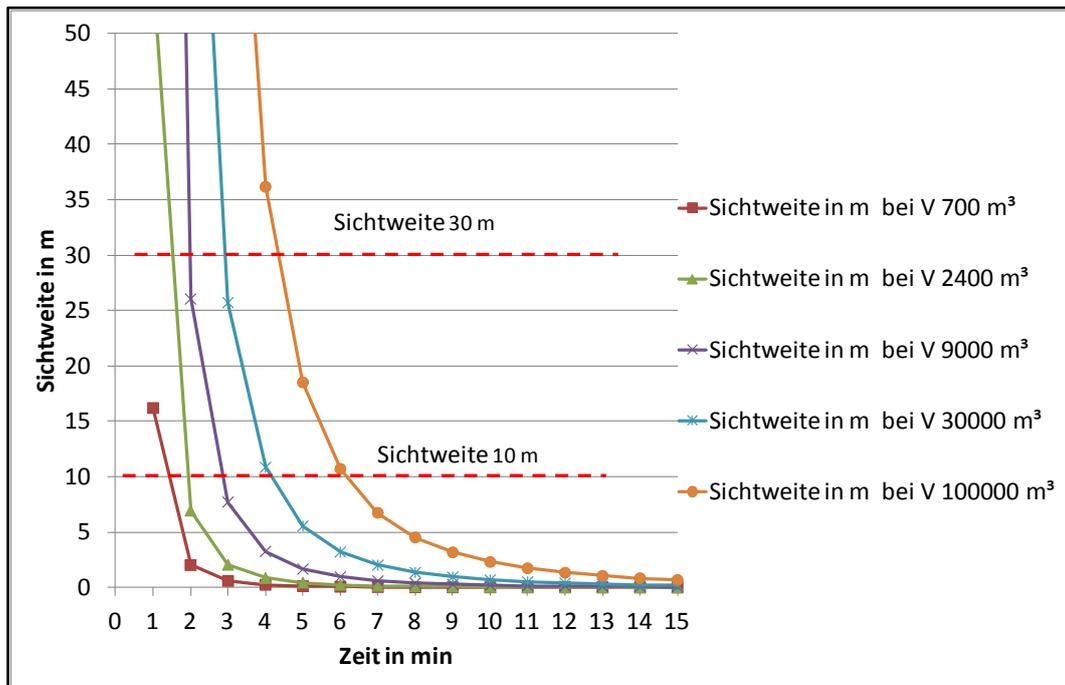


Bild B.1: Zeitlicher Verlauf der Sichtweite bei vollständiger Vermischung des Rauches in unterschiedlichen Raumvolumen unter den im Text genannten Bedingungen
 Quelle: Karlsruher Institut für Technologie

**Anhang C
Formeln und Daten zur Verdünnung**

Die Betrachtungen zum Kapitel 7.1 gehen zurück auf die Untersuchungen von Reiner John [4] bis [5] im Rahmen der Arbeitsgemeinschaft der Innenministerien der Bundesländer Arbeitskreis V – Unterausschuss „Feuerwehrangelegenheiten“, die über einen Zeitraum von mehreren Jahren veröffentlicht wurden.

Als maximal zulässiger Extinktionskoeffizient K_{zul} wurde ein Wert von $0,12 \text{ m}^{-1}$ für ein reflektierendes Fluchtwegskennzeichen am Ende eines 25 m langen Flures angegeben.

Als maximal zulässiger Extinktionskoeffizient K_{zul} wurde ein Wert von $0,32 \text{ m}^{-1}$ für ein selbstleuchtendes Fluchtwegskennzeichen (Leuchtdichte ca. $1\,000 \text{ cd/m}^2$, Umgebungsbeleuchtungsstärke ca. 80 lx) am Ende eines 25 m langen Flures angegeben.

Verdünnungsberechnung

Der erforderliche Zuluftvolumenstrom

\dot{V}_{ZL} , um einen vorgegebenen Verdünnungsgrad v bei stöchiometrischer Verbrennung des Brandgutes zu erzielen, ist

$$\dot{V}_{ZL} = (v \cdot \dot{V}_{BRst}) - \dot{V}_{Lst} \quad (\text{Gl. C-1})$$

Dabei sind die Größen \dot{V}_{Lst} und \dot{V}_{BRst} entsprechend Gl. C-2 und C-3 definiert:

$$\dot{V}_{Lst} = \frac{\dot{Q} \cdot RG}{H_u \cdot \rho} \quad (\text{Gl. C-2})$$

$$\dot{V}_{BRst} = \frac{\dot{Q} \cdot LB}{H_u \cdot \rho} \quad (\text{Gl. C-3})$$

Mit:

$$\dot{V}_{ZL} = \text{Volumenstrom Zuluft (m}^3\text{/s)}$$

Berechnung der Sichtweite für mit Partikeln / Aerosolen beladenen Rauch

$$S = \frac{F \cdot \dot{V}_{ges} \cdot H_{u,eff}}{K_m \cdot y_{rauch} \cdot \dot{Q}} \quad (\text{Gl. C-4})$$

Erforderlicher Verdünnungsvolumenstrom zur Herstellung von Sichtweiten

$$\dot{V}_{erf} = \frac{S \cdot k_m \cdot y_{rauch} \cdot \dot{Q}}{F \cdot H_{u,eff}} \quad (\text{Gl. C-5})$$

Normdichte $\rho_{Norm} = 1,293 \text{ kg/m}^3$

Als Stoffdaten wurden eingesetzt:

| Brandstoff | Heizwerte | Luftbedarf stöchiometrisch | Rauchmenge |
|---------------------------|--------------|----------------------------|--------------|
| | MJ/kg | kg/kg | kg/kg |
| Heizöl | 42,8 | 14,3 | 15,3 |
| Kunststoff (Mittelwert) | 30,6 | 10,2 | 10,9 |
| Holz | 15,1 | 4,7 | 5,6 |
| 75% Holz + 25% Kunststoff | 19,0 | 6,0 | 6,9 |

Quelle: I.F.I. GmbH

Berechnung der Abkühlung des Rauchs

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot c_p \cdot \Delta \vartheta \quad (\text{Gl. C-6})$$

wird mit $\dot{m} = \rho \cdot \dot{V}$ umgerechnet in die durch Zufuhr von (kalter) Umgebungsluft resultierende Temperaturänderung des verdünnten Rauchs

$$\Delta \vartheta = \frac{\dot{Q}}{\dot{V} \cdot \rho \cdot c_p} \quad (\text{Gl. C-7})$$

Aus der Rauchtemperatur ergibt sich die gesamte thermische Druckdifferenz einer Schicht warmen Rauchs in einem Raum zu seiner Umgebung zu

$$\Delta p = \rho_L \cdot g \cdot h \cdot \left(1 - \frac{T_L}{T_{RG}}\right) \quad (\text{Gl. C-8})$$

Abström-/Zuluftflächen zur Herstellung von Sichtweiten

$$A_{sicht} = \frac{\dot{V}}{c_v \cdot v}$$

Beispiel 1: Verhinderung von Flash-over (zulässige Rauchtemperatur 500°C)

Heizwert von Holz- Kunststoffgemisch:

$$H_u = 20 \frac{MJ}{kg}$$

Spezifische Wärmekapazität von Luft:

$$c_p = 1,1 \frac{kJ}{kg \cdot K}$$

Zulässige Rauchtemperatur: $T_{zul} = 500^\circ C$

Ges. Wärmestrom: $\dot{Q} = 1000 kW$

Dichte Luft: $\rho_L = 1,2 \frac{kg}{m^3}$

Umgebungstemperatur: $T_0 = 20^\circ C$

Frischluftvolumenstrom:

$$\dot{V}_{ZL} = \frac{\dot{Q}}{c_p \cdot \rho \cdot (T_{zul} - T_0)} = \frac{1000000W}{1100 \frac{J}{kg \cdot K} \cdot 1,2 \frac{kg}{m^3} \cdot (500 - 20)K} \approx 1,578 \frac{m^3}{s}$$

Rauchvolumenstrom:

$$\dot{V}_{BRst} = \frac{\dot{V}_{ZL} \cdot (273 + T_{zul})}{273 + T_0} = \frac{1,578 \frac{m^3}{s} \cdot (273 + 500)}{273 + 20} \approx 4,163 \frac{m^3}{s}$$

Beispiel 2: Verdünnungsvolumenstrom zur Herstellung von Sichtweiten (35 m)

$$\dot{V} = \frac{S \cdot k_m \cdot y_{rauch} \cdot \dot{Q}}{F \cdot H_{u,eff}} = \frac{35m \cdot 7,6 \frac{m^2}{g} \cdot 0,0238 \frac{g}{g} \cdot 1000000W}{3 \cdot 20000000 \frac{J}{kg}} = 105,51 \frac{m^3}{s}$$

Mit:

$$K_m = 7,6 \frac{m^2}{g} = \text{spezifische Extinktionsfläche}$$

(m²/g) z.B. 7,6

$y_{rauch} = 0,024 \frac{g}{g}$ = Rauchausbeute (g/g) bei

stöchiometrischer Verbrennung

$H_{eff} = 20 \frac{MJ}{kg}$ = effektiver Heizwert (J/kg)

$\dot{Q} = 1000000W$ = Brandleistung (W)

F = Faktor =3 (atemwegreizend),

$K_m = 7,6$ reflektierendes Fluchtwegskennzeichen

$S = 35m$ Sichtweite

Nomenklatur zu den Anhängen B und C (Zusammenfassung)

| Symbol | Bedeutung | SI-Einheit |
|-----------------------|--|-------------------|
| A_{Vent} | Fläche der Ventilationsöffnung (z. B. Tür, Fenster) | m ² |
| A_{Wand} | Summe aller Oberflächen eines Raums, abzüglich der Öffnung | m ² |
| A_a | Aerodynamisch wirksame Fläche | m ² |
| A_{geo} | Geometrische Fläche | m ² |
| c_p | spezifische Wärmekapazität (J/(kg*K)) | |
| c_{rauch} | Rauchkonzentration im Volumen | g/m ³ |
| c_v | Durchströmbeiwert $c_v = \frac{A_a}{A_{geo}}$, üblicher Wert $c_v = 0,6$ | - |
| F | Faktor =3 (atemwegreizend), =8 (nicht atemwegreizend) | - |
| g | Erdbeschleunigung | m/s ² |
| h | Höhe der Rauchschiicht | m |
| h_r | Raumhöhe | m |
| h_{Vent} | Höhe einer Ventilationsöffnung | m |
| H_u | unterer Heizwert | J/kg |
| $H_{u,eff}$ | effektiver unterer Heizwert der verbrennenden Masse Werte, siehe z.B. DIN 18230 | J/g |
| $K; K_{zul}$ | Extinktionskoeffizient; maximal zulässiger Extinktionskoeffizient | m-1 |
| K_m | spezifische Extinktionsfläche (z. B. 7,6 m ² /g) $K_m = 7,6$ reflektierendes Fluchtwegskennzeichen $K_m = 2,8$ hinterleuchtetes Fluchtwegskennzeichen | m ² /g |
| LB | Luftbedarf (in kg/kg) | |
| \dot{m} | Durch Verbrennen / Verschwelen in der Zeiteinheit umgesetzte Masse (=Massenstrom) | g/s |
| \dot{m}_{rauch} | Rauchpartikel oder -aerosole - Massenstrom | g/s |
| \dot{m} | Massenstrom | kg/s ³ |
| M | Abbrandmasse innerhalb eines Zeitintervalls (Zersetzte / verschwelte Masse, Massenumsatz) | g |
| M_{rauch} | Masse von innerhalb eines Zeitintervalls freigesetzten Rauchpartikeln | g |
| Δp | Druckdifferenz | Pa |
| RG | Rauch(gas)menge | kg/kg |
| $\dot{Q}, \dot{Q}(t)$ | Brandleistung; momentane Brandleistung zum Zeitpunkt t | W |

| Symbol | Bedeutung | SI-Einheit |
|------------------------------------|---|-------------------|
| S | Sichtweite, Erkennungsweite bei 40 lx Beleuchtungsstärke | m |
| t | Zeit | s |
| T _L | Lufttemperatur | K |
| T _{RG} | Rauchtemperatur | K |
| ΔT | Temperaturdifferenz des Rauch(gas)es | K |
| Y_{rauch} ; y_{rauch} | Rauchausbeute bei Verbrennung / Verschwelung | g/g |
| v | Verdünnungsverhältnis, Verdünnungsgrad | m ³ |
| $v = \sqrt{\frac{\Delta p}{\rho}}$ | $v = \sqrt{\frac{\Delta p}{\rho}}$ Ausströmgeschwindigkeit bei gleich großer Zu- und Ausströmfläche | m/s |
| V_{raum} | Raumvolumen | |
| \dot{V} | Volumenstrom | m ³ /s |
| \dot{V}_{ZL} | Volumenstrom Zuluft | m ³ /s |
| \dot{V}_{BRst} | Volumenstrom Rauch stöchiometrisch | m ³ /s |
| \dot{V}_{LSt} | Volumenstrom Zuluft Verbrennung stöchiometrisch | m ³ /s |
| \dot{V}_{erf} | erforderlicher Verdünnungsvolumenstrom | m ³ /s |
| α | Parameter (Koeffizient der zeitquadratischen Brandausbreitung) | kW/s ² |
| ρ | Dichte | kg/m ³ |
| ρ_L | Luftdichte | kg/m ³ |
| $\Delta \rho$ | Dichtedifferenz = $\rho \cdot \left(1 - \frac{273}{273 + \Delta T}\right)$ | kg/m ³ |
| $\Delta \rho_{ges}$ | gesamte Dichtedifferenz = $\Delta \rho \cdot g \cdot h_r$ | |
| $\Delta \mathcal{G}$ | Temperaturänderung | K |

Quelle: Karlsruher Institut für Technologie

**Anhang D
Hinweise zur Auslegung**

**D.1 Systeme mit Überdruck
im Treppenraum**

Bei diesem System wird eine Druckkaskade erzeugt, bei der der höhere Druck im Treppenraum vorliegt und über Türen/Schleusen/Überströmöffnungen in den Brandbereich abgebaut wird. Die dadurch erzeugte Strömung muss weiter aus dem Brandbereich über Öffnungen unmittelbar oder mittelbar über Schächte ins Freie abfließen. Die hierzu erforderlichen anlagentechnischen Komponenten werden im Folgenden für die verschiedenen Fallunterscheidungen aufgeführt. Eine Rauchschutz-Druckanlage muss auf die folgenden Zustände reagieren können.

- a) Alle Türen des Treppenraumes sind geschlossen. Im Sicherheitstreppenraum wird ein kontrollierter Überdruck aufgebaut, der größer ist als der Brandraumüberdruck an der Türoberkante.

Als Mindestdruckdifferenz, der bei der örtlichen Abnahme nachzuweisen ist, wird eine Druckdifferenz von $\Delta p = 15 \text{ Pa}$ empfohlen.

Diese Druckdifferenz zwischen dem Sicherheitstreppenraum und dem angrenzenden Raum erzeugt bei geschlossenen Türen im Bereich der Spalten um die Tür herum hohe Strömungsgeschwindigkeiten vom Treppenraum in den angrenzenden Raum (Voraussetzung sind ausreichende Abströmmöglichkeiten) und sorgt somit dafür, dass über die Tür-Leckageflächen kein Rauch in den Treppenraum eindringen kann (siehe Bild D.1).

Die Türöffnungskraft (F) darf zu keinem Zeitpunkt mehr als 100 N betragen. Der maximale zulässige Überdruck muss demnach abhängig von Türgrößen und Türschließern begrenzt werden.

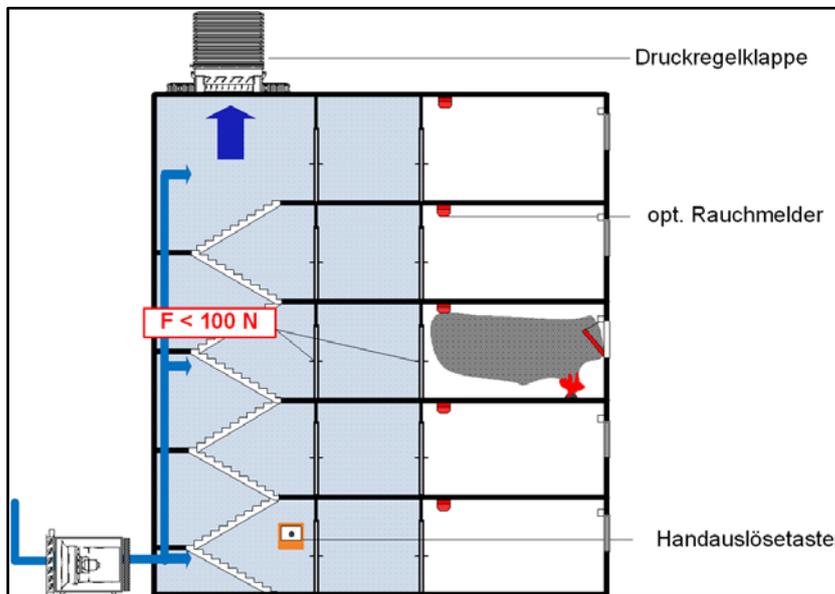


Bild D.1: Anlagenbeispiel für den Fall, dass alle Türen geschlossen sind
Quelle: Alfred Eichelberger GmbH

- b) Die Türen zwischen Sicherheitstreppenraum und Brandbereich sind geöffnet

Besteht aus dem Sicherheitstreppenraum zum Brandbereich eine offene Verbindung durch geöffnete Türen, so müssen diese Öffnungen in Richtung des Brandbereichs durchströmt werden.

Damit diese Durchströmung erfolgen kann, müssen im nachgelagerten Bereich Abströmwege vorhanden und wirksam sein. Bei doppelflügeligen Türen kann vereinfachend für die Berechnung des erforderlichen Volu-

menstromes nur ein Türflügel (der größere) als geöffnet angenommen werden.

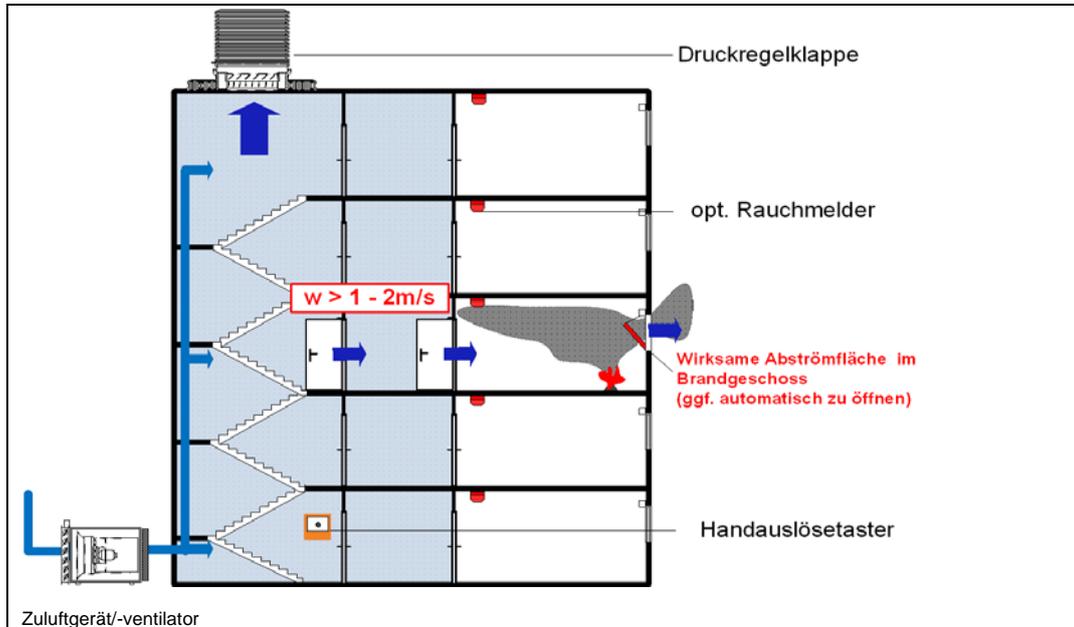


Bild D.2: Anlagenbeispiel für den Fall, dass Türen im Brandbereich geöffnet sind
 Quelle: Alfred Eichelberger GmbH

Sind beide Türen (siehe Bild D.2) im Vorraum geöffnet, sollen die offenen Türen(Querschnitte) mit einer definierten Geschwindigkeit, gemessen in der Vorraumtür zum Flur, durchströmt werden.

Die erforderlichen Durchströmungsgeschwindigkeiten w sind abhängig von der Temperaturdifferenz zwischen der mittleren Temperatur des Brandbereiches und der Treppenraumtemperatur. Je größer die Temperaturdifferenz ist, desto höher muss die Durchströmungsgeschwindigkeit sein, um einen Rauchübertritt zu verhindern.

Damit die geplante Durchströmungsgeschwindigkeit an einer offenen Tür aufrecht erhalten werden kann, ist es erforderlich, Abströmflächen aus dem Brandbereich bereitzustellen.

Hierfür können Fenster in der Fassade mit Antrieben oder Kanäle zur Fassade mit Klappenansteuerung zur Ausführung kom-

men. Ebenso sind feuerwiderstandsfähige Schächte mit geschossweise angeordneten und steuerbaren Entrauchungskappen möglich, gegebenenfalls mit Ventilatorunterstützung. Bei Ventilatorunterstützung der Abströmung ist auf deren schnelle Regelung zu achten, um unzulässige Unterdrücke zu verhindern. An die Regelung der Absauganlage sind die gleichen Anforderungen zu stellen wie an die Regelung des Überdrucksystems im Treppenraum. Als Abluftventilatoren sind Entrauchungsventilatoren nach DIN EN 12101-3 zu verwenden. An die Zuluftventilatoren für Rauchschutz-Druckanlagen werden keine Temperaturanforderungen gestellt

Bei Treppenräumen, die auch für die Brandbekämpfung genutzt werden, ist es nicht unwahrscheinlich, dass die Eingangstür zum Treppenraum durch die Einsatzkräfte aufgeleitet wird. Für dieses Szenario ist ein Geschwindigkeitsaufbau in offenen Geschosstüren nur mit hohem anlagentechnischem

und baulichem Aufwand realisierbar, da hohe Volumenströme und somit auch große Zu- und Abströmöffnungen erforderlich sind. Insofern ist zu empfehlen, dass durch geeignete bauliche Maßnahmen sichergestellt wird, dass die Eingangstür auch in der Phase des Feuerwehreinsatzes überwiegend geschlossen ist.

Folgende Maßnahmen können dazu beitragen, dass die Tür bei einem Einsatz der Feuerwehr geschlossen oder weitgehend verschlossen ist:

- Die Zugangstür vom Freien zum Treppenraum muss selbstschließend sein und von außen im Brandfall ohne Hilfsmittel, wie Schlüssel oder Zugangskontrolle zu öffnen sein.
- Damit die Eingangstür im Brandfall auch während der Brandbekämpfung weitgehend geschlossen bleibt, sind an der Tür gut sichtbare Hinweisschilder anzubringen (siehe Bild D.3).

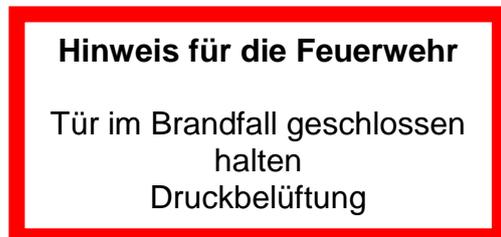


Bild D.3: Hinweisschild für die Feuerwehr
Quelle: Feuerwehr Frankfurt

- Bei Objekten, bei denen das notwendige Löschwasser durch Schläuche der Feuerwehr in den Treppenraum transportiert werden muss, kann durch geeignete bauliche Maßnahmen, wie z. B. „eine kleine Einbringöffnung“ oder Kupplungsanschlüsse im Türbereich, das Geschlossenhalten der Tür bewirkt werden (Abstimmung mit der zuständigen Brandschutzdienststelle erforderlich). Die dabei auftretenden Leckagen können bei der Dimensionierung vernachlässigt werden.

- Die Tür mit den beschriebenen Anforderungen muss Bestandteil der Druckbelüftungsanlage sein und entsprechend gewartet und geprüft werden.

Wenn infolge fehlender baulicher Maßnahmen die Tür ins Freie als geöffnet anzunehmen ist, sind weitere besondere Maßnahmen zu ergreifen, z. B. Anpassung des Volumensstroms, Anzahl und Lage der Einblasstellen usw.

Maximale Türöffnungskraft

Die Türöffnungskraft F_T , gemessen an der Türklinke darf 100 N nicht überschreiten, damit Türen auch von schwächeren Personen offenbar bleiben (siehe Bild D.4). Infolgedessen ist es erforderlich, die maximale Druckdifferenz, die auf der Türfläche eine Kraft F_D erzeugt, zu begrenzen. Abhängig von der Türgröße und den vorhandenen Türschließmomenten lässt sich die maximal zulässige Druckdifferenz mit nachstehender Gleichung berechnen.

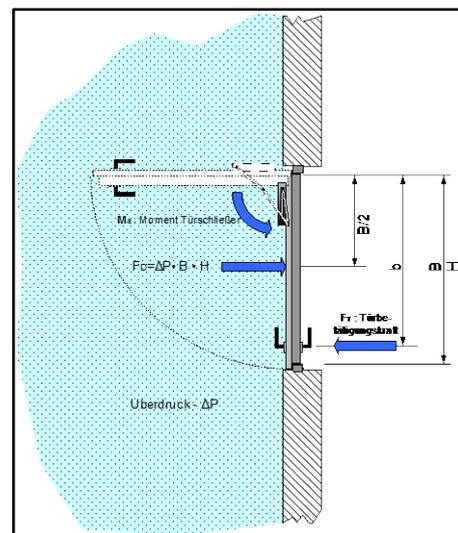


Bild D.4: maximale Türöffnungskraft
Quelle: Alfred Eichelberger GmbH

Der maximal zulässige Überdruck ist abhängig von Türgröße und Türschließer.

$$\Delta p_{\max} = \frac{F_T \cdot b - M_s}{\frac{B}{2} (H \cdot B)}$$

(Gl. D-1)

F_T : zulässige Türbetätigungskraft max. 100 N
 b : Abstand vom Scharnier bis zur Mitte der Türklinke
 H, B : Höhe und Breite der Tür
 M_S : maximales Türmoment

Druck-/Volumenstromregelung

Für den Zustand geöffneter Vorraumtüren im Brandgeschoss muss ein deutlich höherer Volumenstrom im Sicherheitstrepfenraum zur Verfügung stehen, als bei geschlossenen Türen, da zusätzlich zur Leckageluftmenge auch der für den Geschwindigkeitsaufbau benötigte Volumenstrom bereitgestellt werden muss. Diese unterschiedlichen Volumenstrom-Anforderungen sind durch ein geeignetes, ausreichend schnell regelndes System umzusetzen.

Als einfaches zuverlässiges System haben sich hilfskraftlose, selbsttätige Druckregelklappen erwiesen, die im Kopf des Sicherheitstrepfenraumes den überschüssigen Volumenstrom zur Atmosphäre abströmen lassen. Systeme mit Drucksensoren und motorisch betriebene Stellglieder oder eine Drehzahlregelung des Ventilators sind ebenfalls einsetzbar, wenn sie ausreichend schnell und betriebssicher den Druck/Volumenstrom nachregeln können.

Vorräume

Vorräume sind eine bauliche Maßnahme, die einen Eintritt von Rauch in den Sicherheitstrepfenraum behindern soll. Vorräume sind dann wirksam, wenn nur eine der beiden Vorraumtüren gleichzeitig geöffnet ist. Wenn beide Türen gleichzeitig offen stehen, erfolgt die Rauchfreihaltung des Trepfenraumes nur noch durch die von der Rauchschutz-Druckanlage aufgebrauchte Durchströmung der Tür. Der Vorraum selbst muss nicht zwingend rauchfrei gehalten werden. (Ist nur die Tür zwischen Vorraum und Flur geöffnet, kann es trotz Vorhandensein einer RDA zu einem Raucheintritt in den Vorraum kommen.)

Führen aus einem Vorraum mehrere Türen zu Nutzungseinheiten, so sind hinter allen Türen, d.h. in allen Nutzeinheiten, ausreichend großen Abströmflächen erforderlich. Ist die Anlage mit einer Bemessungsgeschwindigkeit von 2 m/s ausgelegt, so ist es entsprechend dem Prinzip nur eines Brandereignisses, ausreichend, den Geschwindigkeitsnachweis mit nur einer durchgängigen offenen Türverbindung Trepfenraum – Vorraum – Nutzungseinheit zu führen (siehe Bild D.5). Sind zur gleichen Nutzeinheit weitere Türen vorhanden, sind diese alle als geöffnet anzunehmen, die Durchströmungsgeschwindigkeit sollte dann mindestens 1 m/s je Tür betragen.¹

¹ gemäß DIN EN 12101-6 müssen 90 % der volumetrischen Anforderungen innerhalb 3 Sekunden nach Öffnen oder Schließen einer Tür erzielt sein.

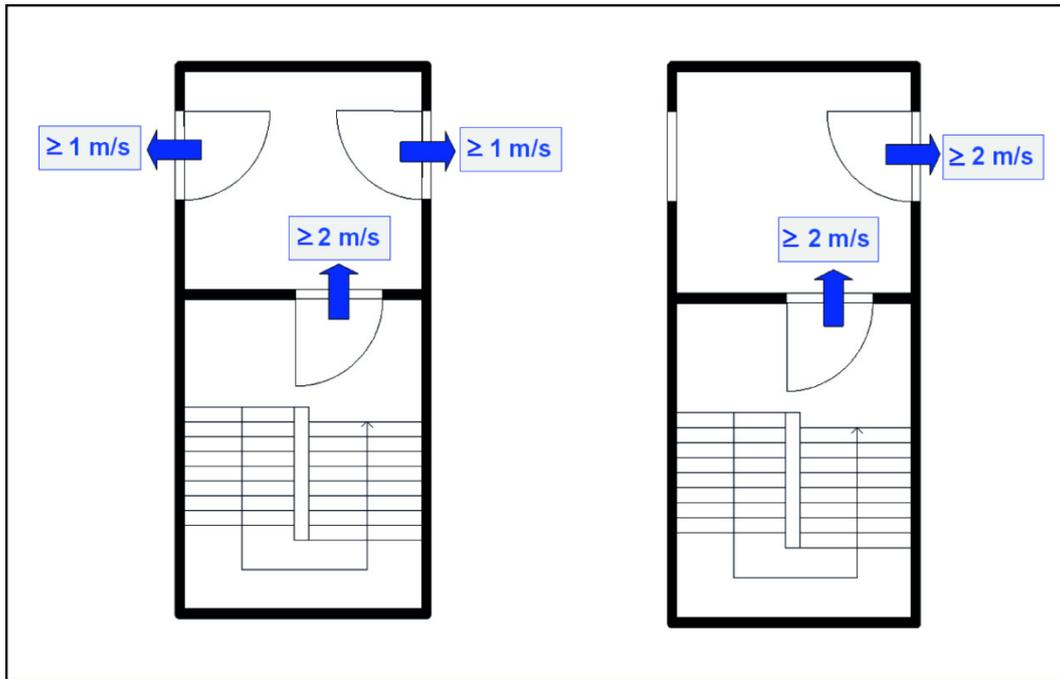


Bild D.5: Vorräume
Quelle: Alfred Eichelberger GmbH

Ob ein Vorraum vorzusehen ist, regelt das Baurecht (MHochHRL). Für die Funktion der Rauchschutz-Druckanlage ist ein Vorraum nicht erforderlich.

Impressum

VDMA

Allgemeine Lufttechnik

Lyoner Str. 18

60528 Frankfurt am Main

E-Mail alt@vdma.org

Internet luftreinhaltung.vdma.org

Kontakt

Christine Montigny (M.Sc.), VDMA Luftreinhaltung

Telefon 0 69 66 03 18 60

E-Mail christine.montigny@vdma.org

Titelbild

TROX TLT GmbH

Für Inhalt und Form zeichnen die Autoren verantwortlich.

© 2012 by VDMA Allgemeine Lufttechnik, Frankfurt

VDMA

Allgemeine Lufttechnik

Lyoner Straße 18

60528 Frankfurt am Main

Telefon +49 69 6603-1860

Fax +49 69 6603-2860

E-Mail alt@vdma.org

Internet luftreinhaltung.vdma.org