

CFD-Brandsimulationen im Hochbau

Aktuelle Auslegeordnung,
Simulationsgrundlagen, Best Practice

Inhaltsverzeichnis

1	Vorwort	3
2	Einleitung	4
3	Gesetzlicher Hintergrund	5
4	Anwendungsgebiete	5
5	Brandsimulationsprogramme	6
6	Anwendungsbedingungen/ -grenzen CFD	7
7	Prozesskette und Qualitätssicherung im Rahmen eines Entrauchungsnachweises	9
8	Schutzziele	10
9	Wichtige Einflussgrößen und Eingabeparameter	12
10	Vorschlag zur Dokumentation (best practice)	15
11	Ausblick/ Hinweis	16
12	Glossar	16
13	Literaturverzeichnis	18
14	Impressum	19

Gefahren hat es immer gegeben – Lösungen auch!

In der SSI sind die kompetenten Problemlöser vereinigt



UNABHÄNGIG

Der SSI gehören ausschliesslich namhafte grössere Unternehmen an, welche fachlich hochstehende, herstellerunabhängige Beratungen in den Bereichen Sicherheit und Risiko-Management anbieten.

WEGWEISEND

Die SSI nimmt mit Hilfe der Kenntnisse der Risikospezialisten der ihr angeschlossenen Firmen Einfluss auf die Regelung sicherheitsrelevanter Fragen in der Rechtsetzung und Normung. Sie pflegt den Dialog mit öffentlichen und privaten Organisationen sowie der breiteren Öffentlichkeit zu Fragen der Sicherheit und des Risiko-Managements. Dabei arbeitet sie mit anderen Berufsgruppen und Beratervereinigungen zusammen. Ziel der Einflussnahme ist die Sicherstellung eines angemessenen Sicherheitsniveaus unter Berücksichtigung der betrieblichen und wirtschaftlichen Aspekte.

WIRTSCHAFTLICH

Die strengen Anforderungen, die die SSI an ihre Mitgliedsfirmen stellt, garantieren einen hohen Leistungsstandard. Sie stellen sicher, dass der Begriff «Mitgliedfirma der SSI» dafür bürgt, dass aus einer umfassenden ganzheitlichen Beratung Lösungen von Sicherheitsproblemen resultieren, welche ein optimales Kosten-Wirksamkeits-Verhältnis aufweisen.

Liebe Leserin, lieber Leser

Das vorliegende SSI-Spezial behandelt das Thema «CFD-Brandsimulationen im Hochbau», das in Fachkreisen in den letzten Jahren und auch heute noch intensiv und auf sehr hohem Niveau diskutiert wird. Das Paper richtet sich damit primär an das entsprechende Fachpublikum: Brandschutzingenieure, Behördenmitglieder, aber auch Lüftungsplaner und Errichter von Entrauchungsanlagen.

Die Autoren wollen mit dem vorliegenden Dokument die Vergleichbarkeit von Entrauchungssimulationen und damit auch die Planungssicherheit der entsprechenden Entrauchungsanlagen erhöhen. Wesentliche Voraussetzung für beide Ziele ist das Verwenden der gleichen Grundlagen durch alle Brandschutzingenieure und Behörden. Weiter soll aufgezeigt werden, auf welche Punkte bei Brandsimulationen zu achten ist, um am Schluss ein aussagekräftiges und verlässliches Resultat in den Händen zu halten. In diesem Sinne soll das Paper einen Beitrag zur Verbesserung der Qualität und Aussagekraft von Brandsimulationen und damit einen Beitrag zur Erhöhung der Sicherheit leisten.

Der SSI-Vorstand

Mit zunehmend innovativen und gewagten Architekturen sowie den u.a. von Nutzern immer mehr erwarteten komplexen und flexiblen Gebäudevolumen steigt bei gleichzeitig zunehmendem Sicherheitsbewusstsein und -verlangen und damit wachsendem Anspruch an die Brandsicherheit der Bedarf an innovativen Brandschutzkonzepten. In der Folge wird immer häufiger der Ruf nach Fire- und Smoke-Engineering laut, das aber auch entsprechende Fachleute mit dem dazugehörigen, hoch spezialisierten Wissen benötigt. Das vorliegende Paper will einen wesentlichen Beitrag bzgl. Wissen leisten, indem es die in der heutigen Literatur aktuellen Aussagen übersichtlich zusammenträgt und damit eine gemeinsame Grundlage für die sich mit dem Thema auseinandersetzen Ingenieure schafft.

Die Autoren starten mit dem rechtlichen Hintergrund in der Schweiz und zeigen damit auf, wann Brandsimulationen notwendig sind: Sei es auf freiwilliger (Optimierung) und zwingender Basis (normativ gefordert). Weiter werden im entsprechenden Kapitel die wesentlichsten gesetzlichen Randbedingungen wie Fluchtwege, etc. genannt.

Im folgenden Kapitel wird zusammengetragen, bei welchen Fragestellungen Brandsimulationen sinnvollerweise eingesetzt werden: Für den eigentlichen Entrauchungsnachweis, zum Aufzeigen einer konzeptionell angedachten Gleichwertigkeit im Sinne von Alternativlösungen oder Optimierungen sowie zum Erarbeiten der für eine heisse Bemessung notwendigen Grundlagen.

Im Kapitel zu den Simulationsprogrammen wird ein Überblick der heute gängigsten Software für Brandsimulationen inkl. Grobbeschreibung und Bezugsmöglichkeiten gegeben. Diese Liste hat keinen Anspruch auf Vollständigkeit, ermöglicht es aber mit der Angabe von Freeware jedem potentiellen Anwender in dieses Gebiet einzusteigen.

Kapitel 6 geht auf die diversen Anwendungsgrenzen und die für eine seriöse Simulation notwendigen Annahmen im Sinne der Modellierung ein und macht auch Aussagen zu den Fähigkeiten des Nutzers, die aus Sicht der Autoren für gute Simulationen notwendig sind. Viele «schlechte» Simulationen weisen Mängel bzgl. der in diesem Kapitel beschriebenen Themen auf.

Eine gute Simulation folgt auch einem gewissen Prozessschema, wie es im nachfolgenden Kapitel beschrieben ist. Je nach Umfang und Komplexität sind nicht zwingend alle Schritte notwendig. In diesem Sinne soll die in Kapitel 7 beschriebene Prozesskette als Beispiel dienen. Sofern mittels anderen Abläufen die gleichen Ziele in der gleichen Qualität erreicht werden, ist dies natürlich ebenso «richtig».

Die beiden nachfolgenden Kapitel zu den Schutzziele sowie den wichtigsten Einflussgrößen und Eingabeparametern stellen schliesslich das Herzstück dieses SSI-Spezials dar. In ihnen werden die aus Sicht der Autoren ganz zentralen Parameter beschrieben und soweit projekunabhängig sinnvoll auch quantifiziert.

Das Paper schliesst mit einem Vorschlag zu Umfang und Struktur der zu jeder Simulation gehörenden Dokumentation. Ebenso werden die verwendeten Literaturquellen genannt und gewisse Ausdrücke näher beschrieben.

Sowohl bestehende als auch neu geplante Gebäude unterliegen in der Schweiz den Brandschutzvorschriften des VKF [17]. Hierin ist je nach Gebäudeart und Nutzung geregelt, welche vorbeugenden baulichen, anlagentechnischen, organisatorischen und abwehrenden Brandschutzmassnahmen notwendig sind, damit das Schutzziel gemäss Artikel 9 der Brandschutznorm erfüllt wird. Vorgeschrieben ist der Schutz von Personen und Tieren sowie des Gebäudes im Brandfall.

Die VKF-Vorschriften sind analog zu anderen Vorschriften als konservativ zu bewerten. Dies ist auch notwendig, um möglichst viele Fälle ausreichend sicher abdecken zu können. Jeden denkbaren Fall zu regeln ist und kann nicht die Aufgabe von Vorschriften, Richtlinien oder sonstigen technischen Regelwerken sein. Jedoch besteht häufig ein gewisser Ermessensspielraum, der es erlaubt, besondere Gebäudearten und Nutzungen individuell zu bewerten. So bietet z.B. Artikel 11 Absatz 2 der Brandschutznorm folgende Option an:

«Anstelle vorgeschriebener Brandschutzmassnahmen können alternativ andere Brandschutzmassnahmen als Einzel- oder Konzeptlösung treten, soweit für das Einzelobjekt das Schutzziel gleichwertig erreicht wird. Über die Gleichwertigkeit entscheidet die Brandschutzbehörde.»

Sofern die Fluchtwege im Einklang mit den VKF-Vorschriften stehen, können mit Artikel 13 der Brandschutznorm zur Beurteilung von Brandgefahr, Brandrisiko und Brandsicherheit das Verfahren der Brandrisikobewertung oder andere VKF-anerkannte Berechnungsmethoden beigezogen werden – so z.B. auch Brandsimulationen im Bereich des Rauchmanagements.

Überall dort, wo vorbeugende Brand- und Rauchschutzmassnahmen vorgeschrieben sind, wird die Möglichkeit geboten, die Gleichwertigkeit von alternativen Massnahmen mittels Brandsimulationen aufzuzeigen.

So sind z.B. gemäss Abschnitt 4.2.2 Absatz 2 resp. 4.2.4 Absatz 1 der Brandschutzrichtlinie «Rauch- und Wärmeabzugsanla-

gen (RWA)» bei Brandabschnittsflächen bis 2400 m² (mit Sprinkleranlage 4800 m²) und für Räume mit einer Personenbelegung von 100 bis 1000 Personen Entrauchungsöffnungen vorzusehen. Die freie geometrische Fläche muss mindestens 1 % der Grundfläche betragen (je für Zuluft und Abzug).

Gemäss Abschnitt 4.2.2 Absatz 2 resp. 4.2.4 Absatz 1 der Brandschutzrichtlinie «Rauch- und Wärmeabzugsanlagen» sind bei Brandabschnittsflächen von mehr als 2400 m² (mit Sprinkleranlage 4800 m²) und für Räume mit einer Personenbelegung von mehr als 1000 Personen zwingend spezielle Rauch- Wärmeabzugskonzepte zu erstellen.

Somit werden Brandsimulationen, deren Einsatz im Rahmen von speziellen Rauch-/ Wärmeabzugskonzepten in der Regel notwendig ist, indirekt vorgeschrieben.

4 ANWENDUNGSGEBIETE

Vor obigem gesetzlichen Hintergrund eröffnet sich ein weites Anwendungsgebiet für Brandsimulationen im Hochbau¹⁾.

Die nachfolgend aufgeführten Anwendungsgebiete repräsentieren die heute gängige Praxis. Weitere Anwendungsgebiete ergeben sich aus den unterschiedlichsten Aufgabenstellungen und Bedürfnissen. Es ist daher zu empfehlen bei speziellen Fragestellungen, die in unmittelbarem Zusammenhang mit dem Ereignis Brand stehen, einen Brandschutzexperten mit einschlägigen Erfahrungen im Bereich Brandsimulationen beratend hinzuzuziehen.

Nachweis der Gleichwertigkeit

In vielen Fällen sind keine natürlichen Entrauchungsöffnungen realisierbar, sodass die Entrauchung mittels einer maschinellen Rauch- und Wärmeabzugsanlage erfolgen muss. Der Nachweis der Wirksamkeit, resp. Gleichwertigkeit im Sinne von Artikel 11 Absatz 2 wird in der Regel mit Hilfe von Brandsimulationen erbracht.

Hinweis:

Seitens der Verfasser erscheint es nicht verhältnismässig und auch nicht zweckmässig im Rahmen des Gleichwertigkeitsnachweises verschärfte Schutzzielanforderungen und somit

höhere Anforderungen an die Leistungsfähigkeit der Entrauchungsanlage zu stellen. Vielmehr wird empfohlen im Falle einer maschinellen Entrauchung anstelle der 1% Zuluft und 1% Abluft pauschal einen 6- bis 10-fachen Luftwechsel anzuwenden (praxisbewährte Lösung) oder ggf. eine weitere Differenzierung wie folgt vorzunehmen:

- ▶ Zwischen 100 und X Personen genügen manuell öffnbare Wand und oder Deckenöffnungen mit einem geometrischen Öffnungsmass von 1% der Grundfläche.
- ▶ Zwischen X und 1000 Personen sind Nachström- und RWA-Öffnungen mit einer Grösse von jeweils 1% der Grundfläche vorzusehen oder ein 10-facher Luftwechsel. Die Entrauchungseinrichtungen müssen im Brandfall automatisch aktiviert werden.

Entrauchungsnachweise

Es gibt viele Beispiele im Hochbau, in denen Brandsimulationen zum Nachweis einer ausreichenden Entrauchung zur Anwendung gelangen: Verkaufsgeschäfte, Malls, Atrien, Kinos, Veranstaltungsräume, Museen, Lagerhallen, Maschinenhallen, Stadien, etc.

In der modellierten Geometrie wird die Rauchgasausbreitung der zuvor festgelegten

Brandszenarien (siehe Kapitel 9) simuliert. In Abhängigkeit der objekt- und nutzungsspezifischen Randbedingungen können so die Entrauchungsmassnahmen dimensioniert werden. Analog zu anderen ingenieurmässigen Nachweisen stellen hierbei die den Begriff «raucharm» beschreibenden Grenzwerte (siehe Kapitel 8) in Verbindung mit den zeitlichen Vorgaben, die Bemessungsgrundlage dar.

Temperaturrentwicklung und -beanspruchung

Neben der Rauchgasausbreitung kann auch der zeitliche Verlauf der Temperaturentwicklung bereichsweise und lokal (nur mit CFD) simuliert werden. Auch die Erwärmung von Oberflächen und der Wärmedurchgang durch Bauteile kann unter Berücksichtigung der thermischen Materialeigenschaften simuliert werden.

So ist es möglich mittels Brandsimulationen zu untersuchen, ob es zu vertreten ist, die vorgeschriebene Feuerwiderstandsdauer von Bauteilen zu reduzieren (Grundlage für heisse Bemessung).

¹⁾ Nebst dem klassischen Hochbau zählen im Rahmen dieses Papers auch Bahnhöfe, U-Bahn-Stationen, Passagierschiffe, etc. zu den betrachteten Räumen.

5 BRANDSIMULATIONSPROGRAMME

Brandsimulationen können mit Zonen- oder CFD-Programmen durchgeführt werden. Der Begriff «Computational Fluid Dynamics» oder abgekürzt CFD steht für Berechnungen von Strömungsphänomenen von Gasen und Flüssigkeiten. Die Methodik CFD wird in vielen Gebieten eingesetzt z.B. in der Aerodynamik im Flugzeugbau, in der Fluidodynamik im Schiffsbau, bei der Ausbreitung von Schadstoffen der Untersuchung von Explosionenwirkungen und vielen anderen Gebieten, aber auch im Bereich der Brand- und Rauchsimulationen. Hierzu wird ein beliebig geformter Raum in kleine Zellen unterteilt, auch Kontrollvolumen genannt. Es lassen sich damit beliebige Geometrien abbilden. In jeder dieser Zellen werden die fundamentalen Erhaltung- und Zustandsgleichungen in Funktion der Zeit gelöst. Damit können die Strömungsverhältnisse sowie der Stofftransport im Detail verfolgt werden: Temperaturen, Geschwindigkeiten, Drücke und Konzentrationen von Verbrennungsprodukten. Natürlich hängt die Aussagekraft einer detaillier-

ten Studie von der Genauigkeit der Eingabeparameter ab (siehe hierzu auch Kapitel 6). Auch strömungstechnische Phänomene wie z.B. Balcony Spill, Back-Layering und Stack-Effect können abgebildet werden. Rechenzeiten von mehreren Tagen bis hin zu Wochen sind dabei nicht ungewöhnlich.

im unteren Teil je eine Zone. In Abhängigkeit des Modells kommen noch weitere Zonen für Umfassungsbauerteile, Plume und Ceiling-Jet etc. hinzu. Brandbedingte Phänomene, die in den CFD-Programmen durch die fundamentalen Gleichungen beschrieben werden können, müssen in den Zonenmodellen durch empirisch hergeleitete Ansätze vereinfacht werden. Die Anwendung sollte daher auf Gebäude mit einfachen Geometrien und Verhältnissen bei denen eine eindeutige Rauchschichtbildung zu erwarten ist, beschränkt werden. Komplexe Strömungsverhältnisse wie sie z.B. bei Atrien mit Galerien, Korridoren, Tunnel und z.T. auch bei grossflächigen Räumen zu erwarten sind, lassen sich mit Zonenmodellen nicht seriös simulieren.

Dennoch werden Zonenmodelle verbreitet eingesetzt, da sie einfach zu handhaben sind, die Modelle rasch erstellt und die Rechenzeiten kurz sind. Im Rahmen der o.g. Einschränkungen können schnell verschiedenste Situationen durchgerechnet und ein Gefühl dafür entwickelt werden, welchen Einfluss die verschiedenen

die Anwendungsbedingungen und -grenzen von CFD-Programmen eingegangen.

Es sind verschiedene Zonen- und CFD-Programme kommerziell und kostenlos erhältlich. Wichtig ist, dass die Verwendbarkeit durch entsprechende Referenzen belegt ist. Neben dem reinen Anwender-Handbuch muss der mathematische und physikalische Hintergrund einschliesslich möglicher Anwendungsgrenzen (siehe Kapitel 6) dokumentiert sein.

In diesem Sinne umfasst die nachfolgende Aufstellung ohne Anspruch auf Vollständigkeit, eine Auflistung gebräuchlicher Brandsimulationsprogramme:

CFD-Programme

- ▶ CCM+ von CD-adapco (<http://www.cd-adapco.com>)
- ▶ Fluent von Ansys (<http://www.fluent.com/software/index.htm>)
- ▶ CFX von Ansys (<http://www.ansys.com/products/cfx.asp>)

Eigenschaft	Zonenmodell	CFD-Modell
Geometrieerfassung	angenähert	angenähert bis exakt
Lüftungserfassung	angenähert	angenähert bis exakt
Wärmefreisetzung	angenähert	angenähert
Modellaufwand	gering	hoch
Aussagen	global, bzw. Mittelwerte	lokal
Validierung	aufwändig	aufwändig
Rechenaufwand	gering bis mittel	hoch
Abbildbare Geometrien	v.a. orthogonale einfache Geometrien	je nach Programm orthogonale bis beliebige Geometrien

Tabelle 1: Grundsätzliche Eigenschaften von CFD- und Zonenmodellen gemäss [1] mit Ergänzung.

ten Studie von der Genauigkeit der Eingabeparameter ab (siehe hierzu auch Kapitel 6). Auch strömungstechnische Phänomene wie z.B. Balcony Spill, Back-Layering und Stack-Effect können abgebildet werden. Rechenzeiten von mehreren Tagen bis hin zu Wochen sind dabei nicht ungewöhnlich.

In Zonenmodellen wird ein Raum in Zonen aufgeteilt. Z.B. bilden die Rauchschicht im oberen Teil des Raumes und die raucharmer Schicht

Parameter auf das Ergebnis haben.

Zonen- und CFD-Programme schliessen sich nicht aus und können sich unter Umständen sinnvoll ergänzen. Dank immer schnellerer Rechenalgorithmen und der Möglichkeit des Parallelrechnens wird die Anwendung von CFD-Programmen jedoch immer attraktiver und entwickelt sich mehr und mehr zum Stand der Simulationstechnik im Hochbau. Aus diesem Grund wird in dem folgenden Kapiteln näher auf

- ▶ FDS von Nist (<http://www.fire.nist.gov/fds/>) → kostenlos
- ▶ Kobra 3D von I.S.T. Integrierte Sicherheitstechnik GmbH (<http://www.ist-net.de>)

Programme mit Zonenmodellen

- ▶ MRFC (<http://www.vib-mrfc.de>)
- ▶ CFAST (<http://fast.nist.gov>) → kostenlos

Submodelle

Die für Brandschutzzwecke wesentlichen relevanten Submodelle sind Turbulenz, Auftrieb, Verbrennungsprozess sowie Wärmeübergang an den Wänden und Wärmestrahlung. Darüber hinaus existieren Berechnungscodes, die den Einfluss von Sprinkleranlagen berücksichtigen. Die Aussagekraft derartiger Sprinklermodelle ist nach Meinung der Autoren aber eingeschränkt, weshalb von deren Anwendung zumindest beim Entrauchungsnachweis abgeraten wird.

Netzgenerierung

Zur Erstellung eines CFD-Modells wird zunächst die dreidimensionale Geometrie mit Hilfe eines CAD-Programms oder eines geeigneten sog. Preprocessors aufgebaut. Bei der Netzgenerierung erfolgt die Aufteilung der erstellten Geometrie in kleine Kontrollvolumina, den so genannten finiten Volumina. Die am häufigsten verwendeten Volumentypen sind Hexaeder, Tetraeder, Prismen und Polyeder. Einige CFD-Codes (FDS, Kobra 3D) verfügen über so genannte hexaedrische strukturierte Gitter. Diese sind nur für Strömungsvolumina ohne gekrümmte Flächen anwendbar, da bei diesem Gittertyp schräge oder gekrümmte Flächen durch ein treppenförmiges Gitter abgebildet werden. Dies führt im Vergleich zur Realität zu einer Oberflächenvergrößerung, die zwei sich addierende Effekte nach sich zieht: Zum einen wird die Strömung durch eine grössere Wandreibung stärker abgebremst, zum anderen gibt die Strömung aufgrund der erhöhten Oberfläche mehr Wärme an die umgebende Wand ab, was einen verringerten Auftriebseffekt im warmen Rauch nach sich zieht. Prinzipiell kann man das Netz durch eine starke Verfeinerung an die gekrümmte Fläche anpassen, dies führt allerdings zu erheblich grösseren Rechenzeiten. Bei gekrümmten Flächen ist ein unstrukturiertes Netz, das sich an die Flächen anpasst (CCM+, CFX, Fluent) zu bevorzugen.

Bezüglich der Netzqualität sind einige Kriterien einzuhalten: So sollte das Grössenverhältnis zweier benachbarter Zellen nicht grösser als 1.5 sein, in Bereichen mit starken Änderungen der Strömungsgrössen muss das Rechengitter verfeinert sein (z.B. Im Auftriebsstrahl oberhalb des Brandorts) oder das Längen zu Seitenverhältnis sollte aus Konvergenzgründen in einem Bereich < 1.5 liegen. Bei Programmen mit automatischen Vernetzern (CCM+, CFX, Fluent) werden diese Kriterien bei der Netzgenerierung berücksichtigt. Bei Programmen mit strukturierten Netzen (siehe oben) ist das Netz vor Beginn der Simulationen im Bezug auf die genannten Kriterien zu überprüfen und gegebenenfalls anzupassen.

Ein wesentlicher Punkt bei allen CFD-Anwendungen ist die Anzahl der Zellen im Strömungsvolumen. Es gilt, dass die Ergebnisse umso genauer werden, je grösser die Anzahl der Zellen (und damit das Gitternetz feiner) ist. Eine grössere Anzahl an Zellen bedingt jedoch längere Rechenzeiten, so dass ein Kompromiss zwischen der gewünschten Genauigkeit und einem vertretbarem Rechenaufwand gefunden werden muss.

Bei der Verteilung der Zellen im Strömungsraum sind folgende Kriterien zu beachten [8]:

- ▶ Strömungsrelevante Geometrien sind mit mindestens fünf Gitterpunkten pro Kantenlänge abzubilden.
- ▶ Öffnungen und Durchlässe sind mit mindestens fünf Gitterpunkten auf der kurzen Achse abzubilden.
- ▶ Im Bereich der Konvektionsströmung oberhalb der Brandquelle ist eine Kantenlänge von 0.15 m nicht zu überschreiten.

Generell sollte das generierte Netz vor der Simulation überprüft werden. Moderne CFD-Codes (CCM+, CFX, Fluent) besitzen hierzu wertvolle Analysewerkzeuge, die auch eine nachträgliche Anpassung «schlechter» Zellen ermöglichen.

Simulationsdauer und Berechnungsschritte

Die Simulationsdauer sollte anhand der festgelegten Schutzziele vorgegeben werden (zur speziellen Problematik bei Sprinklereinsatz, siehe unter «Sprinkler»). Generell sollte der Zeitschritt so klein gewählt werden, dass die auftretenden physikalischen Effekte genügend genau aufgelöst werden können. Bei kleineren Zellen müssen demnach auch kleinere Zeitschritte angesetzt werden. Für die Anfangsphase des Brandes liegen die typischen Zeitschritte bei 0.5 s – 1.0 s. Im weiteren Verlauf der Berechnung kann der Zeitschritt sukzessive erhöht werden. Bei der Verwendung bestimmter Turbulenzmodelle (LES, siehe unter «Turbulenzmodelle») sind kleinere Zeitschritte anzusetzen.

Diskretisierung

Nach der Generierung des Netzes müssen die angewandten Modellgleichungen (Erhaltungsgleichungen, Strahlung, Wärmeübergang) diskretisiert werden. Mathematisch werden so aus Differentialgleichungen algebraische Gleichungen. Hierbei treten grundsätzlich Diskretisierungs- oder Abbruchfehler auf. Bei den gängigen CFD-Programmen kann die Ordnung des Abbruchfehlers gewählt werden. Bessere Ergebnisse werden hierbei durch Diskretisierungsverfahren mit Abbruchfehler zweiter oder höherer

Ordnung erlangt [8]. Diskretisierungsverfahren mit Abbruchfehler erster Ordnung sind in Ausnahmefällen (keine Konvergenz) zu verwenden. In diesem Fall ist eine gründliche Fehlerabschätzung notwendig.

Turbulenzmodelle

Eine genaue Beschreibung der verfügbaren Turbulenzmodelle würde den Rahmen dieses Beitrags sprengen. Es sollen daher an dieser Stelle lediglich die Anwendungsbedingungen und -grenzen einzelner gängiger Turbulenzmodelle beschrieben werden. Im Idealfall werden alle turbulenten Bewegungen direkt durch die Lösung der Navier-Stokes-Gleichungen ohne Annahme eines zusätzlichen Modells aufgelöst. Da die Grösse der auftretenden Wirbel mehrere Grössenordnungen überdeckt und bei diesem so genannten DNS-Ansatz (engl. Direct Numerical Simulation) auch kleinste Wirbel betrachtet werden, ist eine sehr feine Einteilung der finiten Volumina vonnöten (mehr 1000 Gitterpunkt/cm [8]). Da dieses Vorgehen eine sehr grosse Zahl an Zellen im betrachteten Simulationsraum bedingt, was zu immensen Rechenzeiten führt, ist die Anwendung dieses Ansatzes für industrielle Zwecke unpraktikabel. In einem zweiten Ansatz werden alle bis auf die kleinsten Wirbel über die direkte Lösung der Navier-Stokes-Gleichungen aufgelöst. Die kleinsten Wirbel werden über Turbulenzmodelle (i.d.R. Ein Gleichungsmodelle) modelliert. Bei dieser, sogenannten Large Eddy Simulation (LES) werden weniger feine finite Volumina benötigt als bei der DNS. Allerdings muss das Gitternetz feiner gewählt werden als beim dritten gängigen Ansatz der Turbulenzmodellierung, der Reynolds-gemittelten Navier-Stokes Modelle (RANS). Bei diesen Modellen (z.B. Standard $k-\epsilon$ -Modell, RNG-Modell, $k-\omega$ -Modell) wird die Navier-Stokes Gleichung zeitgemittelt. Die so erhaltenen Gleichungen haben nicht zum Ziel die turbulente Bewegung aufzulösen, sie liefern allerdings die zeitlich gemittelten charakteristischen Grössen der Strömung. Da hier das Gitter nur fein genug sein muss, um die zeitgemittelten Eigenschaften der Strömung korrekt abzubilden, ist diese Methode weniger zeitaufwändig als die beiden zuvor genannten und wird daher bei Brandsimulationen häufig angewandt [8].

Brandquelle

Die Modellierung der Brandquelle im Rahmen einer CFD-Simulation kann durch verschiedene nachfolgend aufgeführte Ansätze durchgeführt werden [1]:

- ▶ Volumetrische Modelle
- ▶ Flächenförmige Modelle
- ▶ Detaillierte Verbrennungsmodelle

Bei volumetrischen und flächenförmigen Modellen wird die beim Brand freigesetzte Wärme in Form einer zeitabhängigen Wärmebildungsrate innerhalb des Volumens bzw. über die Fläche modelliert. Flächenförmige Modelle finden Anwendung, falls der Brandherd eine ebene Ausdehnung aufweist (Poolbrand, Flüssigkeitsbrände). Im volumetrischen Modell ist zu berücksichtigen, dass das Freisetzungsvolumen demjenigen des darzustellenden Brandes entspricht (z.B. Regal, Mülleimer usw.). Eine allfällige Ausbreitung des Brandes sollte mittels einer Brandausbreitungsgeschwindigkeit berücksichtigt werden. Hierbei ändert sich das Brandvolumen während der Simulation. Quellterme für die Wärmefreisetzung können z.B. dem vfdB-Leitfadens [1] oder der VDI 6019 Blatt 1 [9] entnommen werden.

Ein detailliertes Verbrennungsmodell kann die Wärmeverteilung in der Flammenregion und den Einfluss lokaler Strömungsfelder prinzipiell vorhersagen. Problematisch erweist sich allerdings hierbei, dass die genaue Zusammensetzung des brennenden Guts selten genau bekannt ist und dass bestimmte Parameter (Reaktionskinetik, Temperaturabhängigkeiten von Reaktionsgeschwindigkeiten) noch nicht hinreichend bekannt sind.

Die Rauchproduktion hängt vom jeweiligen Brandgut, dessen physikalischem Zustand und den Ventilationsbedingungen ab. Ein gängiger Ansatz ist hierbei die Verknüpfung des Rauchausbeutefaktors mit der Wärmefreisetzungsrate. Die Abbrandrate des Brandguts (Feststoff) kann aus dem Quotienten aus Wärmefreisetzung und Verbrennungswärme errechnet werden. Die Rauchproduktionsrate ergibt sich dann aus der Abbrandrate und der Rauchausbeute, die für typische brennbare Substanzen tabelliert sind. Auf ähnliche Weise kann die Produktionsrate für toxische Gase (CO, NO_x, HCN) ermittelt werden.

Strahlung

Bei der Anwendung einer Volumenquelle besteht der einfachste Ansatz der Berücksichtigung der Wärmestrahlung darin, dass ein Prozentsatz (meist 20–30%) von der gesamten Wärmeleistung abgezogen wird und so lediglich der konvektive Anteil der Wärmeleistung berücksichtigt wird. Der Wärmeübergang aufgrund der Wärmestrahlung aus der Flammenregion sowie die Gasstrahlung (Verbrennungsprodukte) werden hierbei vernachlässigt. Mit modernen CFD-Programmen ist eine Berücksichtigung dieser Effekte prinzipiell möglich. Hierzu sind die Emissions- und Absorptionskoeffizienten der beteiligten Oberflächen- und Rauchgaskomponenten zu spezifizieren, wobei für Rauchgase der mittlere Wert von 0.6 als

Emissionskoeffizient angesetzt werden kann. Die Berücksichtigung dieser Strahlungsmodelle bedingt allerdings auch die Modellierung der Flamme, als abstrahlende Einheit. Hierbei kommen verschiedene Flammenmodelle (Zylinder- oder Kegelförmige Flamme) zum Einsatz. Die Anwendung dieser Modelle auf das betrachtete Szenario ist vor der Simulation zu plausibilisieren. Die explizite Berücksichtigung von Strahlungsmodellen erhöht den Rechenaufwand und stellt aufgrund der hohen Nichtlinearität (T^4 -Abhängigkeit im Stefan-Boltzmann-Gesetz) erhöhte Anforderungen an den Gleichungslöser des verwendeten CFD-Codes. Eine genauere Überprüfung der Einhaltung der Konvergenzkriterien ist deshalb um so mehr erforderlich.

Auftriebsmodell

Eine manchmal als Fehlerquelle auftretende Annahme bezüglich des Auftriebs, ist die sog. Boussinesq-Approximation, bei der die Dichte in den meisten Termen der Impulsgleichungen konstant bleibt und nur im Gravitationsterm linear von der Temperatur abhängt [8]. Der rechen-technische Vorteil dieser Annahme liegt in den geringeren Anforderungen an den zur Simulation im Programm verwendeten Gleichungslöser, führt aber insbesondere bei Brandsimulationen zu falschen Ergebnissen, da diese Approximation nur bei geringen Temperaturdifferenzen im Strömungsgebiet anzuwenden ist. Eine bessere Alternative ist die Verwendung des idealen Gasgesetzes [8].

Sprinkler

Die Modelle beruhen auf empirischen Gleichungen im Bezug auf die Tropfenbildung und Verdampfung und gelten nur unter bestimmten (nicht zu verallgemeinernden) Bedingungen. Aufgrund dieser Unzulänglichkeiten wird zur Abbildung von Sprinklereinflüssen für die Dimensionierung oft der Ansatz gewählt, die freigesetzte Wärmeleistung nach Ansprechen mindestens eines Sprinklers konstant bis zum Ende der Simulationszeit zu behalten. Dies ist sicher konservativ und im Bezug auf Bauteiltemperaturen während des Brandes ein vernünftiger Ansatz. Für den Entrauchungsnachweis ist dieser Ansatz jedoch nicht geeignet, da die Ausbreitung des Wasserdampf-Rauchgasgemischs im Brandraum nicht aussagekräftig berechnet werden kann. D.h., die im Rahmen des Entrauchungsnachweises relevanten Schutzziele (Kapitel 8) können nur bis zum Auslösen des Sprinklers rechnerisch nachgewiesen werden. Diese Aussage gilt sinngemäss für den Einfluss von Löschmassnahmen durch die Feuerwehr.

Anforderungen an den Nutzer

Die Anwendung von CFD-Programmen im Rahmen eines Entrauchungsnachweises stellt hohe Anforderungen an den Nutzer. Der theoretische Hintergrund der numerischen Brandsimulationen ist sehr komplex, so sind die Gebiete der Thermodynamik, Fluidodynamik, Chemie, Physik der Verbrennungsvorgänge, die numerischen Verfahren und Programmierung der Codes eigene, sehr anspruchsvolle Wissenschaftsdisziplinen, die alle ihren Beitrag zur numerischen Brand- und Rauchgassimulationen mit CFD-Codes leisten. All diese Fachgebiete müssen durch den Nutzer sinnvoll in einem Simulationsmodell angewendet werden, um die Wirklichkeit möglichst realistisch abzubilden.

Hierbei sind ergänzende Kenntnisse über Sicherheitsmassnahmen im Brandschutz (Rauch- und Wärmeabzugsanlagen, Sprinkleranlagen, Brandmeldeanlagen) und über die bei der Brandsimulation anzuwendenden strömungsmechanischen und physikalischen Submodelle notwendig. Darüber hinaus sind Erfahrungen bei der Netzgenerierung unerlässlich.

Zudem ist Erfahrung erforderlich, um die Strömungsverhältnisse und die heiklen Zonen im Voraus zu erkennen und bei der Netzgenerierung entsprechend berücksichtigen zu können.

7 PROZESSKETTE UND QUALITÄTSSICHERUNG IM RAHMEN EINES ENTRAUCHUNGSNACHWEISES

Eine seriöse Brandsimulation zeichnet sich dadurch aus, dass die dazu notwendige Prozesskette eingehalten wird und eine Qualitätssicherung erfolgt, die diesen Namen auch verdient. Obwohl vielen als Schlagwörter ein geläufiger Begriff gibt es wenige, die mit deren Inhalt und Konsequenzen vertraut sind.

Prozesskette

Die im Rahmen eines Entrauchungsnachweises mittels Brandsimulationen Abbildung 1 zu durchlaufende Prozesskette lässt sich in sechs Bausteine gliedern: «Aufgabe», «Grundlagen», «Konzept», «Nachweis», «Bewertung» und «Entscheid». Die dazugehörige Dokumentation (Kapitel 10) begleitet die gesamte Prozesskette. Die Simulationen an sich sind ein relativ kleiner Baustein innerhalb der gesamten Prozesskette.

Zu Beginn der Prozesskette sollen die Situation und die Ausgangslage entgegen genommen und verstanden werden. Ausgehend von diesen Informationen und der bisherigen Erfahrung des Entrauchungsingenieurs können die Ziele identifiziert und gemeinsam mit dem Auftraggeber festgelegt werden. Um den weiteren Ablauf festlegen und allfällige Komplikationen auf diesem Weg umgehen zu können, ist es wichtig, die Randbedingungen, Projektbeteiligten mit ihren Interessen sowie sonstige Dritteinflüsse zu identifizieren.

Die Grundlagenermittlung ist das Herzstück der Prozesskette von Brandsimulation. In dieser Phase werden die entscheidenden Fragen für die Brandsimulation geklärt: Der Bauherr gibt die massgebenden Grundrisse und Pläne frei; der Ingenieur informiert sich über allfällige Auflagen der Behörden, liest sich in das Brandschutzkonzept ein und wählt das für die Aufgabe sinnvolle Simulationsmodell resp. -programm. Weiter legt er zusammen mit dem Auftraggeber die qualitativen und/oder quantitativen Schutzziele (Kapitel 8) fest, erarbeitet die massgebenden Brandszenarien (Kapitel 9), überprüft und legt die Randbedingungen fest sowie schlägt Umfang und Art und Weise der Auswertung vor. Schutzziele, Brandszenarien, Randbedingungen und Auswertung stimmt er anschliessend im Sinne einer Freigabe mit der zuständigen Behörde ab.

Im Anschluss – oder auch parallel – zur Grundlagenermittlung wird das Entrauchungskonzept erarbeitet. Dieses enthält primär Angaben zur Entrauchungsart (natürlich vs. mechanisch), zur Lage und Ausführung von Nachströmöffnungen und Absaugpunkten, zum Volumenstrom (im Sinne einer Vordimensionierung), zur Aktivierung/Deaktivierung der Entrauchung und anderer Lüftungstechnischer Geräte

sowie weiterer, für die Entrauchung relevanten Brandfallsteuerungen. Dabei darf die Abstimmung auf das Brandschutzkonzept nicht in Vergessenheit geraten. Häufig sind aufgrund des Entrauchungskonzeptes Anpassungen wie beispielsweise zusätzlich BMA-überwachte Bereiche notwendig.

Gut gerüstet mit Grundlagen und Konzept wird die eigentliche Simulation – der Nachweis – in Angriff genommen. Zu Beginn dieses Pro-

zesses steht die Nachweisstrategie, in der überlegt wird, was wie nachgewiesen werden soll und welche Simulationen dazu notwendig sein werden. Am Ende der Berechnungen folgen die Darstellung und die Auswertung der Resultate.

Die darauf folgende Bewertung – das eigentliche Engineering – ist wiederum ein zentraler Schritt in der Prozesskette. Häufig geht die Prüfung der Plausibilität und Konzeptverträglichkeit der Resultate im Staunen über die farbi-

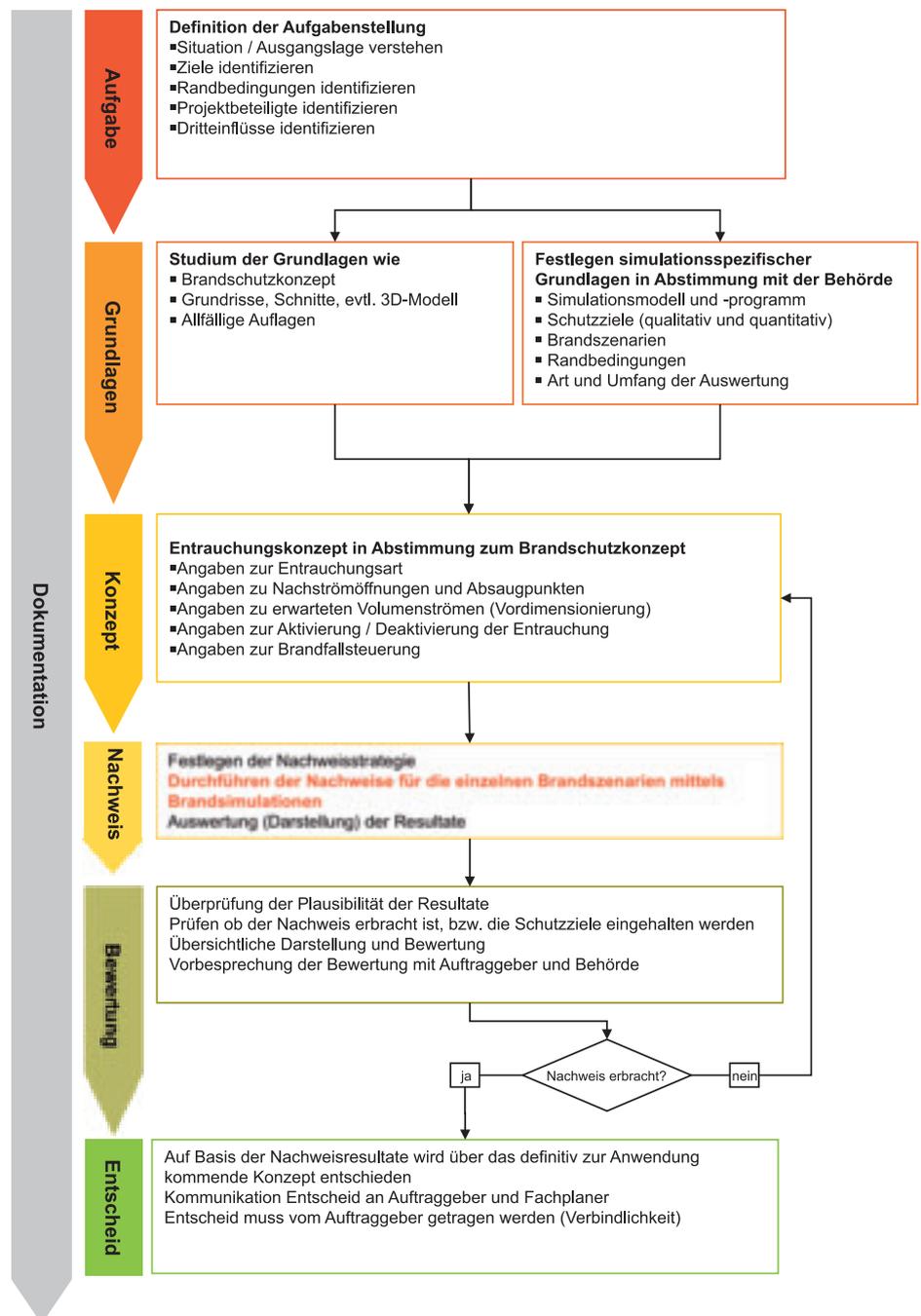


Abbildung 1: Prozesskette im Rahmen eines Entrauchungsnachweises mittels Brandsimulationen

7 PROZESSKETTE UND QUALITÄTSSICHERUNG IM RAHMEN EINES ENTRAUCHUNGSNACHWEISES

gen Bilder unter. Dabei sind sich viele Ingenieure nicht bewusst, welche Verantwortung (Haftung) sie mit der Auswertung der Resultate übernehmen. Falls notwendig sind aufgrund von nichterfüllenden Nachweisen oder – falls vom Auftraggeber erwünscht – aufgrund von Optimierungsmöglichkeiten zusätzliche Simulationen notwendig. Eine Folge der Auswertung kann die Anpassung und/oder Ergänzung des Brandschutzkonzeptes sein.

Auf der Basis der Bewertung kann zusammen mit dem Auftraggeber über das zur Anwendung kommende Entrauchungskonzept entschieden werden. Dabei sind Faktoren wie Erfüllungsgrad des Nachweises, Wirtschaftlichkeit oder Robustheit des Konzeptes gegenüber Nutzungs- und Geometrieänderungen zu berücksichtigen. Der Konzeptentscheid wird den Fachplanern als Basis für die weitere Pla-

nung und muss von diesen wie vom Auftraggeber aktiv getragen werden (Verbindlichkeit).

Qualitätssicherung

Im Rahmen der Qualitätssicherung werden die Simulationen mit der dazugehörigen Dokumentation auf Vollständigkeit, Plausibilität und Nachvollziehbarkeit geprüft. Der Bericht ist vollständig, wenn die Angaben enthalten sind, die mit den Behörden vereinbart wurden, wenn alle Grundlagen vollständig sind, wenn die Resultate korrekt dargestellt sind und auf Basis des vorliegenden Berichtes die Fachingenieure ihre Planungsarbeiten durchführen können. Die Plausibilität kann mittels Erfahrungs- und Tabellenwerten vorerst grob abgeschätzt werden. Detailliertere Plausibilitätsprüfungen umfassen die Kontrolle der Strömungen sowie von Phänomenen wie Back-Layering, Balcony-Spill,

etc. Sensitivitätsanalysen sind bei Zwei-Zonen-Modellen gut durchführbar, bei CFD-Simulationen sprengt der dazu notwendige Aufwand in den meisten Fällen den Kosten- und Zeitraumen. Diese Gegebenheit kann durch Erfahrung, eine sorgfältige Auswahl der Eingabeparameter und viel Rechenpower gut kompensiert werden.

Nach der Brandsimulation

Nach Konzept und Nachweis ist die Arbeit des Entrauchungsingenieurs nicht abgeschlossen. Es folgt die Begleitung der Planung der Entrauchung durch den Fachplaner und der Umsetzung der Entrauchung durch den Unternehmer und nicht zuletzt die Teilnahme an der Abnahme der Entrauchung mit den zuständigen Behörden. Ziel ist immer die Sicherstellung von konzeptkonformer Umsetzung und Betrieb der Entrauchung.

8 SCHUTZZIELE

In Analogie zu anderen ingenieurmäßigen Nachweisverfahren müssen die einzuhaltenen Schutzziele als Bemessungsgrundlage objekt- und nutzungsspezifisch definiert werden, ehe mit dem Nachweis mittels Brandsimulationen begonnen werden kann.

Im Brandschutzingenieurswesen orientieren sich die Schutzziele an folgender Priorisierung:

Gesetzlich vorgeschrieben

- ▶ **Priorität 1**
Personenschutz (Selbstrettung)
- ▶ **Priorität 2**
Interventionsschutz
(Fremdrettung und wirksame
Brandbekämpfung)

Freiwillige Option

- ▶ **Priorität 3**
Gebäudeschutz
- ▶ **Priorität 4**
Aufrechterhaltung des Betriebes
(Business-Continuity)

Beim Entrauchungsnachweis gilt es in der Regel aufzuzeigen, dass im Brandfall die Selbstrettung von Personen sowie ein ausreichender

Interventionsschutz gewährleistet werden. Die Höhe der raucharmen Schicht stellt in diesem Zusammenhang eine wesentliche Schutzzielquantifizierung dar (siehe Abbildung 2). Dabei ist nicht einheitlich geregelt, welche Verhältnisse als raucharm zu bewerten sind. Unter Berücksichtigung der einschlägigen Literatur wie [1], [2], [3], [4], [5], [6],[7], [8], [13] und [14] wird vorgeschlagen, den Begriff «raucharm» über die in Tabelle 1 quantifizierten Schutzzielparameter zu definieren.

Die Grenze zwischen verrauchter und raucharmer Schicht wird somit ausschliesslich mit Hilfe der Temperatur [°C] und des Extinktionskoeffizienten $K [m^{-1}]$ entsprechend den in Tabelle 1 festgelegten Grenzwerten lokalisiert. Auslegungsrelevante Grösse ist in der Regel der Grenzwert K .

Die Verwendung des Extinktionskoeffizienten als Schutzzielparameter erfordert, dass die Eingabeparameter (Inputdaten), die den Grenzwert K beeinflussen, mit ausreichender Sicherheit behaftet ausgewählt werden. Ohne besonderen Nachweis sind mindestens die im Kapitel 9 beschriebenen Inputdaten für den Brennstoff Polyurethan zu wählen²⁾. Nur so kann unter Berücksichtigung von [1], [4], und [5] im

Rahmen eines ingenieurmässigen Nachweises davon ausgegangen werden, dass mit Einhaltung des Schutzzieles «Extinktionskoeffizient $K < 0.15 m^{-1}$ » in der raucharmen Schicht keine toxischen Gase in für Menschen gefährlicherer Dosis auftreten (bei den in Abbildung 2 postulierten Einwirkzeiten). Begründet wird diese Aussage unter anderem mit der Tatsache, dass sich der Rauch (über Rauchdichte nachgewiesen) rascher absenkt als beispielsweise CO oder HCN, die beide etwas leichter als Luft sind.

Von einem weitergehenden Detaillierungsgrad in der Schutzzielauswertung (Outputdaten) wird abgeraten, da im Normalfall keine abgesicherten Aussagen zu toxischen Gasen wie CO, CO₂, HCN, NOX, gemacht werden können [18]. Seriöse Aussagen zu den toxischen Gasen würden sehr genaue Angaben (Input-Daten) bzgl. Vollständigkeit des Verbrennungsprozesses, Zusammensetzung des Brandgutes, etc. bedingen. Solche Angaben sind aber erfahrungsgemäss mit einer sehr hohen Unsicherheit behaftet. Rechenresultate aufgrund solcher Eingabewerte wären mit mindestens derselben Unsicherheit behaftet, was deren Aussagekraft stark schmälern würde.

Schutzzielparameter	Grenzwert	Bemerkung
Temperatur in der raucharmen Schicht	< 50°C	
Temperatur in der Rauchgasschicht	< 200°C	Mit diesem Wert ist nebst dem Personenschutz vor Verbrennung aufgrund der Hitzeabstrahlung in der Rauchschicht [16] sowie dem Schutz vor Sekundärbränden auch der Schutz vor Flash-Over (im Bereich 500 – 600°C [13]) abgedeckt.
Extinktionskoeffizient K	≤ 0.15 m ⁻¹	Der Grenzwert K = 0.15 [m ⁻¹] wurde im Einklang mit [5] und [6] festgelegt.

Tabelle 2: Definition des Begriffs «raucharm»

Auch Berechnungen der Sichtweite sind gemäss [8] nicht gut validiert, bzw. mit grösster Vorsicht zu geniessen. Mit der oben beschriebenen Schutzzielquantifizierung, bzw. einem Extinktionskoeffizienten

$K < 0.15 \text{ m}^{-1}$ ist jedoch auch ohne besonderen Nachweis von ausreichenden Sichtverhältnissen im Brandfall auszugehen. In den Untersuchungen nach [4] wurden, bezogen auf die Erkennbarkeit von Fluchtwegpiktogrammen, erst ab einem Extinktionskoeffizienten von $K = 0.4 \text{ m}^{-1}$ ($\gg 0.15 \text{ m}^{-1}$) wirksame Sichttrübungen festgestellt.

Die Rauchgasschichtbildung an sich kann von Randbedingungen, wie Wind und Umgebungstemperatur signifikant beeinflusst werden. Vorschläge wie mit diesen Randbedingungen im Rahmen eines Entrauchungsnachweises umgegangen werden im Kapitel 9 unterbreitet.

Die Schutzzielparameter müssen im betrachteten Raum mit Ausnahme der unmittelbaren Nähe des Brandherdes eingehalten werden. Es wird vorgeschlagen unter «unmittelbare Nähe des Brandherdes» im Zweifelsfall eine kreisförmige Fläche von 10% der Gesamttraumfläche um den Brandmittelpunkt herum anzunehmen. Unter Raum wird der Brand- resp. Entrauchungsabschnitt verstanden.

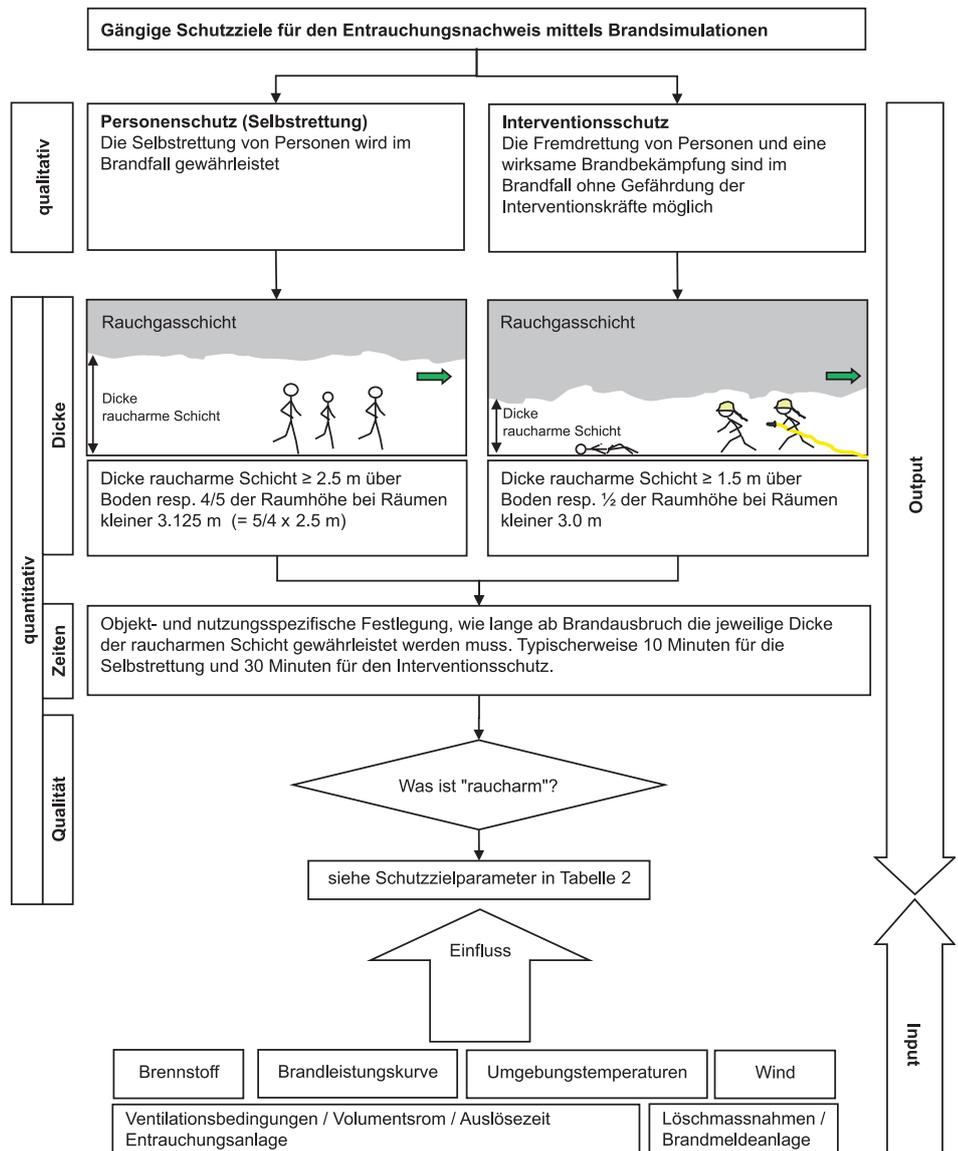


Abbildung 2: Schutzziele und deren Einflussgrößen beim Entrauchungsnachweis

²⁾ [5] kann basierend auf Realbrandversuchen entnommen werden, dass z.B. bei Holz (Brennstoffen mit einem deutlich geringeren Rauchausbeutefaktor als Ployurethan) trotz ausreichendem Extinktionskoeffizienten die toxischen Grenzwerte überschritten sein können.

9 WICHTIGE EINFLUSSGRÖSSEN UND EINGABEPARAMETER

Oben wurde bereits angemerkt, dass die im Modell zu berücksichtigenden Randbedingungen wie Brandszenarien, Umgebungstemperatur etc. die Simulationsergebnisse und somit auch die einzuhaltenden Schutzziele, wie in Abbildung 2 angedeutet, wesentlich beeinflussen können. Vor diesem Hintergrund ist der Anwender von Brandsimulationsprogrammen angehalten geeignete Annahmen zu treffen. Dabei ist es kaum möglich alle denkbaren Fälle zu untersuchen und hinsichtlich der einzuhaltenden Schutzziele auch abzudecken. Ziel muss es jedoch sein durch vereinfachte eher konservative Annahmen möglichst viele Fälle abzudecken. Am Ende entscheidet schliesslich das Gesamtpaket an getroffenen Annahmen in Verbindung mit den definierten Schutzziele über die Robustheit des rechnerischen Nachweises bzw. die im Nachweis enthaltenen Sicherheitsreserven.

Im Folgenden wird auf die einzelnen Randbedingung mit wesentlichem Einfluss auf die Schutzziele eingegangen und ein Vorschlag für geeignete Eingabedaten unterbreitet, aus denen zusammen mit den zuvor beschriebenen Schutzziele ein zweckmässiges Gesamtpaket resultiert. Hierbei wird auch aufgezeigt, wie mit dem Einfluss wirksamer Löschmassnahmen beim Entrauchungsnachweis umgegangen werden kann.

Niedrig- vs. hochenergetische Brände

Im Einklang mit dem Blatt 1 der VDI 6019 [9] werden niedrig- und hochenergetische Brände unterschieden. Naturbrände zeichnen sich dadurch aus, dass sie häufig zu Beginn eine Niedrigenergie-Phase aufweisen, bevor sie in die Hochenergie-Phase übergehen. Da der Übergangszeitpunkt zwischen diesen beiden Phasen nicht vorhersehbar ist, wird empfohlen sie jeweils für sich einzeln mit der konservativen Annahme zu betrachten, dass auch für den hochenergetischen Brand $t_0 = 0$ s als Brandausbruch gilt.

In der Vergangenheit war es eher die Ausnahme niedrigenergetische Brände zu untersuchen. Dies entspricht nicht mehr dem heutigen

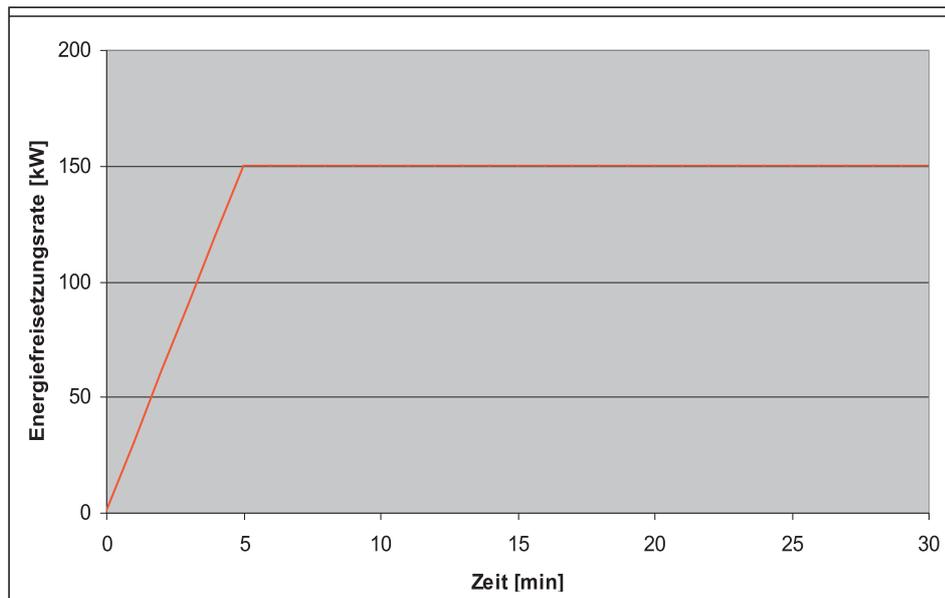


Abbildung 3: Brandleistungskurve für niedrigenergetische Brände

Stand des Wissens, da auch solche Brände bereits eine Personengefährdung nach sich ziehen können [9].

Zudem ist bei einem niedrigenergetischen Brand nicht zwingend von einer Auslösung einer auf Temperatur ansprechenden automatischen Feuerlöschanlage (z.B. Sprinkleranlage) oder Detektion (reine Wärmemelder) auszugehen, sodass die mit diesem anlagentechnischen Brandschutz abgesicherten Schutzziele unter Umständen nicht eingehalten werden können.

Modellierung niedrigenergetischer Brände

Es wird vorgeschlagen niedrigenergetische Brände derart zu modellieren, dass ab Brandausbruch ($t_0 = 0$ sec.) ein linearer Anstieg bis auf 150 kW innert 5 Minuten mit einem anschliessenden konstanten Verlauf (steady state) über den Betrachtungszeitraum angenommen wird. Der Brandherd wird auf eine Fläche von 1 m² und z.B. eine Höhe von 1 m begrenzt.

Die Modellierung der niedrigenergetischen

Brände erfolgt unabhängig von der vorhandenen Nutzung. In dieser Brandphase sind nutzungsspezifisch keine wesentlichen Unterschiede festzustellen.

Modellierung hochenergetischer Brände

Die Entwicklung hochenergetischer Brände (Abbildung 4) wird in der gängigen Praxis mit dem α - t^2 -Gesetz beschrieben [13], wobei auch hier angenommen wird, dass $t_0 = 0$ sec. = Brandausbruch gilt:

$$\dot{Q}(t) = \alpha \cdot t^2$$

- mit \dot{Q} Energiefreisetzung in [kW]
 α Brandzunahme-Koeffizient in [kW/s²]
 t Zeit ab Brandausbruch in [s]

Die Wahl von α hängt direkt von der Nutzung resp. dem zu erwartenden Brandereignis und der Geschwindigkeit seiner Entwicklung ab. In der Literatur [1], [2], [9], [15] werden in Abhängigkeit der Brandentwicklungs-Geschwindigkeit folgende Werte unterschieden:

- ▶ slow: $\alpha = 0.0029$
Museum, Sitzungszimmer mit massiven Möbeln
- ▶ medium: $\alpha = 0.0117$
Büros, Hotelzimmer, Wohnung, Holzpaletten, Spital, Gastronomie
- ▶ fast: $\alpha = 0.0470$
Ausstellung, Verkauf, PKW, LKW, Archive,
- ▶ ultrafast: $\alpha = 0.1878$
Chemielabor

Die für die Simulation notwendige Zuordnung des α -Wertes ist objektbezogen immer zu

Nutzung	Max. Abbrandleistung \dot{Q}_{max} [MW]	Max. spez. Energiefreisetzungsrates \dot{q}_{max} [kW/m ²]	Quelle
Büros	–	290	[2], dort Tab. 8
Verkaufsfläche, Wohnung	–	500	[2], dort Tab. 8
Hotelzimmer	–	249	[2], dort Tab. 8
PKW	8.5	–	Pkw in einer kleinen, gut belüfteten Garage gemäss [2], dort Tab. 11
LKW	20 bis 120	–	[15], dort unter Ziff. 7.2.1

Tabelle 3: Zusammenstellung nutzungsspezifischer Brandkenngrössen

9 WICHTIGE EINFLUSSGRÖSSEN UND EINGABEPARAMETER

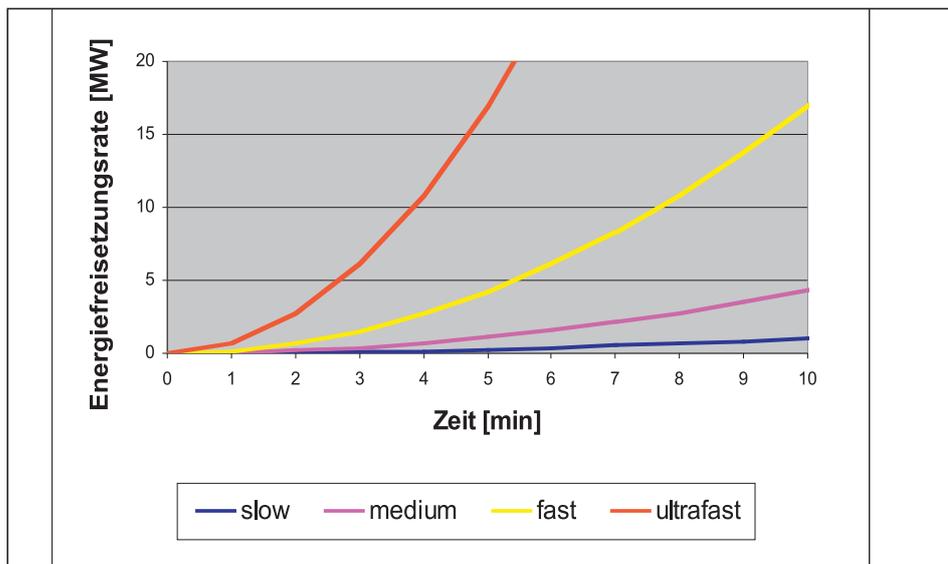


Abbildung 4: Mögliche Brandentwicklungen nach dem α - t^2 -Gesetz

prüfen und ggf. in Abweichung zu obiger Zusammenstellung festzulegen. Insbesondere bei der Verwendung von «slow» und «ultrafast» ist Vorsicht geboten resp. eine saubere Herleitung notwendig. In der Regel sind die Brandentwicklungs-Geschwindigkeiten «medium» resp. «fast» massgebend.

Für die Herleitung des zu simulierenden Brandverlaufs muss neben dem α -Wert die spezifische Energiefreisetzungsrates und die maximale mögliche Abbrandleistung definiert werden. Diese Werte sind auch notwendig um die Brandausbreitung bei Simulation entsprechend berücksichtigen zu können. Tabelle 3 enthält eine Auswahl repräsentativer Werte aus der einschlägigen Literatur.

Brandorte

Die Auswahl der massgebenden Brandorte setzt eine gewisse Erfahrung des Anwenders voraus. Je nach Schutzziel (Temperatur oder Rauch) kann der ein oder andere Brandort massgebend sein. Meistens spielen folgende Gegebenheiten bei der Brandortauswahl eine Rolle:

- ▶ Bei einem möglichen Brand unterhalb einer Galeriekante oder eines sonstigen Einbaus ist mit einer erhöhten Frischlufteinmischung im Bereich der Überströmkanten zu rechnen. Dieser Effekt (Balcony Spill) führt erfahrungsgemäss, je nach Länge der Überströmkante zu einer Vervielfachung des abzuführenden Rauchgasvolumens. Durch die Installation von Leitschürzen kann dieser Effekt wirkungsvoll begrenzt werden.
- ▶ Je höher die Aufstiegsmöglichkeit (Abstand Decke Brandherd) eines Plumes ist, je mehr Luft kann in Plume

eingemischt werden, was wiederum zu einer Vergrösserung des abzuführenden Rauchgasvolumens führt. Auf Grund dieses Effekts resultiert aus einer Erhöhung der lichten Raumhöhe im Planungsprozess nicht zwingend eine bessere Ausgangssituation für den Entrauchungsnachweis.

- ▶ Brände im wandnahen Eckbereich können zu völlig anderen typischerweise schlechteren Temperatur- und Rauchgasverhältnissen führen als Brände in Raummitte.

Brennstoff

Als Brennstoff (Brandgut) ist im Sinne einer konservativen Annahme⁴⁾ von Kunststoff (Polyurethan) auszugehen (Vorschlag SSI). Gemäss Klote [13] werden für Polyurethan (steif resp. nicht biegsam) folgende Parameter verwendet:

- ▶ Rauchausbeutefaktor (yield-value) 0.118 [g/g]
- ▶ Effektiver Heizwert (chemical heat of combustion) 16.9 [kJ/g]

Diese beiden Werte beeinflussen massgeblich Rauchausbeute und Raumdichte. Sie stellen somit beim Entrauchungsnachweis zentrale Grundlagen-Werte dar, von denen nur in begründeten Fällen abgewichen werden sollte.

Zur Eruiierung der Raumdichte ist weiter der spezifische Extinktionskoeffizient notwendig. Im Einklang mit [13] wird der mehr oder weniger materialunabhängig Wert $K_m = 7.6$ [m^2/g] verwendet. Der Extinktionskoeffizient berechnet sich daraus wie folgt:

$$K = K_m \cdot m_p$$

mit K Extinktionskoeffizient in [m^{-1}]
 K_m spezifischer Extinktionskoeffizient in [m^2/g]
 m_p Massenkonzentration der Partikel in [g/m^3] (Rechenwert aus Simulation)

Ventilationsbedingungen / Aktivierungszeit Entrauchungsanlage

Auch Lüftungseinrichtungen für den Normalbetrieb wie z.B. Luftauslässe im deckennahen Bereich oder Umluftkühlgeräte können negativen Einfluss auf die einzuhaltenden Schutzziele haben. Der negative Effekt einer unkontrollierten Rauchgasverteilung kann dabei durch ein verzögertes Ansprechen der Rauchmelder und somit einer verzögerten Aktivierung der Entrauchungsanlage noch verstärkt werden.

Im Rahmen eines Entrauchungsnachweises ist daher eine Aussage zu treffen, wie mit möglichen Einflüssen der Lüftungseinrichtungen für den Normalbetrieb umgegangen wird. Unter Berücksichtigung des gesamten Eingabedatenpakets kann es durchaus gerechtfertigt sein derartige Einflüsse zu vernachlässigen und durch entsprechend konservative Modellannahmen hinsichtlich Brennstoff (siehe oben) und Aktivierungszeit der Entrauchungsanlage zu kompensieren. In diesem Fall wäre die Lüftung für den Normalbetrieb mit Simulationsbeginn bereits deaktiviert. Die Entrauchungsanlage würde mit Simulationsbeginn oder etwas zeitverzögert hochfahren. Wichtig ist, dass man sich vergegenwärtigt, dass der Aktivierungszeitpunkt der Entrauchungsanlage darüber entscheiden kann, ob der Nachweis erbracht werden kann oder nicht und entsprechend sorgfältig zu definieren ist.

Je nach Situation kann es sinnvoll sein zusätzliche Massnahmen zur Verbesserung der Rauchgasdetektion zu ergreifen und z.B. einen Rauchmelder in der Abluft oder Linienmelder zu installieren.

Theoretisch wäre es natürlich möglich die Brandentstehungsphase unter Einfluss der Lüftung für den Normalbetrieb einschliesslich dem Prozess «Aktivierung Brandmeldetechnik → Deaktivierung Lüftung → Aktivierung Entrauchungsanlage» mittels CFD-Simulationen zu untersuchen. Diese Vorgehensweise sollte aber eher auf den Ausnahmefall beschränkt bleiben, da hiermit eine Genauigkeit in das Nachweisverfahren hineingetragen würde, die vor dem Genauigkeitshintergrund der Inputdaten anzuzweifeln ist. Weiter ist gerade bei Hochbauten zum Simulationszeitpunkt die Art der Zulufführung im Normalfall gar nicht bekannt.

⁴⁾ Der gewählte Wert ist konservativer als der im vdfb-Leitfaden genannte Wert.

9 WICHTIGE EINFLUSSGRÖSSEN UND EINGABEPARAMETER

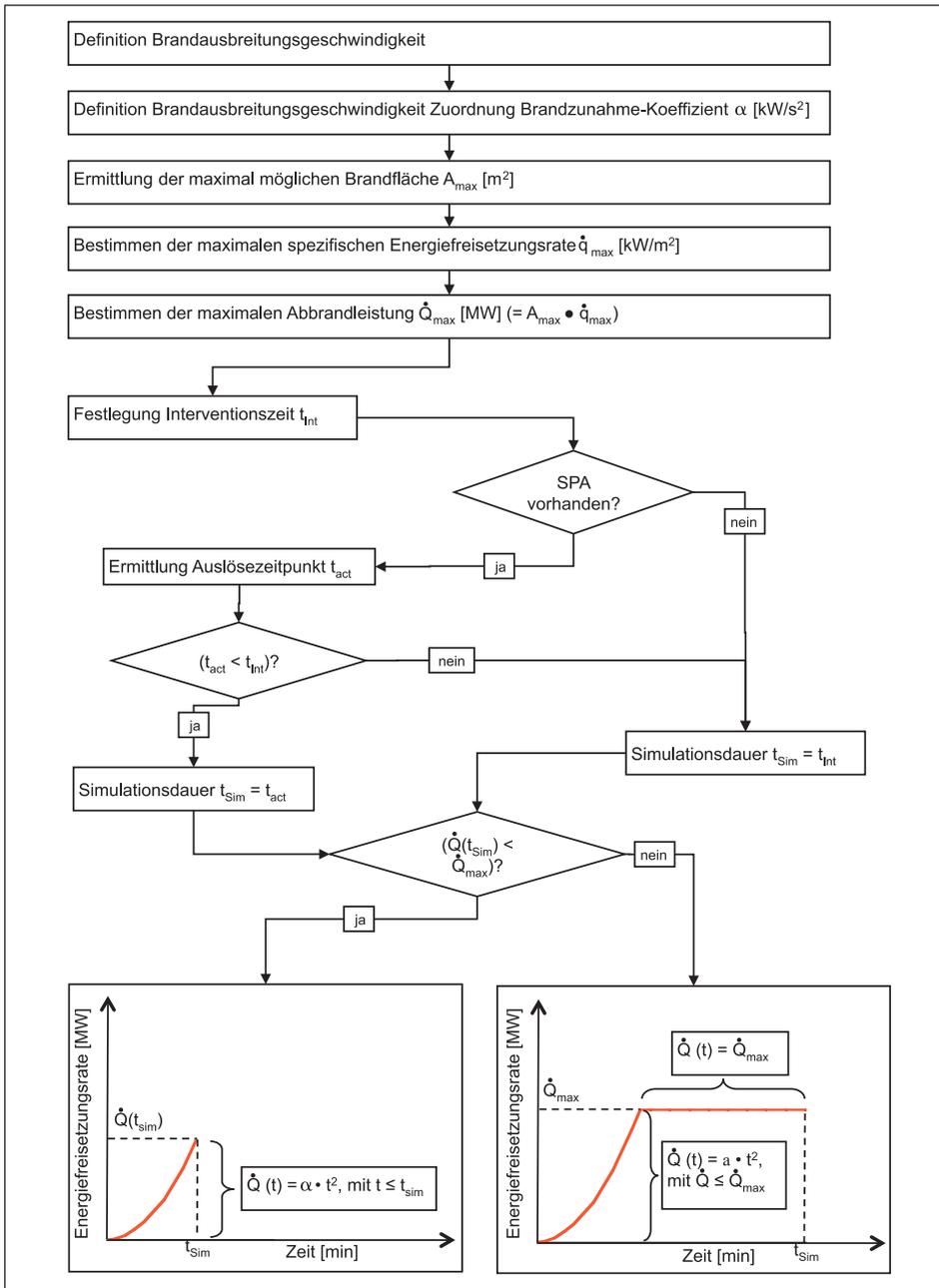


Abbildung 5: Herleitung hochenergetische Brandleistungskurve für den Entrauchungsnachweis

Umgebungstemperaturen

Temperaturunterschiede zwischen Innenraum und der äusseren Umgebung können die Rauchgasschichtbildung sowohl negativ als auch positiv beeinflussen. Der Einfluss ist bei einem System mit natürlichen Rauch- und Wärmeabzugseinrichtungen im Dach und natürlicher Nachströmung im bodennahen Bereich besonders gross, da diese Öffnungsanordnung einen thermischbedingten Durchzug ermöglicht. Die Durchzugsrichtung ist vom Temperaturfall abhängig: Sommer oder Winter.

Im Winterfall wird sich eine nach oben gerichtete Strömung einstellen («Stack Effect»)

und somit den natürlichen Rauchabzug eher positiv unterstützen. Im Sommerfall ist es hingegen möglich, dass sich eine thermische Strömung von oben nach unten einstellt («Reverse Stack Effect») und somit der Rauchabzug über Dach verhindert oder zumindest in der Brandentstehungsphase behindert wird. Daher sollte bei natürlichen Entrauchungsanlagen vorzugsweise mit dem Sommerfall gerechnet werden. Hierbei sollte in klimatisierten Bereichen eine Temperaturdifferenz von mindestens 10 °C angesetzt werden.

Bei maschinellen Rauch- und Wärmeabzugsanlagen kann auf Grund des nicht zu er-

wartenden «Reverse Stack Effekt» nicht so einfach vorhergesagt werden, welcher Fall auslegungsrelevant ist. Tendenziell wird dies ebenfalls der Sommerfall sein, da sich die wärmer nachströmende Aussenluft (Sommerfall) negativ auf die Stabilität der Rauchgasschicht auswirken kann. Allerdings kann auch der Winterfall auslegungsrelevant sein, wenn sich der thermisch bedingte Auftrieb positiv auf das maschinelle Entrauchungssystem auswirkt.

Im Zweifelsfall sollten sowohl bei natürlichen als auch maschinellen Entrauchungsanlagen Sommer- und Winterfall untersucht werden. So erhält man Aufschluss darüber welches tatsächlich der massgebende Fall ist. Gleichzeitig wird deutlich, wie sensibel das System auf Temperaturunterschiede reagiert. Diese Erkenntnisse können dann in die abschliessende Bewertung der Resultate einfließen.

Wind, Nachströmöffnungen

Auch wenn Wind grossen Einfluss auf die Stabilität der Rauchgasschicht ausüben kann, wird dieser im Normalfall nicht mitsimuliert. Gängige Praxis ist es, negative Windeinflüsse durch konstruktive Massnahmen zu begrenzen. Z.B. sollten die Nachströmöffnungen an möglichst zwei gegenüberliegenden Seiten im unteren Drittel des Raumes angeordnet werden und so bemessen werden, dass die Zuluftgeschwindigkeit ≤ 1 m/s beträgt. Weitere Empfehlungen zur Begrenzung negativer Windeinflüsse sind in [20] und [21] enthalten.

Simulationsdauer beim Entrauchungsnachweis

Abbildung 5 zeigt die typische Vorgehensweise zur Herleitung der hochenergetischen Brandleistungskurve für den Entrauchungsnachweis.

Zitat Dipl.-Ing. Gerd Jung, öffentlich bestellter und vereidigter Sachverständiger für den baulichen Brandschutz:

Mit dem Beginn wirksamer Löschmassnahmen³⁾ (durch Feuerwehr oder Sprinkleranlage) kann die Simulation abgebrochen werden, da die heute bekannten Simulationsmodelle den Einfluss der Wassertropfen auf die Rauchschichtbildung und die Sichtverhältnisse im Brandraum nicht hinreichend abbilden können (siehe Kapitel 6).

³⁾ Der Auslösezeitpunkt des Sprinklers kann mit Hilfe der VDI 6019 (Blatt 1) [9] geschätzt oder aber auch rechnerisch ermittelt werden. Der Beginn wirksamer Löschmassnahmen durch die Feuerwehr ist mit der zuständigen Feuerwehr abzustimmen.

9 WICHTIGE EINFLUSSGRÖSSEN UND EINGABEPARAMETER

D.h., Ergebnisse nach dem anzunehmenden Beginn wirksamer Löschmassnahmen können zwar produziert werden, sind jedoch nicht geeignet um belastbare Aussagen zum Extinktionskoeffizienten zu treffen.

Es ist Aufgabe des Brandschutzingenieurs diesen theoretischen Schwachpunkt im Hinblick auf die einzuhaltenden Schutzziele bei der Bewertung der Ergebnisse sowie der Dimensionierung der erforderlichen Entrauchungsgrössen entsprechend zu berücksichtigen. Bei der Bewertung ist es durchaus angemessen, vor dem zeitlichen Hintergrund entsprechend zu berücksichtigen, dass der simulierte hochenergetische Brandverlauf mit sofortigem quadratischem Zuwachs der Wärmefreisetzungsrate als eher konservativ zu be-

werten ist. In der Regel geht dem hochenergetischen ein niedrigenergetischer Brandverlauf voraus. Wie lange diese Phase andauert hängt von unterschiedlichen Faktoren wie Intensität der Zündquelle, Brandgut etc. ab und kann im Grunde niemand vorhersagen.

Wenn sich herausstellt, dass flüchtende Personen durch die Wasserdampfbildung des Sprinklerwassers und der hieraus resultierenden sichtrübenden Wirkung gefährdet werden können, sind ggf. zusätzliche Evakuierungsuntersuchungen anzustellen und oder zusätzliche Massnahmen zu ergreifen. Zusätzliche Massnahmen können dann z.B. sein:

- ▶ Trägheitsindex oder Nennauslösetemperatur des Sprinklers erhöhen (→ späterer Auslösezeitpunkt)
- ▶ Ausgangsbreiten erhöhen (→ Reduzierung der Evakuierungsdauer).

Bei der Dimensionierung der erforderlichen Entrauchungsgrössen können die Teile 2 und 5 der DIN 18232 ([21], [22]) eine gute Orientierungshilfe darstellen. Wichtig ist, dass man die Hintergründe und somit die Anwendungsgrenzen der hierin tabellierten Werte kennt. Bei komplexen Geometrien kann es durchaus notwendig werden sich basierend auf Erfahrungswerten iterativ den erforderlichen Entrauchungsgrössen anzunähern.

10 VORSCHLAG ZUR DOKUMENTATION (BEST PRACTICE)

Der Dokumentation kommt im Rahmen der Prozesskette eines Nachweisverfahrens eine entscheidende Bedeutung zu. Sie stellt die Verständigungsgrundlage für alle Diskussionen zu diesem Thema und die Weiterbearbeitung der Entrauchung durch die Fachplaner dar. Der Ersteller muss sich immer vor Augen halten, für wen er die Dokumentation erstellt: Für die Behörde, den Kunden, die Fachplaner und nicht zuletzt auch für sich selbst. Die Dokumentation muss derart sein, dass eine Fachperson jederzeit ohne Hilfe des Verfassers die darin gezogenen Schlussfolgerungen aufgrund der enthaltenen Information rekonstruieren oder zumindest die Qualitätskontrolle der dokumentierten Arbeiten durchführen kann. Bei der Dokumentation ist dem Leitsatz «So wenig wie möglich – so viel wie nötig» zu folgen.

Im Nachfolgenden wird ein Vorschlag zur Gliederung der Dokumentation einschliesslich stichpunktartiger Benennung von wesentlichen Inhalten unterbreitet:

Ausgangslage

Aufgabenstellung

- ▶ Präzisierung der Aufgabenstellung (Was will ich überhaupt nachweisen?)

Grundlagen

- ▶ Gegebene Grundlagen wie Brandschutzkonzept, Pläne, Auflagen ...
- ▶ Simulationsmodell und -programm (Programm mit Verweis auf Referenz, Angaben zu möglichen Modellannahmen, bzw. Vereinfachungen...)
- ▶ Schutzziele (qualitativ und quantitativ)
- ▶ Brandszenarien (Herleitung hoch- und niedrigenergetische Brandleistungskurven, Brennstoff, Brandorte)
- ▶ Randbedingungen (Anlagentechnik, Umgebungsbedingungen, Aktivierungsart und -zeit der Entrauchungsgrössen)
- ▶ Art und Umfang der Auswertung (Anzahl und Lage Schnitte)

Nachweisstrategie

- ▶ Erläuterung der Vorgehensweise.
- ▶ Aufstellen von Bedingungen in Abhängigkeit bestimmter Ergebnisse.

Nachweis

- ▶ Wesentliche Erkenntnisse wie z.B. besondere Strömungsverhältnisse in Bezug auf die definierten Schutzziele.
- ▶ Anschauliche Darstellung (Bilder, Diagramme) von kritischen und massgebenden Simulationsergebnissen.
- ▶ Prüfen der Ergebnisse auf Plausibilität.

Z.B. Darstellung der tatsächlich simulierten Brandleistung zur Kontrolle, ob die Brandleistung richtig vorgegeben und auch simuliert wurde.

Bewertung

- ▶ Ganzheitliche Bewertung der Ergebnisse im Hinblick auf die eingangs definierten Schutzziele, auch unter Berücksichtigung möglicher Anwendungsgrenzen im Modell.

Folgerungen und Empfehlungen

- ▶ Aus dem Nachweis resultierende Massnahmen wie z.B. Art und Umfang an Rauch- und Wärmeabzugsmassnahmen einschliesslich Anordnung und Aktivierungsart.
- ▶ Mit dem Nachweis verbindlich werdende Randbedingungen wie z.B. unabhängig vom Nachweis geplante Anlagentechnik (z.B. Sprinkleranlage oder Brandmeldeanlage).

Literaturverzeichnis

Anhänge

Auch wenn mittlerweile eine ganze Reihe von hochwertigen Grundlagendokumenten für Brandsimulationen erhältlich sind ([1], [2], [9] und [10]), so gibt es nach wie vor nicht "den einen richtigen" Weg Nachweise mittels Brandsimulationen durchzuführen. In der Praxis kommen unterschiedlichste Nachweisstrategien und stark von einander abweichende Eingabeparameter zum Ansatz. Hierbei ist kritisch anzumerken, dass die erzielten Sicherheitsniveau entsprechend stark voneinander

differieren. Um auch zukünftig die Entwicklung von individuellen, ingenieurmässigen Lösungen zu ermöglichen erscheint es jedoch wenig zweckmässig, die Nachweise mittels Brandsimulationen komplett zu normieren und somit einheitliche Sicherheitsniveau zu garantieren. Vielmehr sollte der Focus auf die Vergleichbarkeit und Kontrollierbarkeit der erzielten Ergebnisse gerichtet werden, um zu vermeiden, dass ein bestimmtes Sicherheitsniveau nicht unterschritten wird.

Hier sind die Fachverbände wie der SSI, der SWKI oder SES gefordert. Ziel muss es sein, den Kontrollinstanzen ein Grundlagendokument in die Hand zu geben, das dabei behilflich ist, die wesentlichen Eingabeparameter zu überprüfen und ggf. die "richtigen" Fragen an den nachweisführenden Ingenieur zu richten.

In diesem Sinne stellen die vorstehenden Angaben einen eher konservativen und robusten Vorschlag dar, von denen in begründeten Ausnahmefällen auch abgewichen werden kann.

12 GLOSSAR

Back-Layering

Niedergang des Rauches resp. nach unten gerichtete Strömung des Rauches ab einer bestimmten Distanz zum eigentlichen Brandherd. Das Phänomen kann meistens auf die Abkühlung des Rauches ausserhalb des thermischen Einflusses des Feuers zurückgeführt werden.

Balcony-Spill

Einmischen von grossen Mengen an Sauerstoff beim Überströmen des Rauches von Kanten, wie sie beispielsweise bei Balkonen vorkommen. Durch dieses Phänomen nimmt das Rauchvolumen typischerweise massiv zu.

Business-Continuity

Weiterführen des Kerngeschäfts eines Unternehmens unmittelbar nach Eintritt eines Brandes oder sonstigen Schadensereignisses.

Computational Fluid Dynamics (CFD)

Der Begriff «Computational Fluid Dynamics» oder abgekürzt CFD steht für Berechnungen von Strömungsphänomenen von Gasen und Flüssigkeiten. Hierbei wird das betrachtete Strömungsvolumen in finite Volumina unterteilt in denen die (→ Fundamentale Gleichungen) iterativ gelöst werden. Als Ergebnis werden u.a. Temperatur-, Druck- und Konzentrationsverteilungen im gesamten Strömungsvolumen erhalten. Auch die Auswertung lokaler Geschwindig-

keiten ist möglich. Diese Methode reagiert sehr empfindlich auf die angesetzten Randbedingungen (Wärmebildung, Wandrandbedingungen, Öffnungen, Einströmverhältnisse, Einbauten, Verbrennungsmodelle).

CFD-Berechnungen können 2- oder 3-Dimensional durchgeführt werden. Für Entrauchungsnachweise werden ausschliesslich 3D-Modelle verwendet.

Entrauchungsmassnahmen

Zu- und Abluft, bereitgestellt durch Öffnungen zur äusseren Umgebung und / oder durch maschinelle Lüftungseinrichtungen, die individuell aufeinander abgestimmt und dimensioniert werden.

Extinktionskoeffizient

Der Extinktionskoeffizient $K [m^{-1}]$ beschreibt den gleichen physikalischen Sachverhalt wie die optische Rauchdichte $OD [m^{-1}]$, wobei folgende Bedingung gilt: $OD = K / \ln(10) \approx 0.43 \times K$.

Flashover

Grenze zwischen der Entstehungsphase (Pre-Flashover) und dem Vollbrand (Post-Flashover) eines Brandes in einem Raum beschreiben. Typisches Kriterium für den Flashover ist der Anstieg der Raumtemperatur auf 500–600 °C. Aber auch eine Wärmestromdichte (der Flammen und des Rauches) von 15 bis 20 kW/m² oder herausschlagende Flammen aus

den Raumöffnungen können als Merkmale herbeigezogen werden. Das Phänomen ist v.a. bei Feuerleuten gefürchtet, da bei einer solchen «Durchzündung» ein Raum von einem Moment zum anderen im Vollbrand stehen kann.

Fremdrettung

Rettung durch Dritte, primär Feuerwehrleute, da eine Eigenrettung aufgrund des Zustandes der betroffenen Person (verletzt, ggf. bewusstlos) nicht mehr möglich ist.

Fundamentale Gleichungen

Die fundamentalen Gleichungen beschreiben die instationäre, kompressible, viskose Strömung von Gasen oder Flüssigkeiten. Es ist zwischen den Erhaltungsgleichungen (conservation equations) für die Masse, den Impuls und die Energie und der Zustandsgleichung (equation of state) zu unterscheiden. Die Erhaltungsgleichungen werden im weiteren Sinne auch als Navier-Stokes-Gleichungen bezeichnet. Zu diesen Gleichungen kommen noch die Erhaltungsgleichungen für die Verbrennungsprodukte dazu. Zur Lösung der fundamentalen Gleichungen sind Randbedingungen erforderlich (boundary conditions), die üblicherweise an der äusseren Begrenzung des zu modellierenden Raumes, wie den Aussenwänden, Decken und Böden, formuliert werden müssen. Bei diesen Randbedingungen handelt es sich um Drücke, Geschwindigkeiten und Temperaturen. Dabei können auch thermodynamische Phänomene wie

Wärmeleitung und Wärmestrahlung behandelt werden.

Gitternetz

In CFD-Berechnungen wird das gesamte Strömungsvolumen in kleinere finite Volumina unterteilt, um die fundamentalen Gleichungen numerisch berechnen zu können, man spricht hierbei auch von Gitterzellen, die erzeugt werden. Die Summe aller Gitterzellen ergibt das Gitternetz

Hexaeder, Tetraeder, Prismen und Polyeder

Das Gitternetz kann je nach zu lösendem Strömungsproblem in verschiedene finite Voluminatypen ersetzt werden, am häufigsten werden Hexaeder und Tetraeder verwendet, Prismenförmige finite Volumina tauchen seltener auf. Neuere CFD-Programme besitzen die Möglichkeit finite Volumina in Form komplexerer Mehrflächner (Polyeder) zu bilden.

Hochenergie-Phase

Brandphase mit quadratischem Zuwachs der Brandfläche und Energiefreisetzungsrate über die Zeit, bis die maximal mögliche Brandfläche resp. Abbrandleistung erreicht ist. Typischerweise geht der Hochenergie-Phase eine Niedrigenergie-Phase voraus. Es ist aber auch denkbar, dass der Brand direkt mit der Hochenergie-Phase beginnt (z.B. Flüssigkeitsbrände). Die Hochenergie-Phase endet mit Abklingen oder Ablöschen des Brandes.

Konvektionsströmung

Unter Konvektionsströmung versteht man eine Strömung, die durch Dichteunterschiede verursacht wird. Beispielsweise erniedrigt sich bei einem Brand aufgrund der Temperaturerhöhung die Dichte des Brandgases, im Vergleich zur Dichte des Umgebungsgases. Das Brandgas steigt demnach nach oben, man spricht in diesem speziellen Fall der Konvektionsströmung auch von thermischem Auftrieb. Je grösser die Dichtedifferenz desto stärker ist die Konvektionsströmung.

Maximale spezifische Energiefreisetzungsrate

Dieser, in der Regel an eine bestimmte Nutzung gekoppelte Werte gibt an, wie viel Energie im

Falle eines Brandes maximal pro Quadratmeter Brandfläche freigesetzt werden kann.

Maximale Abbrandleistung

Energie, die im Falle eines Brandes eines bestimmten Brandobjektes (z.B. PKW, Sitzmöbel, Wohnraum etc.) maximal freigesetzt wird.

Niedrigenergie-Phase

Entstehungsphase eines Brandes, lokal begrenzt bei annähernd konstantem Verlauf der Energiefreisetzungsrate (30 kW bis 300 kW gemäss [9]). Ein Papierkorbbrand kann z.B. kennzeichnend für die Niedrigenergie-Phase sein, ehe sich der Brand durch entzündende Gegenstände (Schreibtisch, Stuhl etc.) ausbreitet und somit der Brand in die Hochenergie-Phase übergeht.

Ordnung des Abbruchfehlers

Für die Berechnung der fundamentalen Gleichungen kann der Lösungsansatz in Form von sog. Taylorreihen angegeben werden. Zur praktischen numerischen Berechnung werden die Gleichung in algebraische Gleichungen (Differenzgleichungen) umgewandelt. Durch diese sog. Diskretisierung entstehen Abweichung vom tatsächlichen Resultat, die sog. Abbruchfehler, diese werden umso kleiner je kleiner die Ordnung Abbruchs ist. Darunter versteht man die Anzahl an Reihenglieder die für die Diskretisierung berücksichtigt werden. Berücksichtigt man zur Diskretisierung n-Glieder der Reihe spricht man von einem Abbruchfehler n-ter Ordnung. In der Praxis hat sich eine Diskretisierung 2-ter Ordnung bewährt. Je grösser die Ordnung der Diskretisierung, desto grösser der Rechenaufwand.

Parallelrechnen

Insbesondere für grosse Modelle ist es aus Zeitgründen nötig, das gesamte Modell zu partitionieren, das heisst, die Berechnung wird auf verschiedene Rechner «verteilt», auf denen dann die Berechnung des gesamten Modells gleichzeitig (parallel) erfolgt. Die Anzahl zugeschalteter Rechner bestimmt hierbei die Rechendauer.

Selbstrettung

Die vom Brand betroffene Person kann sich selber retten, d.h. sie findet den Weg bis ins Freie selbst.

Sensitivitätsanalyse

Durch Variation der Eingabeparameter einer Berechnung werden die dazugehörigen Variationen in den Resultaten untersucht (Grenzbetrachtung). Je grösser die Streuung dieser Resultate ist, um so mehr ist deren Plausibilität zu prüfen. Durch eine Sensitivitätsanalyse erhält der Anwender auch Angaben darüber, welche Parameter bei einer Variation die Resultate am meisten beeinflussen. Gerade solche Parameter sind bzgl. Genauigkeit, Korrektheit und Vertrauen in den Wert vertieft zu prüfen.

Stack-Effect / Reverse Stack Effect

Luftströmungen auf Grund von Temperatur- und somit auch Druckunterschieden zwischen innen und aussen. Bei gegenüber innen kälteren Aussentemperaturen strömt die Luft von unten nach oben durch das Gebäude, wenn entsprechende Türen und Fenster geöffnet werden (Stack-Effekt, auch unter dem Begriff «Kamineffekt» bekannt). Bei gegenüber innen wärmeren Aussentemperaturen kehrt sich dieser Effekt um, sodass sich eine Luftströmung von oben nach unten durch das Gebäude einstellen kann (Reverse Stack Effect).

Sekundärbrand

Brand, der aufgrund der Hitze des Primärbrandes ausbricht. Darunter fallen typischerweise Brände, die durch Hitzeübertragung in andere Räume (über schlechte Brandabschnitte oder über die Fassade) entstehen können.

Turbulenzen

Turbulenzen sind räumlich und zeitlich ungeordnete Strömungen eines Gases. Verglichen mit stationären laminaren Strömungen wird eine turbulente Strömung durch eine Vielfalt von Längen- und Zeitskalen, durch eine ungeordnete raumzeitliche Struktur und eine empfindliche Abhängigkeit von Anfangs- und Randbedingungen charakterisiert. In der Praxis werden Turbulenzmodelle verwendet, welche die turbulente Strömung annähernd beschreiben.

Verbrennungsmodelle

Da eine detaillierte molekulare Beschreibung einer Verbrennung aufgrund der vielen chemischen Teilreaktionen (>1000) und teilweise unbekanntem physikalischen-chemischen Parameter für diese Reaktionen für Entrauchungsnachweise wenig praktikabel ist,

werden in der Praxis Verbrennungsmodelle angesetzt, die eine quantitative Beschreibung des Brandverlaufs mit Hilfe zeitabhängiger, spezifischer Parameter (Wärmefreisetzungsrate, Flammenhöhe, Rauchbildungsrate, Bildungsrate toxischer Brandgase usw.) ermöglichen. Die Verbrennungsmodelle sollen dem zu erwarteten Brandgut möglichst nahe kommen. Ansonsten sind konservativ abdeckende Verbrennungsmodelle zu verwenden.

Wärmedurchgang durch Bauteile

Je nach Aufbau und verwendeten Materialien weisen Bauteile einen mehr oder weniger grossen Widerstand bzgl. Wärmedurchgang auf. Die Frage, wieviel der Wärme im Brandraum auf der diesem abgewandten Seite eines Bauteils noch gemessen werden kann, ist insbesondere bzgl. Auslösung von Sekundärbränden wichtig.

Zonenmodelle

In Zonenmodellen wird ein Raum in Zonen aufgeteilt. Z.B. bilden die Rauchschiicht im oberen Teil des Raumes und die raucharme Schicht im unteren Teil je eine Zone. In Abhängigkeit des Modells kommen noch weitere Zonen für Umfassungsbauerteile, Plume und Ceiling-Jet etc. hinzu. Brandbedingte Phänomene, die in den CFD-Programmen durch die fundamentalen Gleichungen beschrieben werden können, müssen in den Zonenmodellen durch empirisch hergeleitete Ansätze vereinfacht werden. Die Anwendung sollte daher auf Gebäude mit einfachen Geometrien und Verhältnissen bei denen eine eindeutige Rauchschiichtbildung zu erwarten ist, beschränkt werden. Komplexe Strömungsverhältnisse wie sie z.B. bei Atrien mit Galerien, Korridoren, Tunnel und z.T. auch bei grossflächigen Räumen zu erwarten sind, lassen sich mit Zonenmodellen nicht seriös simulieren.

LITERATURVERZEICHNIS

- [1] Leitfaden Ingenieurmethoden des Brandschutzes, Technischer Bericht vfdb TB 04/01, 1. Auflage Mai 2006
- [2] Vds 2827: 2000-05 (01): Bemessungsbrände für Brandsimulationen und Brandschutzkonzepte, Verlag: Vds Schadenverhütung, Köln
- [3] Schneider, Ingenieurmethoden im Brandschutz, 4. Auflage, Expert Verlag, Düsseldorf, 2006
- [4] vfdb-Zeitschrift, Heft 3 August 2004, Seite 168 ff.: Untersuchungen zur Sichtweite im Rauch und zu Brandgaseinwirkung auf Menschen, Erhardt Wilk, Rüdiger Lessig
- [5] John, Reiner: Forschungsbericht Nr. 59, Ermittlung der Luftvolumenströme zur Verdünnung von Brandrauch auf ein die Gesundheit und Sichtbarkeit in Rettungswegen gewährleistendes Maß, Forschungsstelle für Brandschutztechnik, Universität Karlsruhe (TH), Karlsruhe, Januar 2003
- [6] Jin, T.: Visibility an Human Behavior in Fire Smoke, SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, SFPE/NFPA, Third Edition 2002, NFPA, Quincy MA (USA)
- [7] John, Reiner: vfdb-Zeitschrift, Heft 4 2004, Leserbrief zu [4]
- [8] Gobeau, Ledin, Lea: Guidance for HSE Inspectors: Smoke movement in complex enclosed spaces – Assessment of Computational Fluid Dynamics, Health & Safety Laboratory, Harpur Hill, Buxton, 2002
- [9] VDI 6019 Blatt 1: Ingenieurverfahren zur Bemessung der Rauchableitung aus Gebäuden, Brandverläufe, Überprüfung der Wirksamkeit, Mai 2006
- [10] VDI 6019 Blatt 2 (Entwurf): Ingenieurverfahren zur Bemessung der Rauchableitung aus Gebäuden, Ingenieurmethoden, Juli 2007
- [11] Heft 163: Praxisseminar Brandschutz bei Sonderbauten: 1. und 2. Oktober 2002 in Braunschweig; Kurzreferate 2002, Referat Nr. 3.2 «Personensicherheit in Rettungswegen – Nachweise mit Ingenieurmethoden», ISBN 3-89288-146
- [12] The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, SFPE/NFPA, Third Edition 2002, NFPA, Quincy MA (USA)
- [13] John H. Klote, J.A. Milke: Principles of Smoke Management, ASHRE, SFPE, Juni 2002
- [14] J. Zitzelsberger, D. Osterlag, J. Kuhn: Rauchfreihaltung / Entrauchung von Räumen und Gebäuden, Grundlagenermittlung für die Erstellung baurechtlicher Richtlinien, Band A: Entrauchungsgrundlagen, März 2003
- [15] Bundesamt für Strassen (ASTRA), Lüftung der Strassentunnel, Ausgabe 2004
- [16] David Purser: Toxicity Assessment of Combustion Products, 1995/2002
- [17] Vorschriften der Vereinigung kantonaler Feuerversicherungen (VKF)
- [18] W. Klingsch: Akzeptanzprobleme von Toxizitätsberechnungen bei Brandschutznachweisen, Fachbeitrag vfdb-Zeitschrift 3/2007 (141).
- [19] H. Rusch: Brandmodellierung und Sprinkleranlagen, Brandschutz, s+s report 4 / 2007.
- [20] H. J. Gerhardt: Wind- und Temperatureinflüsse bei der Planung von Entrauchungseinrichtungen
- [21] DIN 18232-2 06/03: Rauch- und Wärmefreihaltung – Teil 2: Natürliche Rauchabzugsanlagen (NRA) – Bemessung, Anforderungen und Einbau; Berlin Beuth-Verlag 2003.
- [22] DIN 18232-5 04/03: Rauch- und Wärmefreihaltung – Teil 5: Maschinelle Rauchabzugsanlagen (MRA) – Anforderungen, Bemessung; Berlin Beuth-Verlag 2003.

Herausgeber:

**SSI, Schweizerische Vereinigung
unabhängiger Sicherheits-
ingenieure und -berater**

Güstrasse 46
8700 Küsnacht
Telefon 044 910 73 06
Telefax 044 910 73 96
Internet: www.ssi-ch.info
E-Mail: ssi@mediasec.ch

Autoren:

Jörg Kasburg (Redaktionsleitung),

dipl. Bauing. TU, Projektleiter
Brandschutz, Entrauchung bei
der Gruner AG, Basel,
joerg.kasburg@gruner.ch,
061 317 64 42

Kurt Bucher, dipl. Bauing. ETH, Master
of Science Imperial College London,
Senior-Projektleiter bei der Ernst Basler
+ Partner AG, Zollikon,
kurt.bucher@ebp.ch, 044 395 11 11

Ronald Eng, Dr. rer. nat., Projektleiter

Sicherheit bei der Gruner AG, Basel,
ronald.eng@gruner.ch,
061 317 64 21

Lars Mülli, dipl. Bauing. ETH,
NDK Risiko und Sicherheit,
Brandschutzfachmann CFPÄ, Leiter
Abteilung Brandschutz, Entrauchung
bei der Gruner AG, Basel,
lars.muelli@gruner.ch,
061 317 61 61

