

Nutzung von Heißrauchgeneratoren bei der Beurteilung von Verrauchung und Entrauchungsmaßnahmen in bestehenden Gebäuden

Zur Beurteilung von Verrauchungsvorgängen im Brandfall oder der Wirksamkeit geplanter Entrauchungssysteme in neu erbauten oder umstrukturierten bestehenden Sonderbauten werden zunehmend - als Ersatz für reale Brandversuche - Rauchversuche mit sogenannten 'Rauchmaschinen' durchgeführt. Diese Maschinen produzieren einen vergleichsweise kalten Rauch, der auch bei Kombination mit einem kleinen Poolbrand erheblich kühler als die Brandgase eines 'echten' Feuers ist. I.d.R. uninterpretiert werden die Testergebnisse auf die Wirkungsweise im real anzunehmenden Schadensfall übertragen, obwohl phänomenologisch die Unterschiede im Einmischungsverhalten in den Feuerplume und damit hinsichtlich der Rauchproduktion durchaus bekannt sind.

Ziel der Forschungsarbeit war es, den Einsatz von Rauchmaschinen zur Beurteilung der Verrauchung oder Entrauchung größerer Gebäude hinsichtlich der Übertragung der Verrauchungsergebnisse auf den thermisch ganz anders gelagerten Brandfall kritisch zu hinterfragen. Es sollte versucht werden, Gesetzmäßigkeiten für diese Abbildung zweier voneinander abweichender Brandszenarien innerhalb derselben Raumgeometrie zu finden, die Hilfestellung geben können, Ergebnisse von durchgeführten Rauchversuchen in Richtung veränderter Quellterme zu interpretieren sowie - andersherum - zu einem anzunehmenden Brandereignis passende Rauchversuche durchzuführen.

Nach einer eingehenden Untersuchung zum 'Rauch'ausstoß der im Hause der MFPA Leipzig e.V. verfügbaren Nebelmaschinen ist die Verrauchung einer großen Halle - sowohl experimentell als auch theoretisch - erforscht worden. Entsprechend gliedert sich diese Arbeit in vier nahezu selbständige Abschnitte.

Nach einem Vorspann zu den theoretischen Grundlagen werden im ersten Teil der Arbeit die drei Verdampfer-Nebelmaschinen hinsichtlich ihres Ausstoßes eines Wasserdampf-Paraffin-Nebels charakterisiert: Temperatur, Geschwindigkeit, Kegelgeometrie, Transmissionsgrad. Dazu wurden die Volumen- und Massenströme sowie Extinktionskoeffizienten des sich trübenden Nebels - in Abhängigkeit von der Einmischungsweglänge - ermittelt.

Im zweiten Teil der Arbeit wurden mit zweien der oben näher betrachteten Nebelmaschinen Rauchversuche - unterstützt durch ein Poolfeuer - in einer 10 m hohen, 40 m mal 100 m großen Halle durchgeführt. Diese Versuche wurden ergänzt durch Vergleichsversuche mit denselben Poolbränden, jedoch ohne Einsatz einer Rauchmaschine. Auch die Pool-Brandgüter (Isopropanol, Methanol, Benzin) sowie die Poolgröße (von 0,04 m² bis 0,135 m²) wurden variiert.

Im Ergebnis der Analysen konnten spezifische Abbranddaten (flächenspezifische Pyrolyse- und Energiefreisetzungsraten) für die Poolbrände gewonnen werden. Aus einer Zuordnung der gemessenen Transmissionswerte zu den chemischen Umsetzungsprozessen des Poolfeuers konnten dann Rauchpotentiale der 'kombinierten Brandgüter' (Rauchmaschinen-Nebel und Pool-Brandgut) abgeleitet werden.

Der dritte Teil der Arbeit befaßt sich - ganz hypothetisch - mit einer Parameterstudie zu den Quelltermen von Energie und Rauch sowie den sichtrübenden Eigenschaften der Rauchteilchen. Mit Faktor 10 wurden jeweils einzelne dieser Parameter erhöht oder vermindert und als Eingabegrößen für Vergleichsrechnungen zu einer Halle mit o.g. Abmessungen mit dem gut verifizierten Zonenmodell FIGARO genutzt.

Die Berechnungsergebnisse wurden hinsichtlich vierer markanter Größen miteinander verglichen: Verlauf der Rauchgas-Frischluft-Grenze, Temperatur(-erhöhung) im Rauchgas, Rauchpartikelbeladung des Rauchgases, Sichtweiten im Rauchgas. Schon hier fiel eine umgekehrt proportionale Zuordnung zwischen der Änderung von vorgegebenem Rauchpotential und berechneter Sichtweite und eine proportionale Zuordnung zwischen der Änderung von Rauchfreisetzungsrates und Rauchpartikelbeladung auf - sofern die Energiefreisetzungsrates unverändert blieb.

Änderungen hinsichtlich der vorgegebenen Energiefreisetzungsrates beeinflussten sowohl die ermittelten Heißgas-Temperaturerhöhungen als auch die Sichtweiten und Rauchpartikelbeladungen. Es zeigt sich ein Einfluß auf die zeitliche Entwicklung der Verrauchung. In Abhängigkeit von der Änderung der Energiefreisetzungsrates tritt ein *Zeitfaktor* (Zeitdilatation, Zeitkontraktion) in Wirkung, der die zeitlichen Abläufe bei der 'Auffüllung' der Halle mit Rauchgas *rafft oder streckt* - wobei die ermittelten Zahlenwerte zu Temperaturerhöhung, Sichtweite und Rauchpartikelbeladung *auch nur* um einen (jeweils unterschiedlichen), aber über Raum und Zeit *konstanten* Faktor zu *skalieren* sind.

Die Feststellung eines Zeitfaktors führte zu den seit etwa '95 von W.K. Chow publizierten Theorien der 'time constants', die im Produkt aus einem den Brand charakterisierenden Faktor und einem die Halle charakterisierenden Faktor bestehen und das zeitabhängige Auffüllverhalten als Funktion $\frac{H_L}{H} = f\left(\frac{t}{\tau}\right)$ beschreiben.

Der Bezug auf ein weiteres Plumemodell von Zukoski /6/,/7/, das auch im oben genutzten Zonenmodell FIGARO schon gute Dienste leistet, führte dann zur analogen Definition einer weiteren Zeitkonstanten, die im Vergleich mit den drei von Chow benannten Zeitkonstanten zwischen der von Chow präferierten und einer empirisch begründeten Konstanten liegt.

Im vierten Teil der Arbeit werden zu den Zeitkonstanten - unter Vorgabe skaliertes Quellterme (Energiefreisetzung, Pyrolyserate bzw. Heizwert, Rauchpartikelmassenanteil am Brandgut und der spezifische Absorptionsfläche) für eine gegebene Halle die Änderungen hinsichtlich der vier Verrauchungsgrößen 1. Verlauf der Rauchgas-Frischluft-Grenze, 2. Temperaturerhöhung im Rauchgas, 3. Rauchpartikelbeladung des Rauchgases und 4. Sichtweiten im Rauchgas theoretisch abgeleitet und damit *Abbildungsgesetze für die Verrauchung großer Hallen bei Skalierung der Brandquellterme* begründet.

Einleitung und Legitimation

Zwecks Bewertung der Wirksamkeit von Entrauchungssystemen in neu erbauten oder umstrukturierten bestehenden Sonderbauten (z.B. Großmarkthallen, Atrien) werden zunehmend - anstelle von realen Brandversuchen - Rauchversuche mit sogenannten 'Rauchmaschinen' durchgeführt. Diese Maschinen produzieren einen vergleichsweise kalten, eher hellen und kaum aggressiven Rauch, so daß dem jeweiligen Gebäude mit seinen baulichen Strukturen

und den i.d.R. schon vorhandenen Installationen und Einbauten durch die durchgeführten Versuche weder thermische noch chemisch-korrosive Schädigungen entstehen.

Um in etwa ein brandgerechtes Auftriebsverhalten dieser eher kühleren Rauchgase zu erhalten, wird dem Rauch aus der Rauchmaschine gelegentlich zusätzlich Heißgas aus einem kleinen Poolbrand zugeführt. Dazu wird der Rauchmaschinenrauch in den Feuerplume eines Poolfeuers mit einer nur schwach rauchenden, brennbaren Flüssigkeit (z.B. Isopropanol, Benzin, Ethanol, Methanol) eingeblasen. Dieses Verfahren findet international zunehmend Anwendung (Australien, Großbritannien /1/) und wurde auch von der MFPA Leipzig e.V. schon mehrfach herangezogen.

Obwohl durch die Poolbrände eine Erwärmung der Rauchgase erfolgt, ist der erzeugte Rauch doch - im Vergleich zu echten Brandgasen - deutlich kühler. Die am Brandherd entstehenden primären Rauchgasmassen sind vergleichsweise klein. Das Einmischungsverhalten von Frischluft in den Feuerplume - das aufgrund von Dichteunterschieden und daraus resultierend durch Auftrieb, Geschwindigkeit, Turbulenzen, Einmischungskegel bestimmt wird - geschieht hier völlig abweichend gegenüber dem Einmischungsverhalten bei einem wirklichen Brand.

Diese Unterschiede sind phänomenologisch zwar bekannt - gerade bei komplexen und hohen Gebäudegeometrien wird immer wieder auch auf die unterschiedlichen Erfordernisse zur Rauchabsaugung bei Schwelbränden gegenüber Vollbränden hingewiesen /2/,/3/,/4/ - dennoch werden immer wieder Testergebnisse aus Rauchversuchen ohne weitergehende Interpretation und Extrapolation auf real anzunehmende Brandsituationen übertragen.

Zielsetzung

Ziel der Forschungsarbeit ist die

- Ermittlung charakteristischer Größen zur Rauchproduktion für die in der MFPA Leipzig e.V. eingesetzten Rauchmaschinen sowie eventuell auch der Rauchmaschinen-Konfigurationen mit Poolbränden
- theoretische (gegebenenfalls auch experimentelle) Untersuchung des Verrauchungsverhaltens großer Hallen durch Einsatz kühlen bis lauwarmen Rauches (Rauchmaschine + Poolfeuer) im Vergleich zu der zu erwartenden Verrauchung dieser Hallen bei großmaßstäblichen Bränden mit der in *diesem* Falle anzunehmenden Heißgasproduktion - mit
- Entwicklung von Hilfestellungen für einen sinnvollen Rauchmaschinen-Einsatz (z.B. Rauchmaschinen-Konfiguration mit Poolbränden) bei Rauchversuchen mit einer Rauchmaschine und
- Entwicklung von Interpretationsregeln für die Bewertung und Übertragung der Versuchsergebnisse von mit Rauchmaschinen durchgeführten Versuchen auf Verrauchungsauswirkungen bei Bränden mit höherskalierten Freisetzungsraten.

Auszüge aus den Untersuchungsergebnissen

Teil 1: Die Rauchmaschinen und ihre Einsatzweise

Die MFPA Leipzig e.V. verfügt über drei sogenannte 'Rauchmaschinen', richtiger 'Verdampfer-Nebelmaschinen', deren bestimmungsgemäßer Einsatzort Diskotheken und Theater sind. Die Maschinen und die zugehörigen Verdampfungsflüssigkeiten werden kommerziell vertrieben; damit unterliegen weitergehende Informationen über Funktionsweise

und Fluid-Zusammensetzung gewissen Geheimhaltungsbestrebungen. Im wesentlichen wird ein Paraffin-Wassergemisch verdampft, wobei vermutlich die Paraffinteilchen als Kondensationskeime zur Bildung kleinster (als weißer Nebel sichtbarer) Tröpfchen aus dem gasförmigen (unsichtbaren) Wasserdampf dienen. Damit kann dem Paraffin auch die Eigenschaft zur Steuerung der Nebelstabilität zugeschrieben werden /9/.

"Paraffin ist ein festes oder flüssiges Gemisch gereinigter Kohlenwasserstoffe. Es ist geruchs-, farb- und geschmacklos und wird hauptsächlich verwendet bei der Herstellung von Salben und Cremes, Kerzen, Holz- und Metallpflegemitteln, Linoleum, Obst- und Käsewachsen sowie im Paraffinöl als Schmiermittel in der Feinmechanik." (aus /5/)

Mittels einer Pumpe wird das Nebelfluid in einer Rohrwendel durch einen 'Heizblock' getrieben und durch eine Düse aus dem Gerät geblasen. Der Ausstoß läßt sich zumeist (ferngesteuert) regeln.

Es wurden Messungen zu den Kenngrößen der drei Rauchmaschinen (Ausblasöffnung, -geschwindigkeit, -temperatur) unter Verwendung von 'Super-Fog' durchgeführt. Die Messungen zu Geschwindigkeit und Temperatur wurden z.T. direkt vor der Ausblasöffnung, z.T. mit einer direkt auf die Öffnung dicht aufgesetzten Rohrhülse, sowie ohne Rohrhülse im variierten Abstand von 1 m und 2 m Entfernung zur Ausblasöffnung durchgeführt. Hieraus lassen sich die direkt ausgestoßenen sowie die durch weitere Einmischungen mit zunehmender Entfernung vergrößerten Volumen- und Massenströme ermitteln.

Parallel zu Temperatur und Geschwindigkeit wurde in größerer Entfernung von der Austrittsöffnung auch der Transmissionsgrad gemessen. Unter Beachtung der Rauchkegel-Geometrie (Meßstrecke, zusätzliche Verdünnung durch Aufweitung des Querschnittes) wird damit eine Beschreibung der optischen Eigenschaften des Rauches möglich. Die für Verdampfermaschine und Nebelfluid charakteristischen Daten sind dem Forschungsbericht zu entnehmen.

Auf der Grundlage dieser Meßwerte lassen sich die ausgeblasenen Volumen- und Massenströme sowie die optischen Eigenschaften des Rauches in etwa abschätzen. Mit zunehmender Entfernung von der Ausblasöffnung nehmen die Extinktionskoeffizienten deutlich ab, obwohl durch die Transmissionsmeßstrecke jeweils der gesamte Rauchkegel erfaßt wird. Da sich jedoch der Rauchkegel *zweidimensional* aufweitet (bei gleicher Breite des analysierenden parallelen Lichtbündels), *müssen* diese Werte mit zunehmendem Abstand von der Ausblasöffnung kleiner werden.

Bei rechnerischer Überprüfung dieser Werte zeigt sich dennoch, daß über eine Einmischungswirkung hinaus eine Abnahme sichttrübender Wirkung zu verzeichnen ist, die sich nur auf den Zerfall von sichtbeeinträchtigenden Teilchen zurückführen läßt.

Das Phänomen einer unbefriedigenden, rasch abnehmenden sichttrübenden Wirkung zeigt sich nicht nur mit zunehmender (größerer) Entfernung von der Ausblasöffnung, sondern auch bei Einsatz der Rauchmaschinen in Verbindung mit Poolbränden. An sich sollte doch in diesen Fällen wegen der zusätzlichen Einmischung weiterer Rauchpartikel aus dem Poolfeuer von einer verstärkt sichttrübenden Wirkung ausgegangen werden dürfen.

Zu vermuten ist, daß der chemische Zerfall/Abbau der sichtbeeinträchtigenden 'Rauch'partikel nicht nur in Abhängigkeit von der Zeit, sondern auch - sehr sensibel - in Abhängigkeit von der Gastemperatur (mit zunehmender Gastemperatur erheblich beschleunigt) vonstatten geht.

Resumierend aus diesem niederschmetternden Ergebnis kann abgeleitet werden,

- daß neben einem Poolfeuer der Einsatz einer solchen Rauchmaschine entbehrlich scheint
- daß Verbesserungen beim Einsatz von Rauchmaschinen an der Entwicklung temperaturbeständigerer Nebelfluide und Erhöhung der Heizleistung der Rauchmaschine ansetzen müßten.

Teil 2: Poolbrandversuche in einer großen Halle - mit und ohne Rauchmaschinenunterstützung

Nur einmal innerhalb des Beantragungszeitraumes für dieses Forschungsvorhaben ergab sich wegen eines geplanten Gebäudeabrisses die Möglichkeit, in einer größeren Halle Rauchversuche durchführen zu können. Der Zeitraum zwischen Bekanntgabe und Versuchsdurchführung betrug nur wenige Tage; daher konnte die Vorbereitung der Versuche und die meßtechnische Ausgestaltung der Halle nur mit einigen Einschränkungen erfolgen.

Die Halle hatte eine Grundfläche von etwa 40 m x 100 m; die Höhe betrug 10 m, wobei auf 8 m Höhe in Längsachse der Halle eine begehbare Kranbahn verlief, an die u.a. Rauchmelder, ein Geschwindigkeitsmeßgerät, ein Gasanalysator (CO₂), ein Rauchdichtemeßgerät (Fa. Sick) und Thermoelemente - zentral über dem Brandherd - angebracht wurden. Weitere Thermoelemente - jeweils im Meterabstand - erlaubten die Messung der Plumeachsenteperatur über der Plumehöhe. Zwei Meter über dem Brandherd wurde außerdem noch einmal die Heißgas-Geschwindigkeit im Bereich der Plumeachse gemessen.

Auf halber Hallenhöhe (von 5 m bis 8 m) befanden sich an den Längsseiten der Halle Fensterbänder, deren Fenster sich nur bedingt öffnen ließen. Diese Fenster wurden - zur Vermeidung von Windeinflüssen - weniger *während* der Versuche als - zur Bereinigung der Hallenluft - *zwischen* den einzelnen Versuchen geöffnet. Die Deckenträger waren bzgl. der Hallenachse quer verlaufend alle 5 m und etwa 80 cm stark. An den Längsseiten befanden sich in 4,5 m Höhe etwa 5 m breite Galerien, die z.T. unterbaut waren.

Tabelle 1: Parametervariation beim Versuchsprogramm 'Messehalle 5'

Versuch	Brandgut	Poolfläche [m ²]	Volumen Brandgut [l]	Branddauer [Min:Sek]	Rauchmaschine	Auslösung Rauchmelder Voralarm Alarm	
V1	Isopropano l	0,2 x 0,2	0,4	7:16	RM2 Spaceball	- -	
V2, V22, V23				7:00 - 7:20	RM3 Enterprise	1:02 -	
V5		0,3 x 0,3	1,0	7:38	-	- -	
V6	7:00			RM3 Enterprise	0:42 0:57		
V3	Methanol			8:10	-	- -	
V4				7:45	RM3 Enterprise	0:33 0:40	
V16	Benzin			6:20	-	1:11 1:26	
V12	Isopropano l			0,3 x 0,45	2,0	9:00	-
V11	Methanol	11:30	- -				
V17	Benzin	8:00	0:41 1:03				
V7	Isopropano l	0,4 x 1,2	5,0	5:20	-	0:56 1:30	
V8				6:00	RM3 Enterprise	0:51 1:18	
V9				Methanol	9:00	-	- -
V10					8:20	RM3 Enterprise	- -

Tabelle 2: Mittlere Abbranddaten zum Versuchsprogramm 'Messehalle 5'

Für die Rauchentstehung und Beurteilung der Rauchfreisetzung sind diese

Versuch	Brandgut	ρ [kg/l]	H_u [kJ/g]	E_{ges} [MJ]	dM/dt [g/s]	dE/dt [kW]	dm/dt [g/m ² s]	dq/dt [MW/m ²]
V1	Isopropanol	0,786	32,0	10,1	0,72	23,1	18,0	0,577
V2, V22, V23					0,71-0,75	22,9-23,9	18,3	0,57-0,6
V5				25,2	1,72	54,9	19,0	0,61
V6				1,87	59,9	20,8	0,67	
V3	Methanol	0,794	20,0	15,9	1,62	32,7	18,3	0,36
V4					1,71	34,2	19,0	0,38
V16	Benzin	0,740	44,7	33,1	1,95	87,0	21,6	0,97
V12	Isopropanol	0,786	32,0	50,3	2,91	93,15	21,7	0,69
V11	Methanol	0,794	20,0	31,8	2,3	46,0	17,0	0,34
V17	Benzin	0,740	44,7	66,2	3,08	137,8	22,8	1,02
V7	Isopropanol	0,786	32,0	125,8	12,3	393,0	25,6	0,82
V8					10,9	350,3	22,7	0,73
V9	Methanol	0,794	20,0	79,4	7,4	147,0	15,3	0,31
V10					7,9	158,8	16,5	0,33

raumgeometrischen und ventilationsgegebenen Bedingungen jedoch vergleichsweise unerheblich, da die Sauerstoffversorgung bei allen Versuchen als ausreichend angesehen werden darf und da die Meßstrecke direkt über dem Brandherd angesiedelt war. Auch bzgl. einer möglichen rechnerischen Nachbildung dieser Rauchversuche sind diese Randbedingungen wenig bedeutsam, da die Verrauchung der Halle in ihren gesamten Ausdehnung in der Kürze der Vorbereitungszeit nicht meßtechnisch dokumentiert werden konnte.

Tabelle 2 gibt die zugehörigen Heizwerte, Brandenergien, mittleren Energiefreisetzungs- und Abbrandraten wieder. Tabelle 1 ist zu entnehmen, daß jeweils vier Versuchspaare die Variation von Poolbränden *mit* und *ohne* Rauchmaschine bei sonst gleichbleibender Parameter-Vorgabe aufweisen (doppelt gerändert).

Die für die einzelnen Brandgüter und Poolgrößen ermittelten flächenspezifischen Abbrand- und Energiefreisetzungsdaten werden nur teilweise durch Angaben aus der Literatur bestätigt: Während die Meßwerte zum Abbrandverhalten von Methanol mit dem Literaturwert von 17 g/m²s gut übereinstimmen, kann der Literaturwert von 48 g/m²s für Benzin durch die Versuche (mit einer Abweichung von mehr als 'Faktor 2') nicht belegt werden.

Es zeigen sich erheblichen Unterschiede im Brand- und Rauchverhalten der drei betrachteten Pool-Brandgüter: Bei ähnlicher Pyrolyserate verbrennt Benzin mit einer relativ hohen Energie- und Rauchfreisetzung, Methanol bei geringer Energiefreisetzung fast ohne Rauchbildung, während Isopropanol zwischen diesen beiden liegende Werte liefert.

In einer aufwendigen Auswertung zu den gebildeten Massenströmen von chemischen Komponenten und von Reingas, zu den Einmischungen und Volumenströmen in Abhängigkeit von der Höhe usw. konnten näherungsweise Rauchpotentiale abgeleitet werden. Damit wurde der

mit dem Extinktionskoeffizienten erfaßte Rauch - von Poolfeuer *sowie gegebenenfalls auch* von der Rauchmaschine - zunächst ausschließlich der Abbrandrate aus dem Lachenbrand zugeordnet. Bild 1 zeigt die Bandbreite der auf diesem Weg berechneten Rauchpotentiale bezüglich der einzelnen Brandgüter.

Vergleichbar hinsichtlich der Pyrolyse- und damit Energiefreisetzungsrate bei Variation des Parameters Rauchmaschine sind hierbei die besonders gekennzeichneten Versuche V9 und V10 mit Methanol und die Versuche V7 und V8 mit Isopropanol, wobei die doppelte Säulendarstellung zu einzelnen Versuchen durch zwei unterschiedliche Auswerteverfahren zustande gekommen ist. Werte aus der Literatur weisen übrigens für Isopropanol einen Rauchentstehungsanteil von 0,015 g/g auf, was bei dem ermittelten (im Mittel) Rauchpotential von 0,132 m²/g einer spezifischen Absorptionsfläche von realistischen 8,8 m²/g entsprechen würde.

Es zeigt sich hier, daß ein Einfluß aus der Rauchproduktion der Rauchmaschine - so ohne weiteres - *nicht* abgelesen werden kann (insbesondere für die Isopropanolbrände). Nach diesen Ergebnissen scheint der *zusätzliche* Einsatz einer Rauchmaschine zu einem Poolbrand *entbehrlich!*

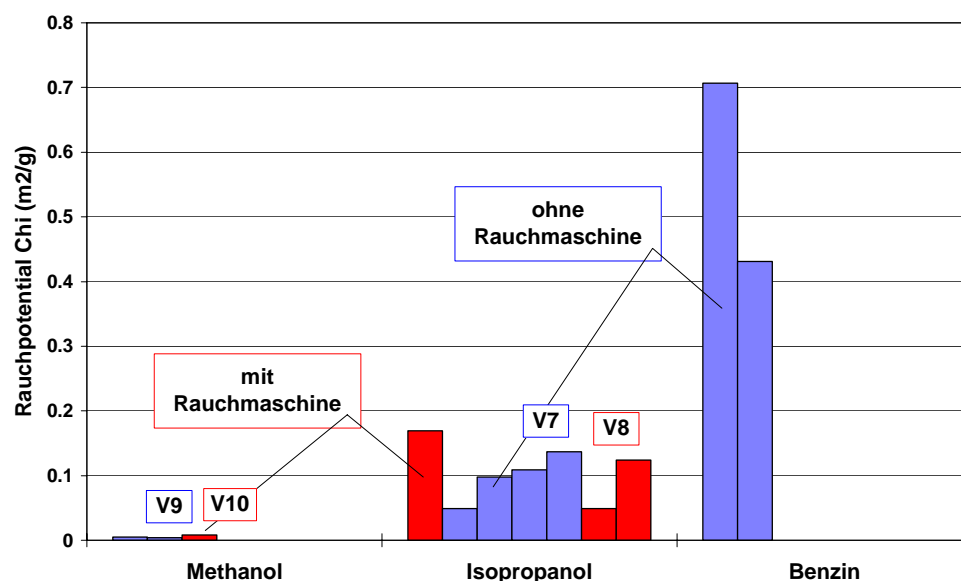


Bild 1: Berechnete Rauchpotentiale χ für Methanol, Isopropanol und Benzin - zum Versuchsprogramm "Messehalle 5"

Teil 3: Parameterstudie zur Hallenverrauchung mit Hilfe eines Zonenmodells

Die Verteilung und sichtrübende Wirkung von Rauch läßt sich bzgl. vorzugebender Brandkenngrößen an

- der Größe der Brandes (Energiefreisetzungsrate bzw. Abbrandrate)
- der Rauchmassen-Entstehungsrate (Rauchentstehungsanteil an der Abbrandrate) und
- der sichtrübenden Wirkung (Rauchpotential) des Rauches

festmachen. Tatsächlich aber bestimmen auch räumliche Gegebenheiten wie die Raumhöhe oder der Brandherd-Durchmesser die Einmischungen in die Primärgase und damit die

sekundär freiwerdenden Rauchgasmassen. Die Sichtverhältnisse in einer Halle werden nicht alleine durch das Rauchpotential gegeben, sondern sind Ausdruck von Verdünnungen, Schichtungshöhen, die wiederum von den Temperaturfeldern und damit von der Energiefreisetzungsrate bestimmt werden.

Unter Einsatz eines Zonenmodells (FIGARO /6/,/7/,/8/) und eines Feldmodells (KOBRA 3-D /9/) wurden die in Tabelle 3 aufgelisteten Simulationsrechnungen für die oben beschriebene Halle durchgeführt und der zeitliche Verlauf sowie die Werte von Temperaturerhöhung, Rauchpartikelbeladung und Sichtweite mit der Bezugsvariante 1 und untereinander verglichen. Es liegt auf der Hand, daß die erreichten **Temperaturen** die **Energiefreisetzung**, die **Rauchpartikelbeladung** die **Rauchpartikelfreisetzung** und die **Sichtweiten** die **Rauchpotentiale** widerspiegeln. Insgesamt sind von den in Tabelle 3 aufgeführten sechs Eingabegrößen nur vier voneinander unabhängig.

Tabelle 3: Parametervariation zu den Simulationsrechnungen

	Energie	Rauchpartikel	Heizwert	Rauchpart.- freis.anteil	Rauch- potential	spez. Absorp- tionsfläche
Variante 1	$\dot{E} = 370 \text{ kW}$	$M_R = \frac{\dot{E}}{H_u} \cdot Y_R$	$H_u = 32 \text{ kJ/g}$	$Y_R = 0,015 \text{ g/g}$	$\chi = K \cdot Y_R$	$K = 8,8 \text{ m}^2/\text{g}$
	$F_E = \dot{E}_2 / \dot{E}_1$	F_M	F_H	F_Y	F_χ	F_K
Variante 1	1	1	1	1	1	1
Variante 2a	1	10	1	10	1	1/10
Variante 2b	1	1/10	1	1/10	1	10
Variante 3a	1	1	1	1	10	10
Variante 3b	1	1	1	1	1/10	1/10
Variante 4a	10	1	1	1/10	1	10
Variante 4b	1/10	1	1	10	1	1/10
Variante 5a	10	1	1	1/10	1/10	1
Variante 5b	1/10	1	1	10	10	1
Variante 6a	10	10	1	1	1/10	1/10
Variante 6b	1/10	1/10	1	1	10	10

Es zeigt sich, daß die zeitliche Entwicklung von der Variation der Energiefreisetzungsrates bestimmt wird und daß - unter Berücksichtigung der Zeitkontraktion bzw. -dilatation - die ermittelten Zahlenwerte zusammengehöriger Zeitpunkte zu Temperaturerhöhung, Sichtweite und Rauchpartikelbeladung nur um einen (jeweils unterschiedlichen), aber konstanten Faktor zu multiplizieren sind. Ohne Änderung der Energiefreisetzungsrates ergeben sich proportionale Veränderungen von Rauchpartikelbeladung mit Änderung der Rauchpartikelfreisetzung bzw. umgekehrt-proportionale Veränderungen von Sichtweite mit Änderung der spezifischen Absorptionsfläche.

Teil 4: Zeitkonstanten nach Chow und Ableitung von Abbildungsgesetzen

Wie einleitend unter Teil 3 gesagt, ist die Verrauchung einer Halle nicht nur durch die Freisetzung von Rauchpartikeln, deren optischen Eigenschaften und die Freisetzung von Energie gekennzeichnet, sondern ebenfalls durch die Gegebenheiten der Halle bestimmt. Unter Annahme einiger Vereinfachungen (Idealisierung einer über die gesamte Hallenausdehnung homogenen Rauchsicht, Einmischungen zur Heißgaserzeugung nur im Plumbereich und nur bis zur Höhe der Heißgassicht, kein konvektiver Energietransfer zu den Umfassungsbauwerken usw.) zeigte W.K.Chow, daß ausgehend von Plummmodellen das zeitliche Auffüllverhalten der Halle mit Rauch durch eine einfache Gleichung beschrieben werden kann, die i.d.R. die Gestalt

$$\frac{H_L(t)}{H} = \left(1 + \frac{t}{\tau}\right)^{-a} \quad \text{mit} \quad \tau = F_{Brand} \cdot F_{Halle} \quad (1)$$

annimmt (/10/,/11/,/12/).

Den von Chow präsentierten Zeitkonstanten wird hier eine weitere, abgeleitet aus dem im Zonenmodell FIGARO verwendeten Zukoski-Plummmodell hergeleitete Zeitkonstante gegenübergestellt (s. auch /13/). Als Zwischenergebnis wird ein theoretischer Zusammenhang zwischen Heißgastemperaturerhöhung in Abhängigkeit von Energiefreisetzung und Hallenfüllstand und ein weiterer Zusammenhang zwischen mittlerer Heißgastemperaturerhöhung und achsenverlaufender Plumetemperaturerhöhung abgeleitet.

Als Ausgangspunkt für die Ableitung der Abbildungsgesetze gilt: Ein vergleichbarer Verrauchungszustand in der Halle für zwei verschiedene Brandszenarien (identische linke Seite von Gl.1) ist nach Gl.1 für gleiche Quotienten aus Zeitpunkt und Zeitkonstanten erreicht. Damit steht der Quotient aus den beiden Zeitkonstanten der zwei Szenarien für den Zeitveränderungsfaktor bei der Abbildung des einen Szenarios auf das andere /14/.

Unter Berücksichtigung dieser zeitlichen Beziehung und der Plumetemperaturänderung mit veränderten Quelltermvorgaben lassen sich die Tabelle 4 zusammengefaßten Abbildungsgesetze ableiten /15/.

Tabelle 4: Abbildungsgesetze zur Verrauchung großer Hallen (Tabelle aus /15/)

Abbildungsgesetze		Eingehende Maßstäbe	
Zeitabläufe	$t^* = F_E^a \cdot F_\rho^b \cdot t$	Energiefreisetzungsrates	$F_E = \dot{E}^* / \dot{E}$
Temperaturerhöhung im Heißgas	$\Delta T^* = F_E^{2/3} \cdot \Delta T$	Heizwert	$F_H = H^* / H$
Rauchpartikelbeladung im Heißgas	$B^* = \frac{F_Y}{F_H} \cdot F_E^{2/3} \cdot B$	Rauchpartikelanteil	$F_Y = Y^* / Y$
Sichtweite im Heißgas	$S^* = \frac{1}{F_K} \cdot \frac{F_H}{F_Y} \cdot F_E^{-2/3} \cdot S$	spezifische Absorptionsfläche der Rauchpartikel	$F_K = K^* / K$

Literatur

- /1/ Mayhew-Smith, Alex: *Business as usual*. in Fire Prevention 301 July/August 1997, S.20-23, 1997.
- /2/ Kunze, Christoph: *Neue Erkenntnisse bei der Entrauchung von Atrien*. in Vorbeugender Brandschutz, Deutsche Feuerwehrzeitung 8/1995, S.520-522, 1995.
- /3/ Butcher, Gordon; Parnell, Alan C.: *Smoke Temperatures for Smoke Control Design*. in Fire Safety Engineering No.?, S.21-23, ?.
- /4/ Schoonbaert, L.: *La sécurité incendie dans les immeubles à atrium pas de feu sans fumée*. in ANPI magazine No. 127, Octobre 1995, S.46-53, 1995.
- /5/ Preuschoff, Olaf: *Hans, mach Dampf!* in Feuerwehr 5/97, S.44-47, 1997.
- /6/ Heins, Thomas: *Simulationsmodell zur sicherheitstechnischen Beurteilung der Rauchausbreitung bei Bränden in ausgedehnten Räumen*. Dissertation TU Braunschweig, Braunschweig, 1991.
- /7/ Heins, Th.; Kordina, K.: Untersuchungen über die Brand- und Rauchentwicklung in unterirdischen Verkehrsanlagen - Katastrophenschutz in Verkehrstunneln. Auftrag des Bundesministers für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau, Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz, TU Braunschweig, 1990
- /8/ Steinert, C.: *Messung und Simulation von Fahrzeugbränden in Tunneln*. Dissertation TU Braunschweig, Verlag Papierflieger, Clausthal-Zellerfeld, ISBN 3-932243-26-9, 1997.
- /9/ KOBRA-3D Referenzhandbuch und Benutzerhandbuch (+ Addendum Version 3.3.). Integrierte SicherheitsTechnik GmbH, Frankfurt, 1995 (1996).
- /10/ Chow, W.K.: *Simulation of Car Park Fires Using Zone Models*. Journal of Fire Protection Engineering, 7(2) 1995, p.65-74, 1995.
- /11/ Chow, W.K.: *On the Use of Time Constants for Specifying the Smoke Filling Process in Atrium Halls*. Fire Safety Journal 28 (1997), p.165-177, 1997.
- /12/ Chow, W.K.: *Use of a Time Constant for Designing a Smoke Control System in Car Parks*. Journal of Fire Sciences, Vol. 13, Sept-Oct 1995, p.357-377, 1995.
- /13/ Steinert, C.: *Die Zeitkonstanten nach W.K. Chow - ein Beitrag zur Beurteilung der Verrauchung von Hallen im Brandfall*. vfdb 3/99, 1999.
- /14/ Steinert, C.: *Skalierung von Bränden - Teil I: Quellterme*. vfdb 3/99, 1999.
- /15/ Steinert, C.: Ein Diskussionsbeitrag zum Thema 'Entrauchung von Hallen', vfdb 4/99, 1999.

Forschungsbericht: abgeschlossen Februar 1999, 120 Seiten, ISBN-Nr. 3-8167-5445-7

Förderer: SMWK (Sächsisches Ministerium für Wissenschaft und Kunst)

Ausführende Stelle: MFPA Leipzig e.V. (Materialforschungs- und Prüfungsanstalt für das Bauwesen Leipzig e.V.)