

KALIBRIERTE RAUCHVERSUCHE ZUR REALISTISCHEN PRÜFUNG VON ENTRAUCHUNGSKONZEPTEN

Udo Kirchner
Halfkann + Kirchner, Erkelenz

EINLEITUNG

Brandschutzkonzepte für komplexe Sonderbauten basieren häufig auf differenzierten Maßnahmen für den Rauch- und Wärmeabzug, die objektspezifisch für die jeweilige Gebäudegeometrie und maßgebenden Brandszenarien in Anwendung von Computer-Simulationsverfahren entwickelt werden. Insbesondere wenn diese Entrauchungsmaßnahmen über das Schutzziel der „Durchführung wirksamer Löschmaßnahmen“ hinausgehend, auch das Schutzziel „Sicherstellung der Flucht- und Rettungswege“ betreffen, müssen an die Qualität und Zuverlässigkeit der Planung, aber auch der dementsprechenden baulichen Umsetzung höchste Anforderungen gestellt werden. Die zumeist mit solchen Sonderlösungen zum Rauch- und Wärmeabzug beanspruchten Abweichungen können verantwortlich nur dann gewährt werden, wenn die durch die Maßnahmen prognostizierte Wirkung auch tatsächlich (und nachweisbar) erwartet werden kann.

Dieses erfordert eine realistische Prüfung des Entrauchungskonzeptes. Dabei kommt es darauf an, dass die Prüfbedingungen den Ansätzen der rechnerischen Simulation entsprechen, um auch die Ergebnisse des Prüfversuches qualitativ wie quantitativ mit den entsprechenden Berechnungen abgleichen zu können. In diesem Sinne standen geeignete Prüfeinrichtungen in der bisherigen Praxis nicht bzw. nicht mit wirtschaftlichem Aufwand zur Verfügung oder zeigten Einschränkungen im Einsatzbereich. Es wurde daher die kalibrierte Prüfapparatur „Smoke 3“ entwickelt, über welche im folgenden Beitrag berichtet wird.

GRUNDLAGEN, HISTORISCHE ENTWICKLUNG

Die Erkenntnis, dass Nebelgeneratoren allein keine geeignete Einrichtung zur Prüfung von Maßnahmen der Rauchableitung darstellt, darf schon seit Ende der 80er Jahre als Stand der Technik beschrieben werden.

Eine gewisse Strukturierung erfolgte mit dem Leitfaden der vfdb [1] „Grundsätze für Rauchversuche in Gebäuden“, welcher Einsatzgebiete und Aussagemöglichkeiten in folgenden Stufen definierte:

- Stufe 1: Allgemeine Wertung des Strömungsverhaltens im Gebäude und Zusammenwirken der Komponenten der Rauchschutzanlage;
- Stufe 2: Qualitative Beurteilung zur Wirkungsweise natürlicher Rauch- und Wärmeabzugsanlagen und Test von maschinellen Rauchabzugsanlagen;
- Stufe 3: Quantitative Untersuchung der Wirksamkeit und experimentellen Überprüfung.

Hiernach geht die Stufe 1 bereits über die Durchführung sogenannter „Kaltrauchversuche“ hinaus, welche ausschließlich mit Nebelgeneratoren arbeiten.

Auch bei der Verwendung von erwärmter Luft als simulierte Brandquelle muss sich der Auftriebsstrahl ähnlich einem durch Konvektion entstehenden Luftstrahl verhalten, d.h. er darf nicht durch einen zusätzlichen Strömungsimpuls beeinflusst, sondern muss „voll ausgebildet turbulent“ sein. Zur Vermeidung von Fehlinterpretationen ist zu gewährleisten, dass die Rauchgase allein durch den thermischen Auftrieb zur Decke aufsteigen. Dies kann allerdings, insbesondere für den Fall einer Temperaturschichtung, beeinträchtigt werden, wenn die mit der Höhe ansteigende Umgebungstemperatur die Auftriebskräfte des Thermikstrahls egalisiert. Die Literatur definiert die sogenannte Equilibriumshöhe z_E als Koordinate, ab der die Temperaturdifferenz zwischen Auftriebsstrahl und Umgebung aufgehoben ist.

Diese Höhe ermittelt sich nach der Gleichung:

$$z_E = 0,74 Q_{konv}^{0,25} \left(\frac{\Delta T}{Y_{eff}} \right)^{-0,375}$$

Dabei ist:

z_E Equilibriumshöhe in Meter

Q_{konv} konvektive Wärmefreisetzungsrate in kW

Y_{eff} Höhendifferenz Brandfläche zur Unterkante Decke (Aufstiegshöhe) in m

ΔT Temperaturdifferenz zwischen boden- und deckennahen Bereichen in K

Die vorstehende Gleichung veranschaulicht eine Proportionalität zwischen der konvektiven Wärmefreisetzungsrate Q_{konv} und der Equilibriumshöhe z_E und bestätigt dadurch, dass die Gefahr der beschriebenen Effekte sinkt, je größer die Wärmefreisetzung der Versuchsapparatur ist.

Der Einfluss der Höhendifferenz Y_{eff} zeigt aber auch den Einfluss der Gebäudegeometrie auf die Auswahl einer geeigneten Prüfapparatur. Hieraus folgt schließlich, dass Prüfapparaturen, die für eine kleine Raumgeometrie geeignet sein können, in ausgedehnten Geometrien, wie z.B. Atrien, nur bedingt aussagefähig sind. Insoweit ist also auch eine Verknüpfung zwischen Fragestellung und Auswahl der Prüfapparatur zu berücksichtigen.

Erste, auch reproduzierbare Versuche wurden mit großflächigen Wärme-strahlern durchgeführt, die kraftstoffbefeuert wurden und somit eine Abgabe von jeweils ca. 15 KW ermöglichten. In die hier aufsteigende Strömung wurde Nebelfluid eingblasen. Beispielhaft wird in (Bild 1) ein derartiger Versuchs-aufbau gezeigt, welcher vom Unterzeichnerbüro durch die Forschungsstelle für Brandschutztechnik an der Universität Karlsruhe einer Kalibrierungsmessung unterzogen wurde.



Bild 1 Großflächenstrahler

Bei einem Brennerachsabstand von 1 m konnten Maximaltemperaturen in 2 m Höhe von 100°C ermittelt werden. Die Geschwindigkeiten betragen in 2 m Höhe etwa 2,4 m/s und in 6 m Höhe etwa 1,8 m/s.

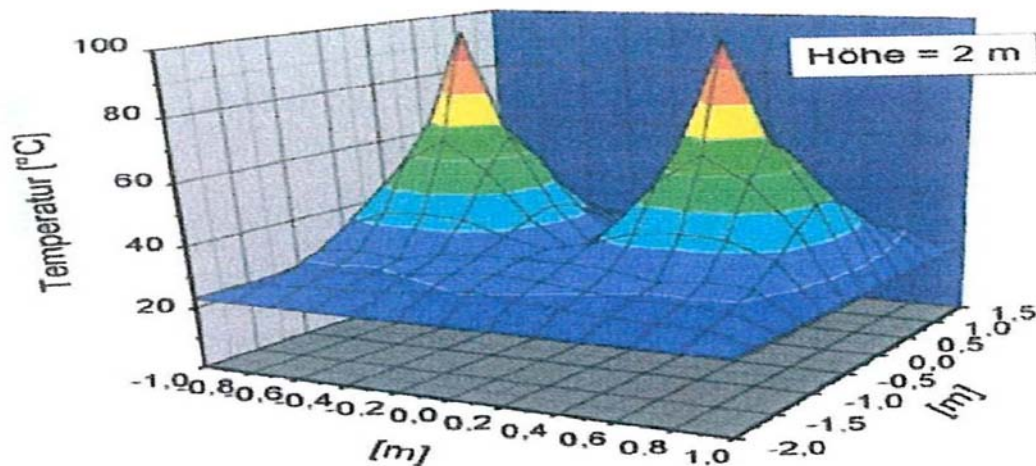


Bild 2 Flächenverteilung der Temperatur bei zwei Brennern in Höhen 2 m

Von Levin [2] wurde in 1993 eine Prüfeinrichtung entwickelt, welche aus einem doppelschaligen Rohrsystem besteht, um mit einem Flüssigbrennstoff ein geeignetes Nebelfluid zu erwärmen. (Bild 3)

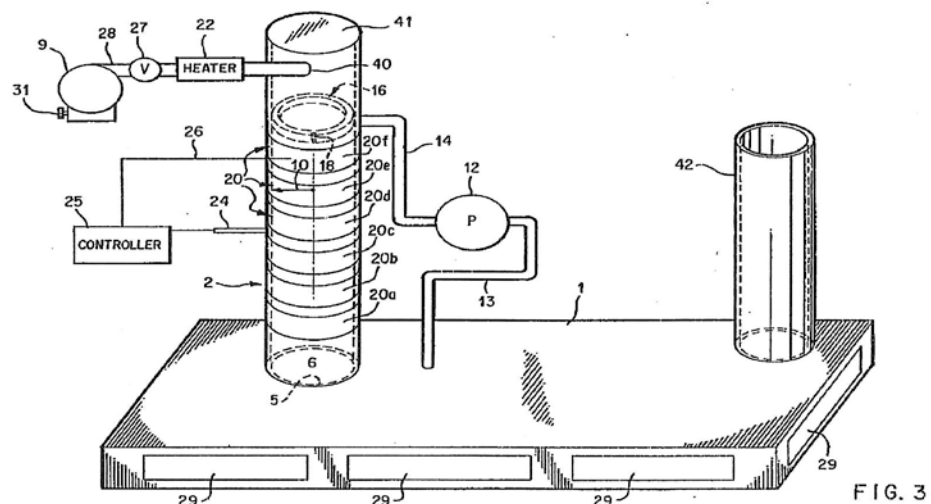


Bild 3 Prüfeinrichtung nach Levin 1993

Größere Wärmefreisetzungen werden z.B. mit der Versuchsanordnung gemäß der australischen Norm AS 4391-1999 erreicht. Hier ist ein Verfahren mit der Verwendung von Brandwannen als Simulationsquelle beschrieben, welche die Freisetzung einer relativ hohen, zeitlich konstanten Wärmeleistung ermöglichen.

Zur quantitativen Bewertung wird wiederum die örtliche Temperaturverteilung im Gebäude festgestellt. Dabei handelt es sich um Brandwannen aus Metall, in denen eine russarme Verbrennungen eines Alkohol (vergälltes Ethanol, 96 Vol%) erfolgt.

Die Größe der Brandwannen und der sog. Wasserwannen, in welche diese aufgestellt sind, sowie die Brennstoffmenge sind normiert, so dass sich definierte Wärmefreisetzungsraten ergeben. Die Versuchsanordnung ist in (Bild 4) gezeigt, welche auch die in die aufsteigende Heißgasströmung eingebrachte Nebelzugabe veranschaulicht.

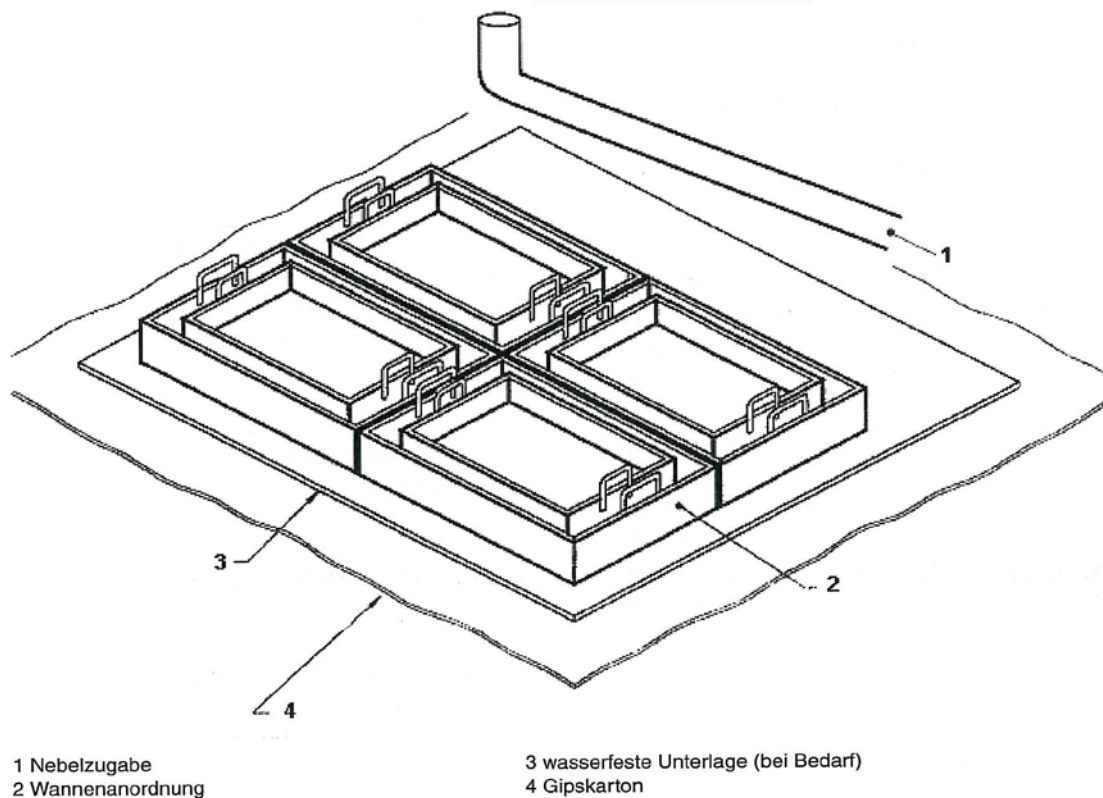


Bild 4 Versuchsanordnung gemäß AS 4391-1999

Auch mit der Kopplung einer größeren Anzahl von Flüssigkeitsbrennern stehen Prüfapparaturen für eine größere Wärmefreisetzungsrate zur Verfügung. Mit der in (Bild 6) gezeigten Anordnung kann die Simulation von Wärmefreisetzungsraten entsprechend einem vorgegebenen zeitlichen Ablauf in einer Stufenfunktion variiert werden.

Durch zusätzliches Regeln der einzelnen Brenner lässt sich dieser Verlauf nahezu stufenlos nachbilden. Um das Durchschlagen der Brennerflamme in größere Höhen zu vermeiden und eine auf die Brandfläche bezogenen gleichmäßige Wärmefreisetzungsrates sicherzustellen, ist über dem Brennerfeld eine Prallplatte mit seitlicher Abströmung eingesetzt. (Bild 5) Die Beimischung des Nebelfluids erfolgt in größerer Höhe über dem Brandherd.

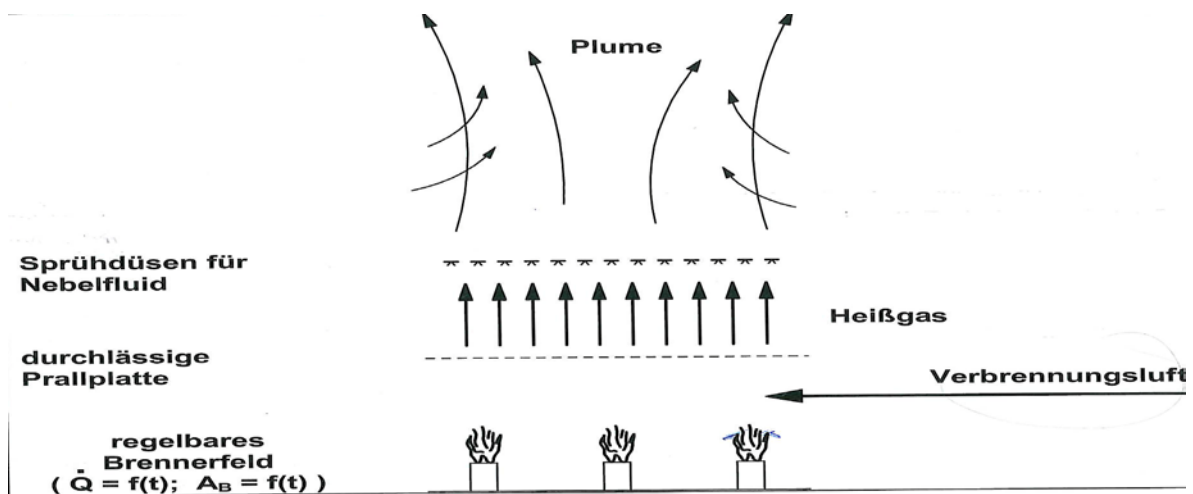


Bild 5 Brennerfeld mit Prallplatte und seitlichen Abströmflächen

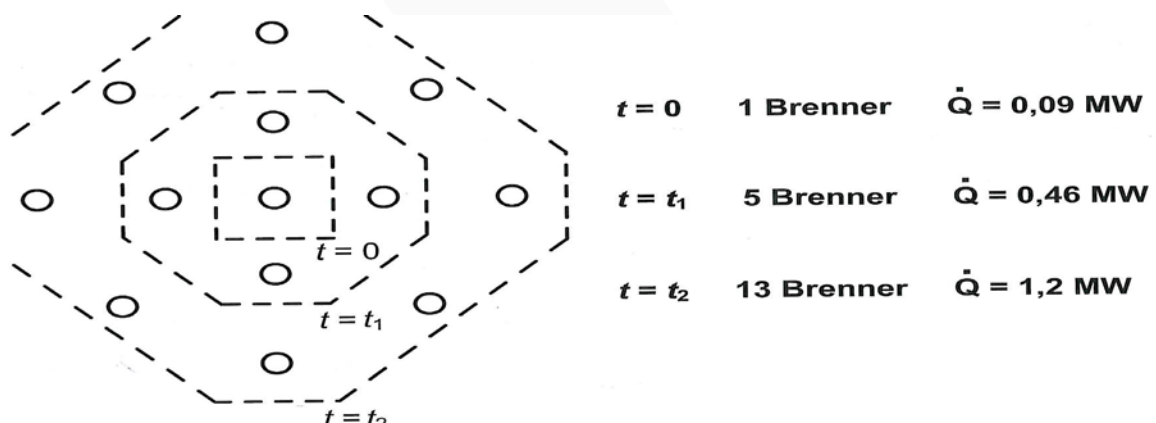


Bild 6 Brenneranordnung zur Simulation unterschiedlicher Wärmefreisetzungsrates

Bereits die obigen kurzen Beschreibungen lassen erahnen, wie die Durchführung entsprechender Prüfversuche doch mit einem deutlichen Aufwand für die Vorbereitung und auch die Verbrauchsmaterialien verbunden ist.

Für die Anwendung kleinerer Raumgeometrien wurde eine Prüfeinrichtung entwickelt, die mit einem Gasbrenner arbeitet, der durch einen Ventilator in ein Rohrsystem beförderte Luft erwärmt und über eine Prallplatte austreten lässt. Es handelt sich dabei um eine recht kompakte Anlage, die es ebenso ermöglicht, verschiedene Stützstellen zu definieren und auf diese Weise bereits den Abgleich mit Computer-Brandsimulationen ermöglicht.

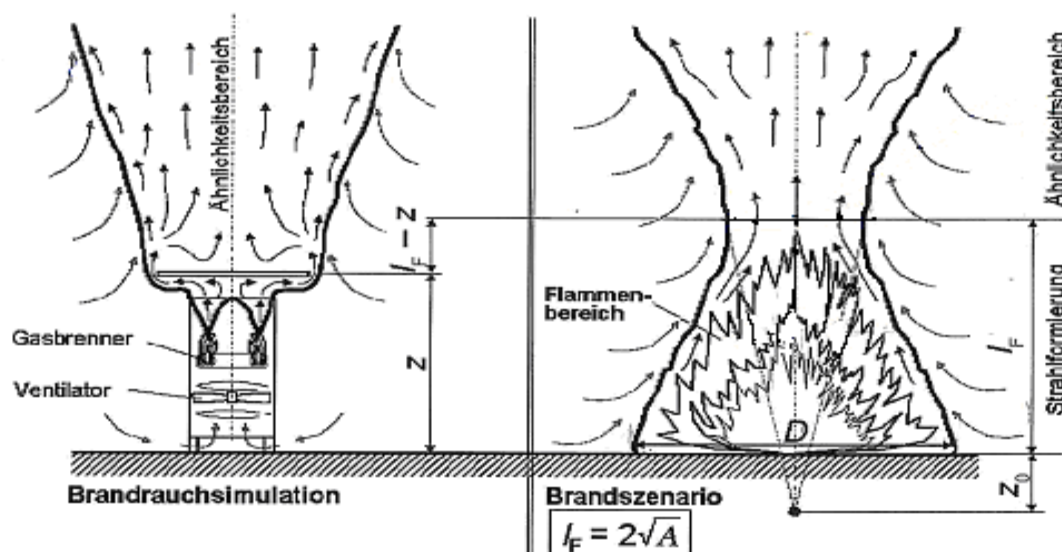


Bild 7 Brandsimulation und Brandszenario nach VDI 6019

Die Darstellung (Bild 7) verdeutlicht, dass etwas oberhalb des Geräteaustritts der strömungstechnisch relevante Ähnlichkeitsbereich entsteht, während der Energieübertrag im unteren Strahlungsformierungsbereich erfolgt.

DIE PRÜFAPPARATUR SMOKE 3

Der Begriff „Smoke 3“ entstammt zum Einen dem Arbeitstitel eines gemeinsamen Forschungs- und Entwicklungsprojekt der drei beteiligten Brandschutz-Ingenieurbüros Corall (Meerbusch), Hagen (Kleve) sowie Halfkann + Kirchner (Erkelenz) mit dem Bau einer leistungsfähigen Prüfeinrichtung für Rauch- und Wärmeabzug. Den Anlass gab die Anfrage eines Landgerichts nach einer entsprechenden Prüfung, welche die Inhaber als öffentlich bestellte und vereidigte Sachverständige zunächst unabhängig voneinander erreichte und seinerzeit von jedem jeweils abgelehnt werden musste. Bald entstand die Idee, in diesem komplexen Thema Kapazitäten zu bündeln und eine derartige Prüfeinrichtung gemeinsam zu entwickeln, die dann wiederum von den Büros autark genutzt werden kann.

„Smoke 3“ steht aber auch für den Bezug auf den Leitfaden der vfdb [1] und bezeichnet die dort höchste Leistungsstufe 3 für die Durchführung entsprechender Rauchversuche.

Die strömungstechnische Optimierung dieser Prüfeinrichtung basiert auf dem Prinzip, dass die Wärmeenergie in den aufwärts gerichteten Strom erst am Ende des Strahlformierungsbereichs eingeleitet wird. Dies ermöglicht einerseits einen direkten Wärmebetrag ohne größere Verluste und andererseits einen voll ausgebildeten turbulenten Luftstrahl ohne erforderliche Prallplatten.

Die Prüfeinrichtung besteht aus drei übereinander angeordneten Ringbrennern, die mit Propangas versorgt werden und auf einem fahrbaren Tragrahmen montiert sind. Jeder dieser Brenner kann für sich alleine oder im Verbund mit anderen Brennern betrieben werden und überdies stufenlos gesteuert werden. In den aufsteigenden Thermikstrom werden Rauchgase mittels senkrecht angeordneter Rohre gezielt eingemischt. Die Raucherzeugungsanlagen sind auf der Grundplatte des Prüfgerätes montiert.

Gegebenenfalls können nochmals größere Wärmefreisetzungsraten durch Ergänzung weiterer Ringbrenner ermöglicht werden.

Die prinzipielle Anordnung ist in nachfolgender Skizze veranschaulicht (Bild 8)

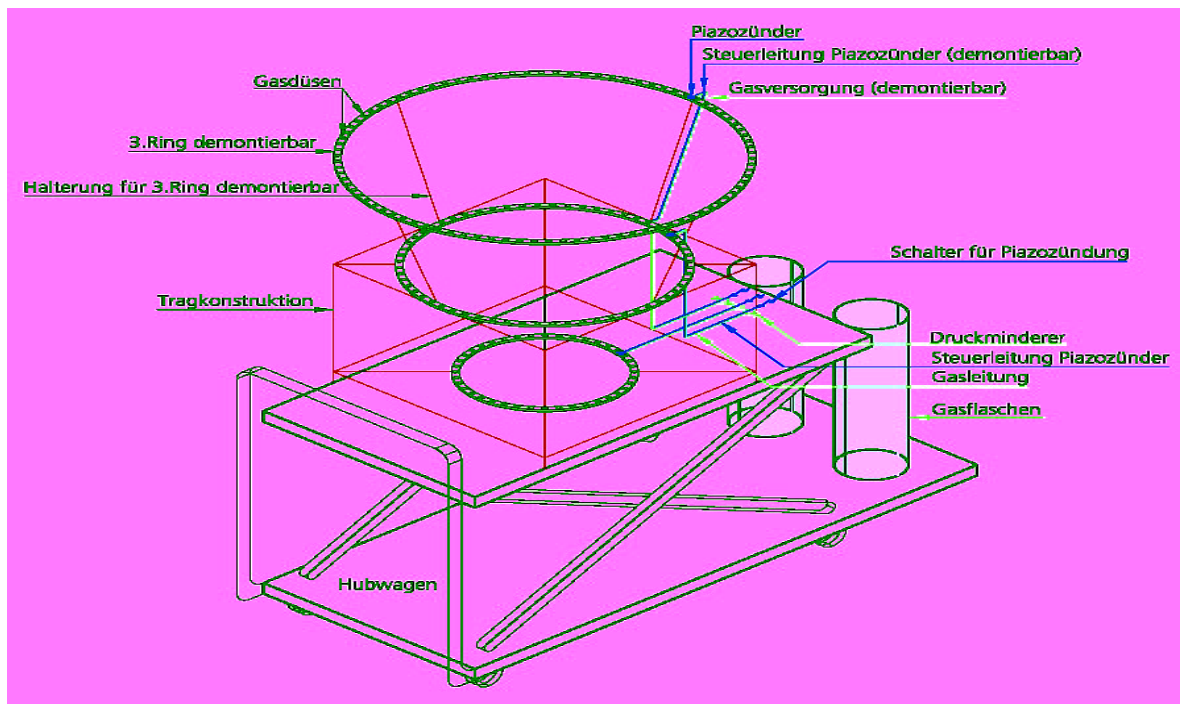


Bild 8 Prinzip-Skizze Prüfeinrichtung Smoke 3

Insgesamt entsteht eine kompakte Prüfanlage, die sich in Gebäuden für die Durchführung von Brandversuchen verwenden lässt, ohne aufwendige Auf- und Abbauarbeiten vorzunehmen, zugleich aber größere Wärmefreisetzungen ermöglicht.

KALIBRIERUNG DER PRÜFAPPARATUR

Mit dem Ziel **kalibrierbare Rauchversuche** durchzuführen, erfolgte eine Vermessung der Simulationseinheit beim Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der TU Braunschweig [3]. Dort wurde zunächst die Energiefreisetzungsrate der einzelnen Ringbrenner bei vorgegebenen Einstellungen sowie aller drei Ringbrenner im Verbund mit unterschiedlichen Einstellungen der Energieversorgung bestimmt und zum zweiten die Temperatur- und Geschwindigkeitsverteilung oberhalb der Simulationseinheit in mehreren Ebenen ermittelt.

Gleichsam als Vorversuch erfolgte die Bestimmung der Energiefreisetzungsrate nach der Sauerstoffsverbrauchsmethode, die in DIN EN 14390 „Fire test - Large scale room reference test for surface products“ genormt und als bewährtes Verfahren anerkannt ist (Bild 9).

Der nach diesem Prüfverfahren mehrfach kalibrierte Propangasbrenner wird als Referenzgröße verwendet, um die Freisetzungsrate der Prüfapparatur bzw. deren Ringbrenner zu bestimmen. (Bild 10)

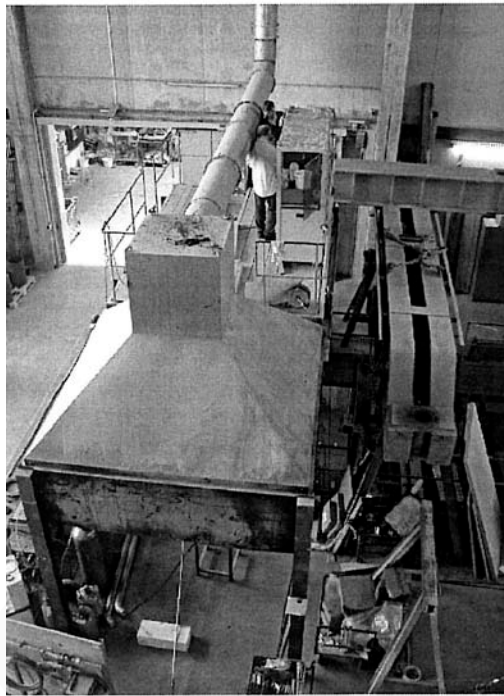


Bild 9 Versuchseinrichtung mit Abgashaube



Bild 10 Kalibrierung nach DIN EN 14390

Zur Ermittlung der Temperatur- und Geschwindigkeitsverteilung über der Simulationseinheit wurden in der ca. 10 m hohen Versuchshalle des IBMB unterschiedliche Messebenen aufgebaut, in Höhe vom 3 m bzw. 4,5 m sowie 6 m. In den Ebenen 3 m und 4,50 m wurden Temperaturmessstellen im Abstand von 15 cm und in der Ebene 6 m in einem Abstand von 30 cm angeordnet. Es wurden insgesamt 105 Temperaturmessstellen verteilt und ausgewertet.



Bild 11 Brandsimulationseinheit mit darüber angeordneten Messebenen

Die Geschwindigkeitsmessungen erfolgten im Zentrum oberhalb der Brandsimulationseinheiten und hatten in den Ebenen 3 m und 4,50 einen Abstand von 30 cm und in der Ebene 6 m eine Abstand von 60 cm untereinander, so dass insgesamt 10 Messstellen ausgewertet werden konnten.

Um stationäre Zustände zu erhalten, wurde jede Leistungsstufe für die Dauer von max. 10 Minuten gefahren.

Die ermittelte Temperaturverteilung wird exemplarisch mit drei Brennern als 3D-Darstellung der Viertel-Quadranten über die Systemachse der jeweiligen Ebenen in (Bild 12) gezeigt. Die Auswertung ergab, dass symmetrische Verhältnisse für jeden Quadranten in den einzelnen Messebenen sich einstellen und somit diese Visualisierung ausreichend ist.

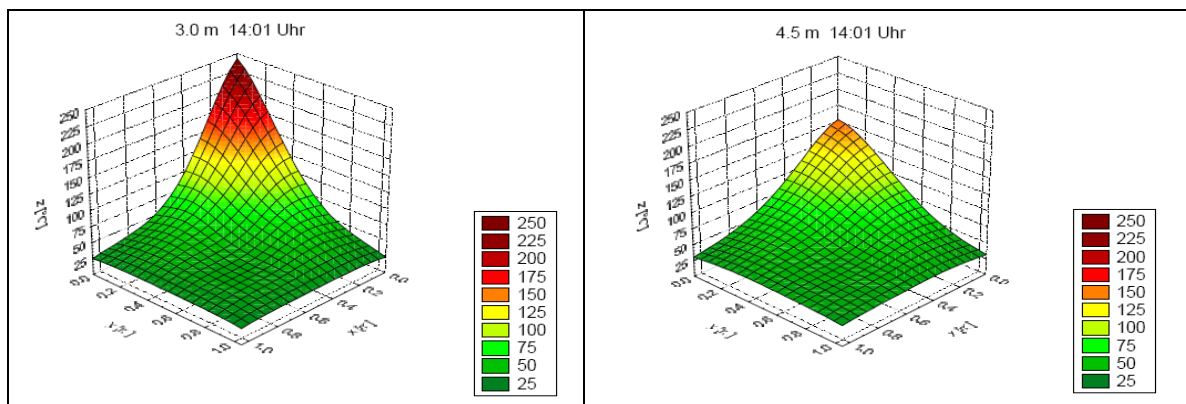


Bild12 Temperaturverteilung in den Ebenen 3 m und 4,50 m für den Einsatz von drei Brenneringen

In Zusammenfassung der Messungen können die Maximaltemperaturen für die einzelnen Leistungsstufen in Abhängigkeit der Höhe in der folgenden Grafik abgelesen werden (Bild 13):

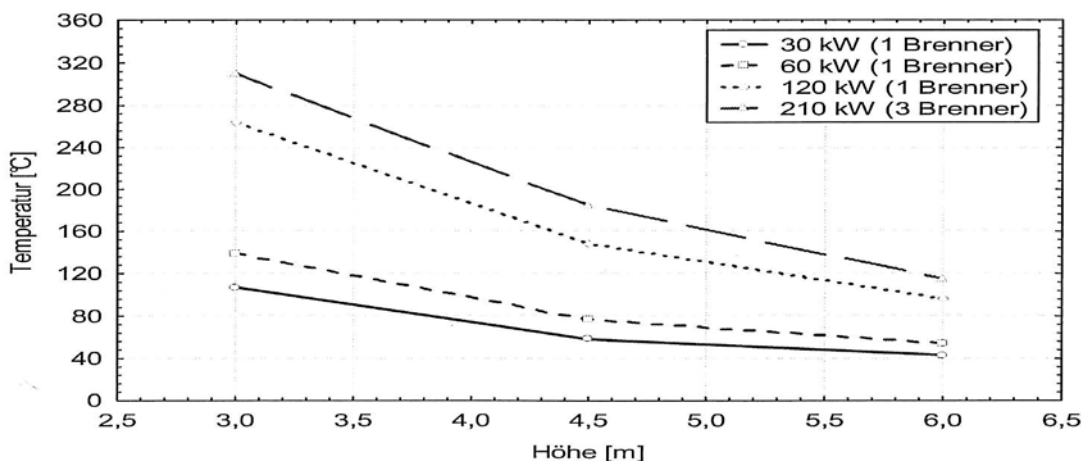


Bild 13 Temperaturverteilung über die Höhe der verschiedenen Leistungsstufen

Die Geschwindigkeiten wurden ebenso für die verschiedenen Leistungsstufen ermittelt, dabei zeigte sich wiederum, dass diese auf der vertikalen Achse am höchsten sind und in radialer Richtung deutlich abnehmen. Sie steigen mit der Energiefreisetzungsrate und verringern sich über die Höhe. Exemplarisch ist für die vorstehend bereits in der Temperaturverteilung ausgewertete Leistungsstufe die Geschwindigkeitsverteilung im (Bild 14) ausgewiesen.

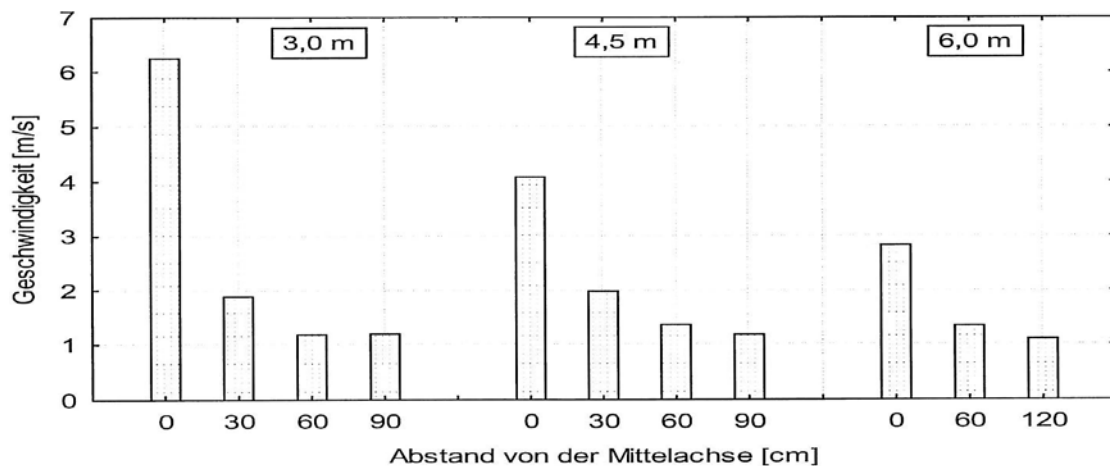


Bild 14 Geschwindigkeitsverteilung in den drei Messebenen

Im Ergebnis der Untersuchung bestätigt IBMB: „Die Brandsimulationseinheit ist geeignet, modellhaft bei Abnahmeversuchen unterschiedliche Brandszenarien zu simulieren und die Ausbreitung der Rauchgase im Gebäude sichtbar zu machen“.

Die Energiefreisetzungsraten der Brandsimulationseinheit lassen sich mit Hilfe von Ähnlichkeitsgesetzen auf reale Brandszenarien übertragen, wie sie in Brandschutzkonzepten angenommen und untersucht werden. Dabei werden Brandszenarien erreicht, die 1,5 MW auf 5 m² Brandherdfläche entsprechen.

REGELUNGEN ZUR DURCHFÜHRUNG VON RAUCHVERSUCHEN

Technische Grundlagen zur Überprüfung der Wirksamkeit von Gesamtsystemen zur Rauchableitung sind in VDI 6019 Blatt 1 [4] übersichtlich beschrieben. Danach können sowohl erwärmte Luft als auch offene Poolbrände mit flüssigen Brennstoffen eingesetzt werden, wobei zur Visualisierung der Rauchgasströmung zunächst Aerosole aus Nebelfluiden oberhalb der Flammenzone beigemischt sind. Folgende Randbedingungen sind einzuhalten:

- Um eine Zersetzung des Aerosolnebels zu verhindern, darf dieser nicht zu nahe über der Heizquelle geführt werden und soll speziell für den Anwendungsbereich erhöhter Temperatur geeignet sein.

- Die Komponenten des Gesamtsystems zur Rauchableitung müssen dem endgültigen Gebrauchszustand entsprechen und funktionsbereit sein.
- Nachströmflächen müssen entsprechend dem Entrauchungskonzept aktiviert werden.
- Strömungsrelevante Details im Raum müssen vorhanden sein oder nachgebildet werden.
- Verhältnisse der betrieblichen Lüftung beachtet und raumtechnische Anlagen müssen funktionsfähig sein.
- Die Raumlufttemperaturen zum Versuchszeitpunkt sollten den der späteren Nutzung entsprechen.
- Die Gebäudehülle muss vollständig vorhanden und funktionsfähig sein.
- Zur Quantifizierung der Rauchausbreitung können geeignete Messgase beigemischt werden.

Als Konsequenz dieser jeweils strömungstechnisch plausibel und nachvollziehbar begründeten Voraussetzungen können aussagefähige Rauchversuche bei heutzutage üblichen Bauabläufen lediglich zu einem Zeitpunkt sehr kurz vor Gesamt-Fertigstellung durchgeführt werden. Hieraus folgt allerdings wiederum, dass großflächige Poolfeuer oder umfangreiche Gasbrenner-Aufstellungen ggf. zu deutlichen Akzeptanzproblemen bei dem Gebäudenutzer führen.

PRAXISBEISPIELE: SANIERUNG EINER KULTURHALLE

Für eine bestehende Kultur- und Kongresshalle wurde im Rahmen einer Sanierung ein Brandschutzkonzept aufgestellt. Ein Bestandteil dieses Konzeptes war auch die Dimensionierung einer Entrauchungsanlage für den so genannten „Großen Saal“. Dieser umfasst eine Grundfläche von ca. ca. 1.844 m² bei einer mittleren Gesamthöhe von ca. 14 m. Eine Übersicht zur Lage des „Großen Saals“ innerhalb des Gesamtgebäudes und zur Höhenentwicklung ist in nachfolgenden Skizzen in Bild 15 und Bild 16 gegeben.

Da der bestehende Kongress-Saal seine Rettungswege ausschließlich über das baulich und umgrenzende Foyer führte und dieses aus Denkmalschutzgründen nicht verändert werden sollte, wurden spezifische Maßnahmen zur Rauchabführung für den Saal wie auch das anschließenden Foyer getroffen. Nachfolgend wird ausschließlich über die Dimensionierung im Saal berichtet.

Hier ist die betriebliche Lüftung mit einer Zuluftführung aus der ebenfalls denkmalgeschützten faltwerkartigen Decke mit entsprechenden Auslassöffnungen und einer Abluftführung durch Ansaugstellen im Galerie- und Fußbodenbereich gekennzeichnet. Demgegenüber sieht das Grundsystem der Rauchabführung eine maschinelle Entrauchung im Deckenbereich und eine Nachströmung über geöffnete Saaltüren vor.

Dies bedeutet also die vollständige Umkehrung der Strömungsrichtung, insbesondere für die Brandentstehungsphase bzw. Ansteuerungs- und Anlaufphase des Entrauchungssystems von großer Bedeutung ist, zumal diese mit dem Zeitraum der Saal-Evakuierung zusammenfallen wird. Diese Fragestellung wiederum erfordert den Einsatz einer hochwertigen ingenieurmäßigen Brandsimulation und Überprüfung in Rauchversuch.

Ebenso galt zu berücksichtigen, dass die Auslösung des Entrauchungssystems in Aufschaltung auf die Sprinkleranlage vorgesehen ist und damit eine eher träge Ansteuerung erwarten lässt.

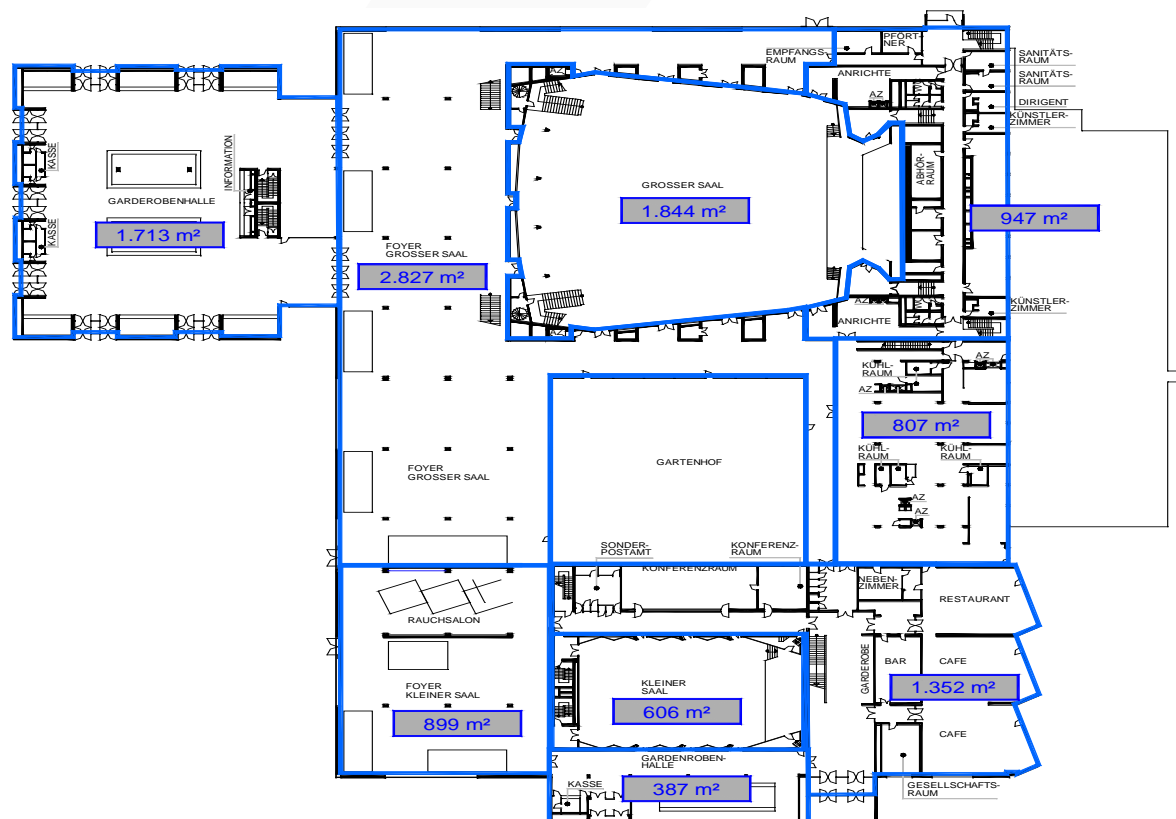


Bild 15 Grundriss der Kultur- und Kongresshalle

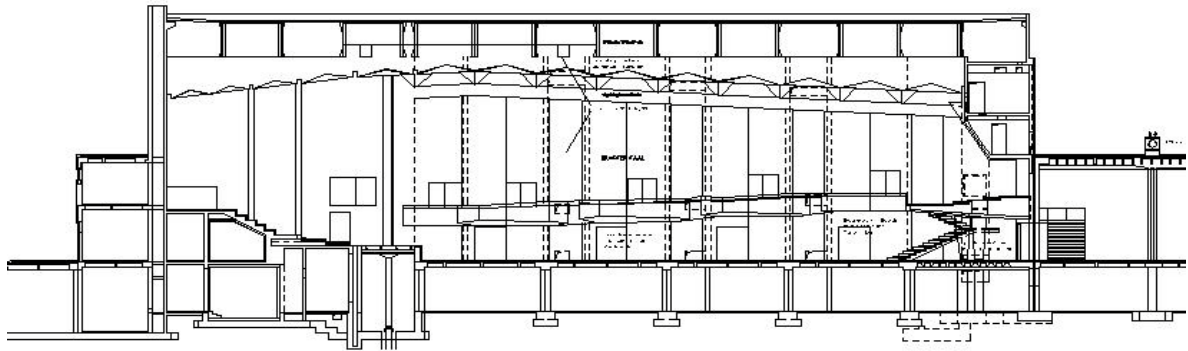


Bild 16 Schnitt durch den „Großen Saal“

VORDIMENSIONIERUNG UND BRANDSIMULATION

Die Dimensionierung der Rauchabzugsanlage erfolgte zunächst anhand einer rechnerischen Brandsimulation mit einem Einraum-Mehrzonenmodell, das angesichts der vergleichsweise einfachen Geometrien als ausreichend und geeignet angesehen wurde. Dabei wurde das System einer maschinellen Entrauchung favorisiert, da die nachträgliche Anordnung von Dachöffnungen sowohl unter baukonstruktiven als auch schallakustischen Aspekten für das Bestandsobjekt ungünstig bewertet wurde.

Für die Berechnungen wurde als relevantes Brandszenario zunächst ein Wärmeumsatz von 3 MW zugrunde gelegt. Im Rahmen der Berechnungen wurden aber auch Parameterstudien durchgeführt, in denen der Wärmeumsatz variiert wurde, um dessen Einfluss auf die dimensionierte Entrauchungsanlage zu überprüfen.

Als einzuhaltendes Schutzziel wurde in Anlehnung an die allgemeine Regelung der DIN 18 232 eine rauchfreie Schicht von 2,50 m oberhalb des höchsten Evakuierungsniveaus angestrebt. Entsprechend ergibt sich im „Großen Saal“ mit einer Galerieebene auf Höhenkote 4 m das Schutzziel einer raucharmen Schicht von 6,50 m, bezogen auf die Fußbodenoberkante im Erdgeschoss. Mit dieser Höhe der raucharmen Schicht ergibt sich zugleich eine ausreichende Distanz zur Oberkante der Nachströmöffnungen.

Die Auswertung der Berechnungen für unterschiedliche Wärmefreisetzungsraten und Brandherdflächen ist in (Bild 17) wiedergegeben.

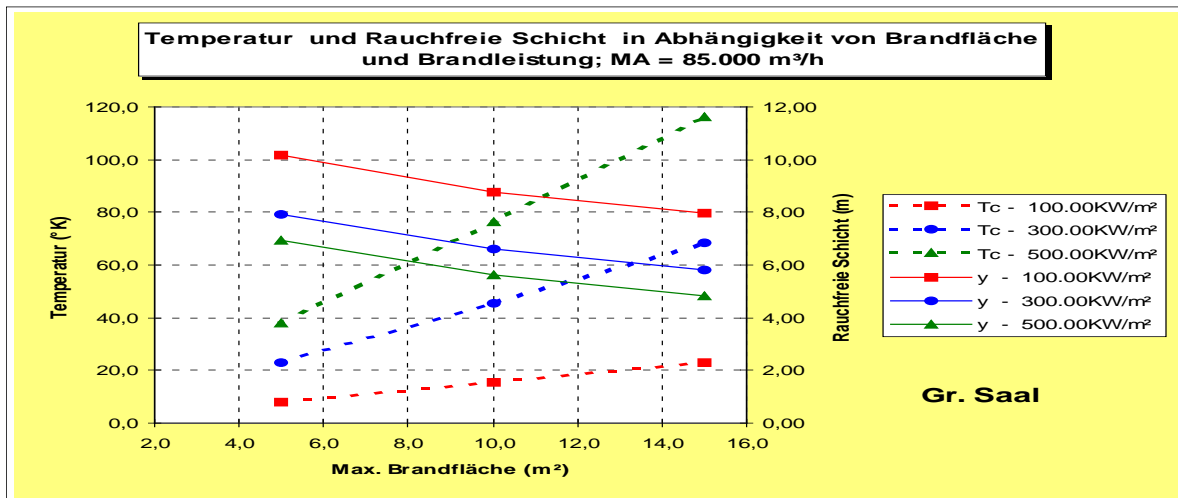


Bild 17 Graphische Darstellung einer Parameterstudie mittels Zonenmodell

Für die vorstehend erläuterte Detailuntersuchung der Strömungsverhältnisse zu Beginn der Entrauchung wurde eine ergänzende CFD-Studie durchgeführt. Hierzu wurde zunächst die Kulturhalle mit dem in (Bild 18) dargestellten dreidimensionalen Computermodell abgebildet.

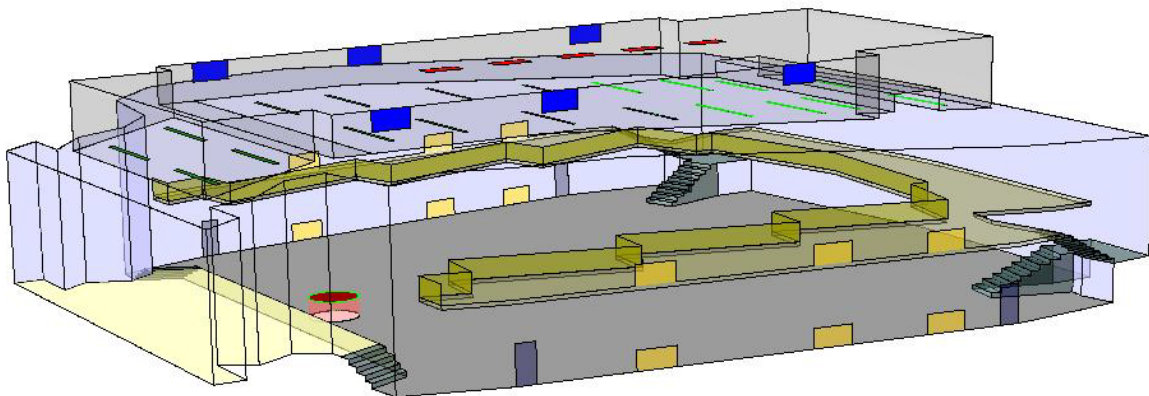


Bild 18: 3-D-Modell der Kulturhalle

Ebenso wurden die bereits vorherbeschriebenen gebäude- und lüftungstechnischen Verhältnisse implementiert.

Dies sind insbesondere die Galerieebene und der oberhalb des Besuchersaales angeordnete Dachhohlraum. Alle lüftungs- und entrauchungstechnisch erforderlichen Öffnungen wurden im Modell übernommen. Die betriebliche Lüftung für den Saal erfolgt in der Form, dass in den Dachhohlraum über Lüftungskanäle aus der Lüftungszentrale konditionierte Luft eingebracht wird. Diese Luft gelangt aus dem Dachhohlraum über Fugenöffnungen in der Abhangdecke in den eigentlichen Saal. Die Abluft wird aus dem Saal über Öffnungen in den Seitenwänden auf der Galerieebene und im Erdgeschoss wieder abgeführt.

Zur Entrauchung werden Brandgasventilatoren auf dem Dach der Kulturhalle berücksichtigt, die direkt mit dem Dachhohlraum über dem Saal in Verbindung stehen. Die im Brandfall erforderliche Zuluftnachströmung wird auch im Computermodell über Türöffnungen im EG ermöglicht.

Anhand dieser CFD-Modellierung wurde zunächst dieses spezifische Lüftungssystem durchgerechnet, um bereits für den „Normalfall“ einen Abgleich zwischen der Simulation und den tatsächlichen Objektverhältnissen zu ermöglichen.

Das oben beschriebene Lüftungssystem führt zu dem in (Bild 19) dargestellten Strömungsfeld innerhalb des Saales.

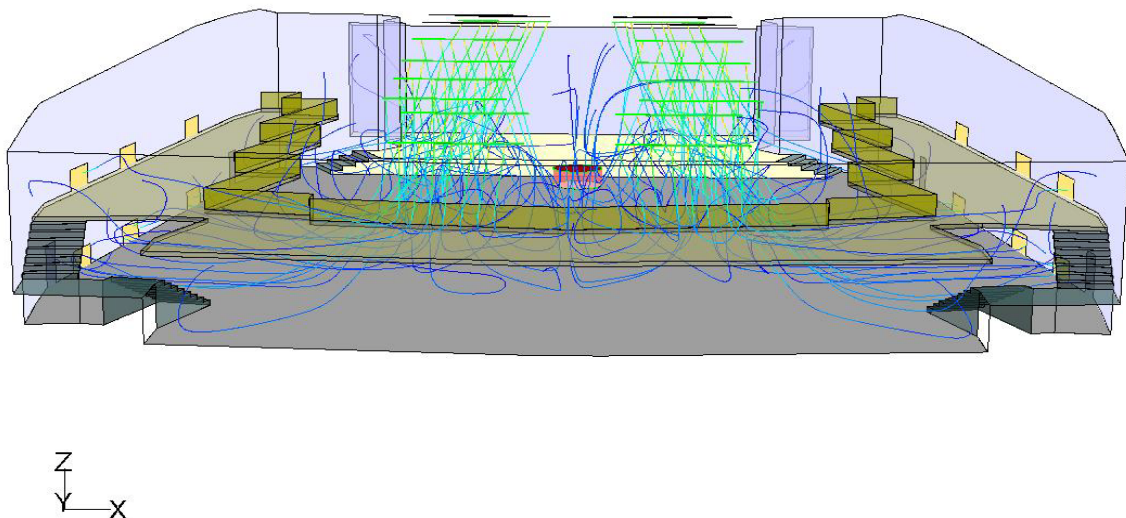


Bild 19 Strömungspfade (Pathlines) infolge der betrieblichen Lüftung

Es zeigt sich als Berechnungsergebnis die seitens der Lüftungstechnik gewünschte Raumströmung, in dem die über die Hohlraumdecke in den Saal eingeführte Frischluft in den Bodenbereich des Saales absinkt und hier mit einer relativ geringen Geschwindigkeit in Richtung der Abluftöffnungen strömt.

Bei der anschließenden Simulation für ein Brandereignis wurde als Szenario eine mittlere Brandausbreitungsgeschwindigkeit und eine Wärmefreisetzung von maximal 1,5 MW angesetzt, da die vorherbeschriebenen befürchteten negativen Einflüsse der betrieblichen Lüftung, insbesondere bei niedrigenergetischen Bränden erwartet wurden.

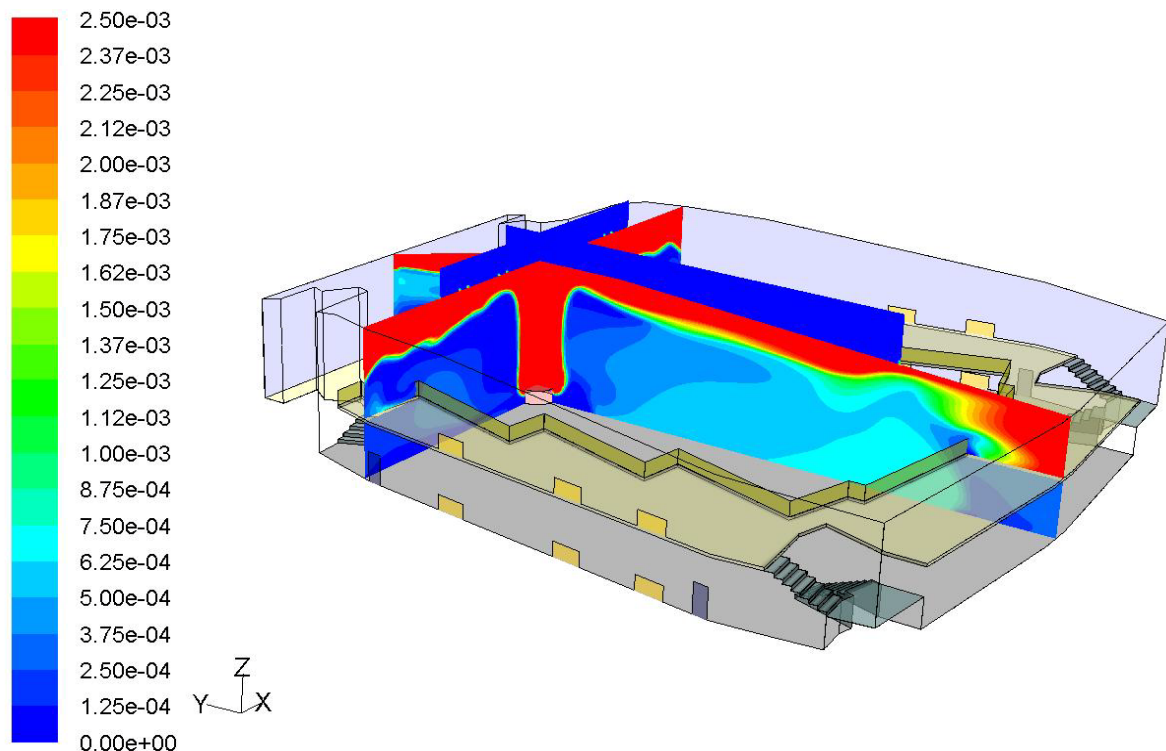


Bild 20 Rauchgasverteilung bei einem 1,5 MW Brand nach 8 min
Branddauer

In Bild 20 sind die Rauchgaskonzentrationen in Farbabstufungen dargestellt, die hier aber aufgrund der Drucklegung in Graustufen erscheinen. In der nebenstehenden Skala ist der Verdünnungswert abzulesen. Der an höchster Stelle der Skala dunkelgrau dargestellte Bereich entspricht einer Rauchgaskonzentration mit einer maximal 400-fachen oder geringeren Verdünnung gegenüber der Ausgangskonzentration. Diese Verdünnungsrate ist als sichtbare Schichtgrenzen einer Rauchgasschicht anzusetzen. Bei einer Grauschattierung entsprechend des mittleren Bereiches der Skala liegt bereits eine 1000-fache Verdünnung vor. Diese Verdünnung reicht gemäß diverser Veröffentlichungen (z. B. John und Seeger) aus um Sichtweiten von mehr als 30 m zu garantieren. Die hellgrauen Bereiche können demnach eindeutig bereits als raucharme Schicht angegeben werden.

Man erkennt, dass die betriebliche Lüftung keinen allzu gravierenden Einfluss auf die Rauchgasströmung ausübt. Lediglich im rückwärtigen Bereich des Saales ist oberhalb der Galerie das Absinken der Rauchgasschicht bis in den Aufenthaltsbereich zu erkennen.

Zusammenfassend konnte aus der durchgeführten Brandsimulation das Ergebnis gezogen werden, dass auch die CFD-Simulation die Vordimensionierung durch Zonenmodell bestätigt, wobei einzelne strömungstechnisch zu erwartende Effekte, insbesondere im Galeriebereich, als tolerierbar eingeschätzt werden. Insbesondere ergab sich aus der CFD-Studie auch, dass eine nachhaltige Beeinträchtigung der betrieblichen Lüftung für das Entrauchungssystem auch in dessen Ansteuerungs- und Anlaufphase nicht befürchtet werden muss.

DURCHFÜHRUNG VON RAUCHVERSUCHEN

Das fertig gestellte Entrauchungssystem sollte zur weiteren Verifikation mit einem realistischen Rauchversuch überprüft werden. Hierzu wurde die Versuchsanlage „Smoke 3“ in einem Standort in Raummitte, etwa 1 m vor der Bühne, aufgestellt, was auch dem in der Brandsimulation zugrunde liegenden Brandherd entsprach.

In insgesamt drei Versuchen wurde insbesondere die Steigerung der Wärmeleistung und der Nebelproduktion vorgenommen, um eine langsame sowie eine schnelle und eine sehr schnelle Brandausbreitungsgeschwindigkeit zu simulieren. Da das Auslösen der Sprinkleranlage als Ansteuerungskriterium nicht aktiviert werden konnte (und sollte!) wurde eine manuelle Auslösung der Entrauchungsanlage vorgenommen bzw. bei den einzelnen Versuchen variiert. Das Abschalten der betrieblichen Lüftung über Kanalrauchmelder wurde stets automatisch aktiviert.

Generell sollte durch die Versuche neben einer Prüfung der rechnerischen Simulationen auch eine Entscheidungshilfe zu Auslösekriterien und -zeitpunkten des Entrauchungssystems erreicht werden.

Im **Versuch 1** wurde zunächst eine langsame Brandausbreitungsgeschwindigkeit mit stufenartiger Steigerung der Wärmeleistung innerhalb von 6 Minuten auf ca. 100 % der Gesamtleistung nachvollzogen. Die Auslösung der maschinellen Entrauchung erfolgte 10 Minuten nach Versuchsbeginn. Dabei zeigte sich, dass die Rauchgase geradlinig bis zur Deckenunterseite aufsteigen und sich dort radial unter der Decke ausbreiten. Nach ca. 3 Minuten Versuchsdauer ist im rückwärtigen Eckbereich des Saales ein Absinken der Rauchgase bis auf die Galerieebene zu beobachten.

In den übrigen Bereichen beträgt die Höhe der raucharmen Schicht zwischen 1,50 m und 2,50, bezogen auf Galerieebene. Im zentralen Bereich des Saales ist eine höhere Gasdichte und eine deutliche Schichtung zu erkennen.

Diese verbleibt auch im weiteren Versuchsablauf bis nach ca. 6 Minuten Versuchsdauer die Rauchgase im rückwärtigen Galeriebereich weiter absinken.

10 Minuten nach Versuchsbeginn erfolgt mit dem Aktivieren der Entrauchungsanlage und der Nachströmöffnungen ein langsames Anheben der Rauchgasschicht, die sich in dem Saalbereich bei etwa 7 m einstellt. Lediglich auf der Galerieebene ist eine diffuse Verrauchung im rückwärtigen Bereich des Saales festzustellen, welche sich mit weiterer Versuchsdauer bzw. Wirkung der Entrauchungsanlage aufhebt und schließlich auch auf der Galerieebene 3 m bis 4 m beträgt.



Bild 21 Vertikale Rauchgasausbreitung bei Beginn des Versuchs 1

Bei **Versuch 2** wurden Wärmeleistung und Nebelproduktion innerhalb von 2 Minuten auf 100 % der Gesamtleistung gesteigert und die Entrauchungsanlagen einschließlich Nachströmöffnung 4 Minuten nach Versuchsbeginn aktiviert.

Die anfänglichen Beobachtungen gleichen dem vorgenannten Versuch 1 allerdings mit einer etwas größeren Rauchgasdichte und einem etwas moderaterem Absinken der Rauchgase. Zum Auslösezeitpunkt der Entrauchungsanlage liegen im zentralen Saalbereich raucharme Schichthöhen von 8 m bis 9 m, im rückwärtigen Bereich der Galerieebene Höhen von 1,50 m bis 2,50 m über der dortigen Bodenfläche vor. Eine stabile Schichtung der Rauchgase ist auch nach 15 Minuten in überwiegendem Deckenbereich des Saales deutlich zu erkennen. Im Galeriebereich stellen sich vermutlich zuluftbedingt zeitweise diffuse Verrauchungen ein.



Bild 22 Rauchgaspolster oberhalb der Bühne bei Versuch 2

Im **Versuch 3** wird die Steigerung von Wärmeleistung und Nebelproduktion innerhalb einer Minute als sehr schnelle Brandausbreitungsgeschwindigkeit simuliert, allerdings die Auslösung der maschinellen Entrauchungsanlage erst nach 10 Minuten aktiviert.

Hier stellen sich in der Anfangsphase des Versuches Beobachtungen vergleichbar zu den vorbeschriebenen Versuchen 1 und 2 ein. Etwa 5 Minuten nach Versuchsbeginn ist allerdings auf der Galerieebene ein Rauchgaseintrag bis auf die Höhe der Stuhlreihen festzustellen, während die Saalmitte im Erdgeschossniveau nach wie vor rauchfrei verbleibt.

Wiederum wird der Deckenraum des Saales kontinuierlich von oben nach unten absinkend mit Rauchgas gefüllt. Eine Höhe der raucharmen Schicht von etwa 7 m über Erdgeschossniveau stellt sich etwa 6 Minuten nach Versuchsbeginn ein, gleichzeitig ist das leichte Unterströmen der Galeriekante festzustellen, bis nach weiteren 1,5 Minuten die Galerieflächen im rückwärtigen Bereich vollständig verrauchet.

8 Minuten nach Versuchsbeginn sind im rückwärtigen Bereich des Saales erste Rauchgasspuren ca. 2,50 m oberhalb der Erdgeschossfläche festzustellen.

Mit dem Aktivieren der Entrauchungsanlage und Öffnen der Zuluftflächen zeigen sich für die nunmehr tiefer liegenden Rauchgase im Bereich der Türen durch den Zuluftstrahl zurück geführte Rauchgase und dementsprechend eine diffuse Verrauchung im rückwärtigen Bereich des Raumes. Diese lösen sich bereits 2 Minuten nach Auslösen der Entrauchungsanlage auf, so dass sich mit fortlaufender Versuchsdauer allmählich ähnliche Strömungs- und Entrauchungsverhältnisse analog Versuch 2 einstellen, welche bereits 17 Minuten nach Versuchsbeginn bzw. 7,5 Minuten nach Auslösen der Entrauchungsanlage eine deutliche Schichtung selbst im Bereich der rückwärtigen Galerie in Höhe von 3 m bis 4 m entwickeln.



Bild 23 Rauchgasausbreitung im zentralen Bereich des Saals bei Versuch 3

In den Rauchversuchen wurde also insgesamt die Möglichkeit genutzt, in vergleichsweise geringem Aufwand auch äußere Randparameter und Einflussgrößen zu variieren, die bei der rechnerischen Brandsimulation nur recht zeitaufwändig ausgewertet werden können.

ABGLEICH ZWISCHEN SIMULATION UND RAUCHVERSUCH

Zusammenfassend zeigt sich zwischen den durchgeführten Rauchversuchen und den vorstehend nicht vollständig wiedergegebenen Brandsimulationen eine sehr gute Übereinstimmung der Prognose von Einflüssen und Verhältnissen für die Rauchabführung. Auch quantitativ harmonisieren die Werte der rechnerischen Prognose mit den Beobachtungen des Rauchversuchs.

Beispielhaft wurde hierzu ein Vergleich des Ergebnisplots aus der rechnerischen Simulation und dem vergleichbaren Zeitpunkt der Rauchversuche dokumentiert. In dem dargestellten Praxisbeispiel konnte auf Basis dieser durchgehenden und schlüssigen Argumentation und Nachweisführung die beanspruchte Abweichung im bauaufsichtlichen Verfahren akzeptiert und eine effektive Lösung für die weitere Nutzung der denkmalgeschützten Kulturhalle ermöglicht werden.

FAZIT

Spezielle Risiken, besondere Objekte oder Fragestellungen erfordern in der brandschutztechnischen Bewertung spezielle Lösungen unter ingenieurmäßiger Herangehensweise. Für eine seriöse Nachweisführung ist es unabdingbar, die hier auf Basis einer rechnerischen Brandsimulation entwickelten Prognosen anhand der tatsächlichen Bauausführung zu überprüfen. Um hierbei Fehlinterpretationen zu vermeiden, kommt einer leistungsfähigen, kalibrierten Prüfapparatur große Bedeutung zu.

Nur in dieser Weise kann zwischen dem Abgleich mehrerer berechneter Stützstellen und den Beobachtungen des praktischen Rauchversuches eine realitätsnahe Extrapolation und verantwortliche Aussage zum Gesamtsystem gegeben werden.

Mit der hier dargestellten, im IBMB kalibrierten Prüfapparatur „Smoke 3“ wird nach den Erfahrungen des Unterzeichners aus einer Vielzahl zwischenzeitlich durchgeführte Rauchversuche ein wesentlicher Beitrag in diesem Sinne geleistet.

LITERATUR

- [1] Grundsätze für Rauchversuche in Gebäuden vfdb-Leitfaden
- [2] Levin Method and apparatus for controllably generating smoke,
International Patentklassifikation F 22 B 27/16
- [3] Bemessung einer Brandsimulationseinheit, Untersuchungs-Bericht
Nr. 6348/6003 IBMB an der TU Braunschweig Juli 2007
- [4] Ingenieurverfahren zur Bemessung der Rauchableitung aus Gebäuden,
Brandverläufe, Überprüfung der Wirksamkeit VDI 6019 Blatt 1