

1

### Einleitung

Die Bedeutung einer effektiven Rauchableitung im Brandfall für den vorbeugenden Brandschutz ist in Fachkreisen unstrittig. Die Brandkatastrophen der jüngsten Vergangenheit haben eindrücklich gezeigt, dass die Brandopfer durch Raucheinwirkung verursacht werden. Am Beispiel des Industriebaus haben Hosser et al. (1997) aufgezeigt, dass für die Ermöglichung der Fremdrettung von Personen und für die Durchführung wirksamer Löscharbeiten durch die Feuerwehren eine ausreichende Rauchableitung unumgänglich ist. Dies gilt auch für Räume mit Sprinkleranlagen. Gerhardt und Krüger (2000) und Gerhardt (2000) haben auf der Grundlage experimenteller Untersuchungen nachgewiesen, dass die Sicherstellung der uneingeschränkten Nutzung von Flucht- und Rettungswegen über einen hinreichend langen Zeitraum auch für komplexe Räume möglich ist. Allerdings erfordert dies häufig eine besondere Vorsorge im Hinblick auf die Zuluftführung und möglicherweise eine windrichtungsabhängige Ansteuerung der Zuluft- und Entrauchungsöffnungen.

Während über die Notwendigkeit von Entrauchungsmaßnahmen weitgehend Einigkeit herrscht, bestehen im Hinblick auf die Methodik der Auslegung der erforderlichen Maßnahmen erhebliche Unterschiede. Viele Brandschutzingenieure, insbesondere diejenigen, für welche die Temperaturbelastung von Bauteilen im Vordergrund steht, halten die Berechnung von Entrauchungsmaßnahmen mittels Zonenmodellen für ausreichend. Diese Meinung teilt auch der Arbeitskreis »Rauchabzug im Industriebau«, siehe Hosser et al. (1997). Dieser Arbeitskreis hat im Auftrag der Projektgruppe »Brandschutz im Industriebau« der Fachkommission Bauaufsicht der ARGEBAU wesentlich die Forderungen zum Rauchabzug in der Muster-Industriebaurichtlinie (M INDBauRL) in der Fassung März 2000 mitbestimmt. Im Anhang 1 der Muster-Industriebaurichtlinie werden »Grundsätze für die Aufstellung von Nachweisen mit Methoden des Brandschutzingenieurwesens« angegeben. Diese beziehen sich ausschließlich auf die Anwendung von Zonenmodellen. Der Autor dieses Beitrages hält die undifferenzierte Anwendung von Zonenmodellen zum Nachweis einer ausreichenden Entrauchung für physikalisch nicht begründbar, wissenschaftlich nicht haltbar und für viele Anwendungsfälle für unzureichend. Im Folgenden sollen die physikalischen Grundlagen der verschiedenen Nachweismethoden erläutert und ihre Anwendungsgrenzen aufgezeigt werden.

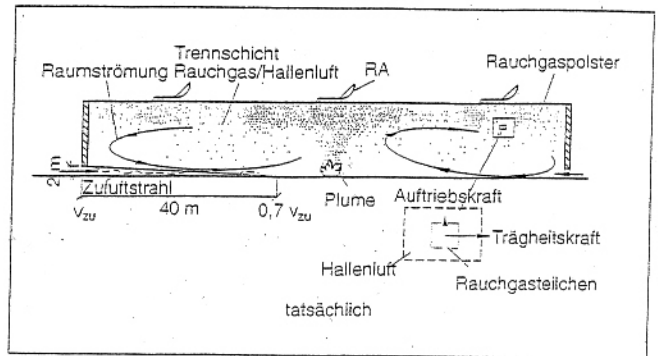


BILD 1 Schematische Darstellung der brandinduzierten Strömung in einem großen Raum

### 2 Grundlagen

Die Rauchgasausbreitung soll an einem einfachen Beispiel, das für Industriehallen typisch ist, erläutert werden. Bild 1 (entnommen Gerhardt und Krüger (2000)) zeigt die Strömung in einem Längsschnitt einer großen, unverbauten Industriehalle. Das Strömungsfeld lässt sich in drei unterschiedliche Bereiche einteilen. Über dem Brandherd steigt infolge Thermikwirkung das heiße Rauchgas nach oben. Das Strömungsgebiet oberhalb des Brandherdes wird im Brandschutzschrifttum als Plume-Strömung bezeichnet. Strömungstechnisch stellt es einen Freistrahls dar und ist ähnlich einem aus dem Boden austretenden Heißgasstrahl. Wegen der vergleichsweise großen Auftriebsgeschwindigkeiten und dem recht großen Durchmesser stellt sich hier immer eine turbulente Strömung ein. Der turbulente Impulsaustausch an der Umrandung des Strahls führt zur Einmischung kälterer Raumluft in den aufsteigenden Heißgasstrahl. Das Rauchgas/Luft-Gemisch bildet im Deckenbereich ein Rauchgaspolster. Bei natürlicher Rauchableitung wird durch Rauchabzugsgeräte (NRA) Rauchgas aus dem Rauchgaspolster ins Freie abgeleitet. Im stationären Zustand ist der abgeleitete Rauchgas-Massenstrom gleich dem Rauchgas-Massenstrom der Plume-Zuströmung zum Rauchgaspolster. Aus Kontinuitätsgründen muss dabei dem betrachteten Raum Außenluft mit einem Massenstrom entsprechend dem abgeleiteten Rauchgas-Massenstrom zugeführt werden.

Die Zuluftströmung ist das zweite, zu betrachtende Strömungsgebiet. Üblicherweise wird die Zuluft durch Öffnungen in den Seitenwänden im Bodenbereich dem Brandraum strahlartig zugeführt. Hierbei handelt es sich im Allgemeinen um einen so genannten Bodenstrahl, bei dem lediglich einseitig (bei ebenen Strahlen) bzw. dreiseitig (bei Öffnungen mit begrenzter lateraler Erstreckung) Hallenluft eingemischt wird. Die Mittengeschwindigkeit von Bodenstrahlen nimmt mit der Lauflänge deutlich weniger ab als bei Freistrahlen. Für den in Bild 1 dargestellten ebenen

Zuluftstrahl der Höhe 2 m beträgt in einer Entfernung von 40 m von der Zuluftöffnung die Mittengeschwindigkeit immer noch das 0,7fache der Geschwindigkeit in der Zuluftöffnung.

Das dritte Strömungsgebiet ist die Raumströmung. Ihr »Antrieb« ist ihr turbulenter Impulsaustausch mit dem Plume und insbesondere mit dem Zuluftstrahl. Im Allgemeinen ist der Einfluss der Zuluftströmung auf die Raumströmung deutlich größer als derjenige der Plume-Strömung. Gründe hierfür sind zum einen die größere Austauschfläche des Zuluftstrahles wegen der großen »Wurfweite« und zum anderen die häufig beobachteten großen Zuluftgeschwindigkeiten (max. 3 m/s nach DIN 18232-6 bzw. 5 m/s nach prEN 12101-5), die etwa gleich groß oder sogar größer als die Aufstiegsgeschwindigkeiten im Plume sind.

Eine Trennung zwischen Rauchgaspolster und raucharmer Hallenluft ist nur dann gegeben, wenn an der Trennebene nur ein geringer Massenaustausch stattfindet, die Trennebene also stabil ist. Da im Bereich der Trennebene die Geschwindigkeiten der Raumströmung und der Strömung im Rauchgaspolster unterschiedlich groß sind, ergibt sich dort eine Scherströmung. Ähnlich wie an der Oberfläche von Strahlen ist auch in der Scherschicht zwischen Raumluft und Rauchgaspolster der Impuls- und Massenaustausch turbulent. Wird in der Scherschicht hinreichend Rauchgas in die Raumströmung eingemischt, führt diese zu einer raschen Verrauchung auch der bodennahen Bereiche. Der Stabilität der Trennebene von Rauchgaspolster und Raumluft kommt daher große Bedeutung bei der Auslegung von Maßnahmen zur Sicherstellung einer raucharmer Schicht im Bodenbereich zu.

Die strömungstechnische Kennzahl zur Beschreibung der Stabilität geschichteter Strömungen ist die Richardson-Zahl:

$$Ri = \frac{g \partial T / \partial z}{T_0 (\partial u / \partial z)^2} \quad (1)$$

Es bedeuten  $\partial T / \partial z$  den Temperaturgradienten senkrecht zur Trennebene,  $T_0$  die Raumlufttemperatur und  $\partial u / \partial z$  den Geschwindigkeitsgradienten der horizontalen Geschwindigkeit senkrecht zur Trennebene. Die Richardson-Zahl gibt also das Verhältnis der Auftriebskraft zur Trägheitskraft im Bereich der Trennebene wieder, siehe schematische Detaildarstellung in Bild 1. Schlichting (1965) gibt als kritische Richardson-Zahl, bei deren Unterschreitung die Trennebene instabil und somit der Massenaustausch deutlich vergrößert wird,  $Ri_{krit} = 0,25$  an. Ansätze zur Erfassung dieses Massenaustausches in Abhängigkeit von den Geschwindigkeiten der Raumluft und des Rauchgases finden sich in Heins (1991). Sie vernachlässigen jedoch vollständig die Raumströmung.

Das bei realen Brandgeschehen oder bei Modelluntersuchungen beobachtete und oben beschriebene Strömungsfeld ist selbst für einfache Raumgeometrien äußerst komplex. Soll das Strömungsfeld vollständig mathematisch beschrieben werden, ist die Lösung der zugrunde liegenden Differenzialgleichungen, nämlich

- Kontinuitätsgleichung,
  - Energiegleichung,
  - Bewegungsgleichung (Navier-Stokes-Gleichung),
- erforderlich. Besonders schwierig ist die Lösung der Navier-Stokes-Gleichung, einer partiellen, nicht linearen Differenzialgleichung. Für den vorliegenden Fall der komplexen, turbulenten Strömung im Brandraum lässt sie sich nur

numerisch und nur unter erheblichen Vereinfachungen lösen, siehe Abschnitt 3.1.

Der Windeinfluss ist ein weiterer Parameter, welcher einer rechnerischen Vorhersage der gewünschten raucharmer Schicht in Bodennähe entgegensteht. Die Verdrängung der Windströmung durch das betrachtete Bauwerk führt zu Winddrücken im Bereich der Zuluft- und Entrauchungsflächen, welche sich nur für sehr einfache Gebäudegeometrien und nur im zeitlichen Mittel rechnerisch angeben lassen. Der Massenstrom an diesen Öffnungen ist jedoch in erheblichem Maß von der böenbedingten Instationarität abhängig, siehe Straw et al. (2001). Die rechnerische Bestimmung des instationären Druckfeldes selbst an isoliert stehenden, einfachen, quaderförmigen Baukörpern ist nur mit sehr komplexen Rechenverfahren mit der gewünschten Genauigkeit möglich, Murakami (1993, 1997).

### 3 Lösungsansätze

#### 3.1 NUMERISCHE MODELLIERUNG

Bei den numerischen Modellen unterscheidet man in Zonenmodelle und Feldmodelle. Zonenmodelle beruhen auf der Lösung der Kontinuitäts- und Energiegleichung. Sie beinhalten also nicht die Bewegungsgleichung (Navier-Stokes-Gleichung) der Strömungsmechanik. Der Strömungsvorgang wird im Zonenmodell lediglich durch die Massenströme ausgedrückt. Das Ersatzschaltbild für den physikalischen Vorgang nach Bild 1 ist die Darstellung in Bild 2a. Setzt man dies in ein Stromlinienbild um, so ergibt sich die Darstellung in Bild 2b. Der physikalische Vorgang nach Bild 1 wird also durch das Zonenmodell völlig unrealistisch wiedergegeben.

Während sich mit Zonenmodellen im Allgemeinen recht genau die thermische Belastung von Bauteilen berechnen lässt, eignen sie sich nur über empirische Ansätze zur Beurteilung der Rauchableitung. Insbesondere versagen diese Modelle, wenn die Rauchgaströmung durch die Raumströmung in erheblichem Maße beeinflusst wird. Da Zonenmodelle jedoch nicht erkennen lassen, ob eine intensive Raumströmung zu erwarten ist, ist die Übertragbarkeit der gewonnenen Ergebnisse auf reale Brandgeschehen a priori nicht bekannt. Die Erarbeitung von Entrauchungsmaßnahmen zur Sicherstellung von z. B. Flucht- und Rettungswegen auf der Basis von Zonenmodellen birgt also erhebli-

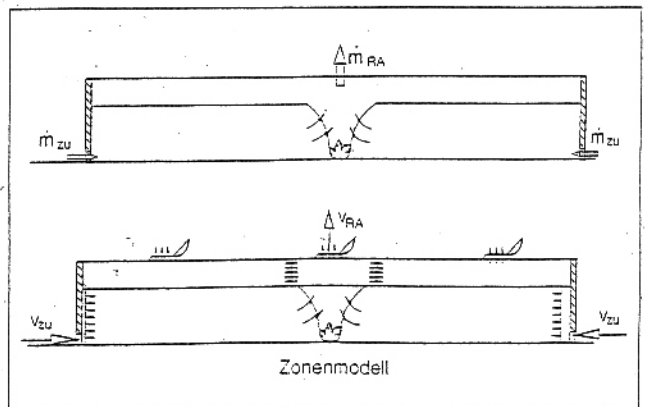


BILD 2 Darstellung der Strömung in Bild 1 bei der Berechnung mittels Zonenmodell  
a) Modellvorstellung  
b) Umsetzung der Modellvorstellung als Strömungsbild

che Risiken. Aus strömungstechnischer Hinsicht sind Zonenmodelle ohne weitere Angabe von Randbedingungen, z. B. im Hinblick auf maximale Zuluftgeschwindigkeiten, daher als völlig ungeeignet zur Beurteilung von Entrauchungsströmungen bei komplexeren Raumgeometrien zu betrachten.

Häufig wird die Anwendbarkeit von Zonenmodellen zur Auslegung einer natürlichen Entrauchung damit begründet, dass dies auch Grundlage der Angaben in DIN 18232-2 ist und dieses Regelwerk sich in der Vergangenheit bewährt hat. Diese Begründung ist nicht stichhaltig, da die Auslegedaten der DIN 18232-2 auf den experimentellen Untersuchungen von Thomas et al. (1963) – aber nicht auf einem Zonenmodell – beruhen. Es ist für die weiteren Betrachtungen nützlich, die wesentlichen Randbedingungen dieser Grundlagenarbeit zu wiederholen:

- 1) Die Zuluftflächen waren bei den Experimenten von Thomas et al. (1963) so bemessen, dass der Einströmpuls vernachlässigbar ist, sich also keine Raumströmung einstellt. Das Verhältnis der geometrischen Flächen betrug  $A_{zu}/A_{NRA} = 3,6$  bis  $25,5$ , siehe Bild 3, die in Anlehnung an Fig. 2 der Arbeit von Thomas et al. (1963) erstellt wurde.
- 2) Die Raumluft befindet sich näherungsweise in Ruhe, d. h. der Geschwindigkeitsgradient an der Trennebene von Rauchgaspolster und Raumluft ist nur durch die sehr geringe Geschwindigkeit der Rauchströmung zur NRA bedingt.
- 3) Die Trennebene zwischen Rauchgaspolster und Raumluft ist nicht gestört, d. h. die Einmischung von Rauch in die Raumluft ist vernachlässigbar klein.
- 4) Wärmeverluste an den Umfassungswänden können vernachlässigt werden. Dies wurde bei den Versuchen dadurch erreicht, dass die Umfassungswände wärmeisoliert waren.

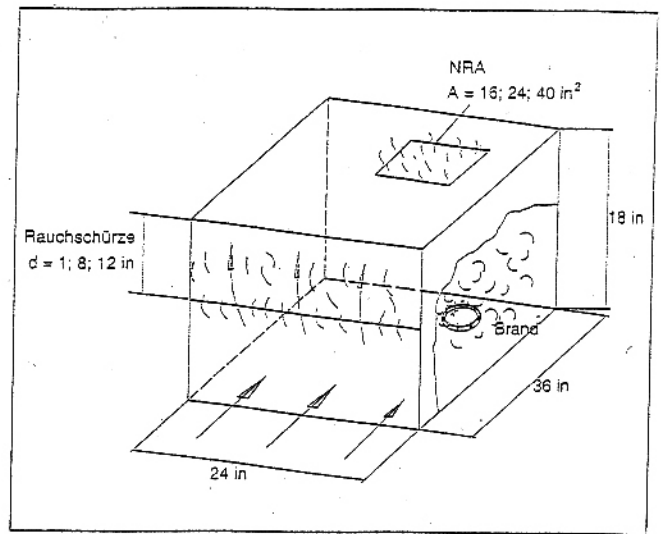


BILD 3 Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus von Thomas et al. (1963)

dieser handelt es sich, wie erwähnt, um eine partielle, nicht lineare Differenzialgleichung, welche nur für wenige Sonderfälle analytisch gelöst werden kann. Für turbulente Strömungen, wie sie bei Brandgeschehen immer vorliegen, lässt sie sich auch numerisch nur unter weitreichenden Annahmen lösen. Die meisten Turbulenzmodelle beruhen auf Lösungsansätzen, die von Prandtl, siehe Prandtl et al. (1990), in den 30er-Jahren entwickelt wurden. Kritisch im Hinblick auf die numerische Lösung der Navier-Stokes-Gleichung ist beispielsweise die Einmischung in der Scherschicht zwischen Rauchgaspolster und Raumströmung. Hierauf wurde von Heins (1991) bereits hingewiesen. Zur Berechnung der Strömungsvorgänge ist hierbei die Angabe experimentell bestimmter Einmischzahlen erforderlich. Sie berücksichtigen meist nicht die geometrischen Randbedingungen komplexer Räume.

Ein besonderes Problem, das von den Anbietern und Nutzern von Feldmodellen nicht angesprochen wird, ist die Abhängigkeit der Einmischung in der Scherschicht zwischen Rauchgaspolster und Raumströmung von der Größe der Turbulenzballen. Eine realitätsnahe Simulation der dortigen Strömung setzt also voraus, dass die Turbulenzballen richtig skaliert sind. Es ist zu bezweifeln, ob dies mit den üblichen Turbulenzmodellen, welche von einer isotropen Turbulenzintensität ausgehen, erreicht wird.

In der vergangenen Dekade sind erhebliche Anstrengungen unternommen worden, die Navier-Stokes-Gleichung auch für turbulente Strömungen numerisch zu lösen. Die hierbei entwickelten numerischen Modelle werden als CFD (= Computational Fluid Dynamics)-Modelle bezeichnet. Die Verfeinerungen bei der Turbulenzmodellierung führen zu einer erheblichen Vergrößerung der Rechnerzeit. Die Berechnung der Rauchgasströmung im Brandfall in nicht allzu komplexen Räumen erfordert dabei auf Hochleistungsrechnern typischerweise mehrere Tage.

Die Problemzonen bei der Anwendung von CFD-Modellen zur Prognose einer gesicherten Rauchableitung in komplexen Räumen wird von den Anwendern dieser Modelle im Allgemeinen nicht offengelegt. So erfordert die Nachbildung eines komplexen Raumes durch eine geeignete Gitterstruktur, für deren Zellen der Strömungszustand berechnet werden soll, einen erheblichen Aufwand.

Die Bedeutung der oben angegebenen Randbedingungen wurde von Thomas et al. (1963) eingehend diskutiert. Dabei sind besonders die Bedingungen 1) bis 3), welche die Richardson-Zahl beeinflussen, von Bedeutung. Es wird von Thomas et al. (1963) betont, dass eine hinreichend große Richardson-Zahl nur erreichbar ist, wenn die Geschwindigkeiten im Rauchgaspolster und im Raum hinreichend klein sind. Um die Einhaltung dieser Randbedingungen sicherzustellen, wurde in der ursprünglichen Fassung der DIN 18232-2 (Ausgabe November 1989) gefordert, dass die Zuluftfläche doppelt so groß wie die NRA-Fläche sein sollte. Allerdings wurde auch bei der Erarbeitung dieses Regelwerkes nicht überprüft, ob die so definierte Zuluftfläche, welche immer noch kleiner als die kleinste von Thomas et al. (1963) untersuchte Zuluftfläche war, ausreichend ist. Vielmehr wurde in der Zwischenzeit auf der Basis von Berechnungen mit Zonenmodellen, Dobbernack, R. (1992): Dokument NABau 12.02.Nr. 6-92 des NABau-AA 12.02 zu DIN 18232, der Entwurf zu DIN 18232-2 (1992) dahingehend geändert, dass eine reduzierte Zuluftfläche,  $A_{zu} = A_{NRA}$ , ausreichend ist. Dass die Anforderung an die Zuluftfläche nicht die Raucharmheit der Flucht- und Rettungswege sicherstellt, wird von Brandschutzsachverständigen und insbesondere von Branddirektionen beklagt, z. B. Czech (2000).

Feldmodelle geben die numerische Lösung der gekoppelten Kontinuitätsgleichung, Energiegleichung und Navier-Stokes-Gleichung wieder. Besondere Schwierigkeit bereitet dabei die Lösung der Bewegungsgleichung. Bei

Ist das Gitter zu grobmaschig, d. h. werden möglicherweise entscheidende Einzelheiten der Raumgeometrie nicht nachgebildet, kann strömungstechnische Ähnlichkeit zwischen modellierter Strömung und der Realität nicht erwartet werden. Wird andererseits, zumindest in Teilbereichen, ein sehr kleinzelliges Gitter verwendet, um die nötige Detaillierung sicherzustellen, ergeben sich unter Umständen Instabilitäten der numerischen Lösung, auf jeden Fall jedoch große Rechenzeiten. Auf die Schwachpunkte numerischer Simulationen von Raumluftströmungen machte z. B. Zeller (1999) aufmerksam. Er wies darauf hin, dass die verfügbaren Programme nicht für routinemäßige Anwendungen geeignet sind. Brandbedingte Raumströmungen mit deutlichen Temperaturschichtungen sind erheblich komplexer als Raumströmungen der Klimatechnik. Um so verwunderlicher ist die Zuversicht, mit welcher im vorbeugenden Brandschutz die Prognosesicherheit von Feldmodellen vertreten wird, siehe z. B. Könnecke (2001). Die größere Vorsicht beim Einsatz von CFD-Berechnungen in der Klimatechnik könnte evtl. auch dadurch bedingt sein, dass die prognostizierten und zumeist garantierten Leistungsdaten des Planungsstadiums nach Realisierung durch Abnahmemessungen überprüft werden.

Meist wird das Brandgeschehen und die Rauchgasströmung mit Feldmodellen oder CFD-Modellen nur bei Windstille berechnet. Kalmen treten jedoch im moderaten Klima Mitteleuropas an lediglich ca. 5 % des Jahreszeitraumes auf. Die Vernachlässigung des Windeinflusses ist also nicht zulässig. Wird jedoch der Windeinfluss in einer numerischen Berechnung berücksichtigt, geht man von einem stationären Winddruckfeld an den NRA- und Zuluftflächen aus. Es wird also der Böigkeit des natürlichen Windes keine Rechnung getragen. Diese vereinfachende Annahme ist nicht nur realitätsfern, sie führt auch zu erheblichen Fehlern bei der Berechnung der Entrauchungswirksamkeit. Dies wurde für den sehr einfachen Fall der Be- und Entlüftung des Innenraumes eines Kubus aufgezeigt, siehe z. B. Straw et al. (2001). Je nach Lage der Öffnungen im Kubus wird die Lüftungseffektivität bei Annahme stationärer Bedingungen unter- oder überschätzt.

Bei Gebäuden in dicht bebauten Gebieten, z. B. Stadtteilen, wird die Druckfluktuation um ein Gebäude nicht nur durch die Böigkeit des atmosphärischen Windes, sondern auch durch die Wirbelablösungen an den benachbarten Gebäuden bestimmt. Selbst modernste CFD-Methoden versagen zur Zeit vollständig bei der Berechnung der Strömungsfelder in dicht bebauten Regionen, siehe Röckle et al. (1998). Trotz enormer Anstrengungen von Windingenieuren und Strömungsmechanikern in den vergangenen Jahren, verlässliche und praktikable Methoden zur Strömungsfeldberechnung bei der Umströmung von Gebäuden und der Raumströmung in Gebäuden, welche durch Windwirkung beeinflusst werden, zu erarbeiten, ist bisher ein Durchbruch nicht gelungen und zeichnet sich auch in den nächsten Jahren nicht ab. Um so erstaunlicher ist es, dass von nicht strömungstechnischen Anwendern derartige Modelle als ausgereift betrachtet und daher für sicherheitsrelevante Prognosen angewendet werden.

### 3.2 PHYSIKALISCHE MODELLIERUNG

Die Strömungsmechanik als eigenständiges Arbeitsgebiet mit zahlreichen wichtigen Anwendungsbereichen existiert seit etwa 100 Jahren. Strömungstechnische Entwicklungen sind weitestgehend geprägt durch theoretische

Überlegungen, experimentelle Modellstudien und – auch in jüngster Vergangenheit nur in geringem Maße – durch numerische Lösungen. Dies gilt z. B. für hoch turbulente Strömungen mit Ablösezonon und insbesondere, wenn bei derartigen Strömungen unterschiedlich skalige Turbulenzen aufeinander treffen. Die relevanten Ähnlichkeitskriterien, deren Einhaltung erforderlich ist, um die Ergebnisse von Modellstudien auf die Großausführung übertragen zu können, wurden frühzeitig abgeleitet und ihre Gültigkeit nachdrücklich in vielen Anwendungsbereichen z. B. Luftfahrttechnik, Fahrzeugaerodynamik, Bauwerksaerodynamik etc., nachgewiesen. Die zur Simulation von Brandgeschehen im Modellmaßstab einzuhaltenen Ähnlichkeitskriterien wurden von Gerhardt (2000) aufgezeigt und diskutiert. In den hauptsächlich interessierenden Bereichen außerhalb der Strömungsgrenzschichten im Wandbereich ist die Einhaltung der Archimedes-Ähnlichkeit ausreichend. Es muss also im Modellversuch das Verhältnis von Auftriebs- zu Trägheitskräften nachgestellt werden, wie es in realen Brandgeschehen vorliegt. Ferner ist die Temperaturrandbedingung an den Umfassungswänden zu beachten.

Im Allgemeinen müssen Modellstudien bei unvollständiger Ähnlichkeit durchgeführt werden, d. h. nicht alle Ähnlichkeitsbedingungen können gleichzeitig erfüllt werden. Diese Vorgehensweise ist unbedenklich, wenn einzelne Ähnlichkeitsparameter vernachlässigbar sind. So ist beispielsweise in der Entwicklung von Tragflügelprofilen für Anwendungen mit Geschwindigkeiten unterhalb etwa 500 km/h die Kompressibilität der Luft vernachlässigbar. Profilaerodynamische Untersuchungen werden daher ohne Berücksichtigung des Kompressibilitätseinflusses, d. h. ohne Beachtung der Mach'schen-Ähnlichkeit, durchgeführt. Ein weiteres Beispiel für die erfolgreiche Anwendung der unvollständigen Ähnlichkeit sind thermikbedingte Strömungen in großen Räumen, wie sie in der Klimatechnik und bei Bränden vorkommen. Selbstverständlich ist nachzuweisen, dass die Ergebnisse von Modellstudien bei unvollständiger Ähnlichkeit auf die Großausführung übertragbar sind. Dies wurde, entgegen den Behauptungen der Anwender von CFD-Modellen im vorbeugenden Brandschutz, siehe z. B. Könnecke (2001), in umfangreichen Untersuchungen, z. B. Mülleijans (1973) und Rolloos (1978), für Raumströmungen der Klimatechnik getan. Die Anwendbarkeit der unvollständigen Modellähnlichkeit – Einhaltung der Archimedes-Ähnlichkeit, Vernachlässigung der Reynolds-Ähnlichkeit – für Rauchableitungen im Brandfall wurde durch zahlreiche Vergleiche von Modellstudien mit Realversuchen erbracht, siehe z. B. Czech (1999) und Wilk (2001). Besonders sei darauf verwiesen, dass die für die Betrachtung von Rauchableitungen grundlegenden Untersuchungen von Thomas et al. (1963) an kleinen Modellen durchgeführt wurden.

Bei der Institut für Industrieaerodynamik GmbH (I.F.I.) haben gerade Arbeiten begonnen, bei denen die Ähnlichkeit des Strömungsfeldes bei der Rauchableitung im Brandfall auch für kleine Modelle (Maßstab  $M \approx 1:50$ ) untersucht werden soll. Dabei ist vorgesehen, reale Brandgeschehen, die in der Forschungsstelle für Brandschutztechnik Karlsruhe (FfB) untersucht wurden, in kleinen Modellen nachzustellen. Ein Schwerpunkt der Modellstudie ist die Überprüfung des Einflusses der thermischen Randbedingung auf die Rauchableitung. Über die Ergebnisse soll in Kürze in einer weiteren Veröffentlichung berichtet werden.



## 4 Beurteilung und Grenzen

### 4.1 NUMERISCHE VERFAHREN

Ein wesentlicher Vorteil der numerischen Simulation von Brandgeschehen ist die Möglichkeit, die thermischen Einflüsse zu erfassen. Da sowohl Zonen- als auch Feldmodelle die Energiegleichung beinhalten, können die Wärmefreisetzung des Brandes, die Wärmestrahlung – z. B. vom Brandherd zu den Umfassungswänden und von der Decke zu den Wänden und zum Boden – und die konvektiven Wärme-flüsse an den Umfassungswänden berücksichtigt werden. Allerdings sei darauf hingewiesen, dass die jeweils angenommenen Brandszenarien nur Näherungen möglicher Brandgeschehen darstellen. Die Unsicherheitsmarge der thermischen Annahmen – und somit auch der thermischen Randbedingungen – ist dabei vergleichsweise groß. Dies lässt sich allein daran erkennen, dass bei der nationalen und internationalen Normung nur grobe Angaben im Hinblick auf die anzusetzende Wärmefreisetzung bei der Auslegung von Rauchableitungsmaßnahmen gemacht werden. Bei den Feldmodellen ist ferner, wie erwähnt, die Turbulenzmodellierung und die Nachstellung komplexer Räume problematisch. Auch mit den fortschrittlichsten CFD-Modellen lässt sich der äußere Windeinfluss und hier insbesondere die Instationarität des Druckfeldes sowohl an einfachen als auch besonders an komplexen Gebäudeformen nicht mit der erforderlichen Genauigkeit simulieren.

Zonenmodelle sind, da sie die Bewegungsgleichung der Strömungsmechanik nicht enthalten, ohne weitere Einschränkungen, z. B. bezüglich der Zuluftgeschwindigkeit und der Raumgeometrie, ungeeignet, um verlässliche Angaben zur Rauchableitung bei komplexer Raumgeometrie und/oder unter Berücksichtigung des Windeinflusses zu machen. Feldmodelle beinhalten zwar die Bewegungsgleichung der Strömungsmechanik, im Hinblick auf die Turbulenzmodellierung müssen jedoch weitreichende vereinfachende Annahmen getroffen werden. Da die Raumströmung bei komplexen Geometrien wesentlich durch die Turbulenz bestimmt wird und diese im Allgemeinen anisotrop ist, ist die Anwendbarkeit der üblichen Turbulenzmodelle äußerst zweifelhaft. Sie sollte daher für den jeweiligen Anwendungsfall experimentell überprüft werden.

Eine Validierung von Feldmodellen liegt im Allgemeinen nur für wenige Sonderfälle vor. Eine generelle Validierung wurde bisher für kein Feldmodell oder CFD-Modell vorgelegt. Ein Vergleich der Berechnung definierter Brandgeschehen in definierten Räumen mit den unterschiedlichen Feld- und CFD-Modellen unter Berücksichtigung des Windeinflusses wäre wünschenswert. Ein solcher Vergleich bei der windbedingten Schadstoffausbreitung in bebautem Gebiet hat im Rahmen des PEF-Projektes »Europäisches Forschungszentrum für Maßnahmen zur Luftreinhaltung« stattgefunden. Bei den kritischen Kurzzeit-Immissionswerten ergaben sich Unterschiede um etwa einen Faktor 10, Röckle et al. (1998).

### 4.2 EXPERIMENTELLE VERFAHREN

Die experimentelle Versuchsmethodik der Strömungsmechanik kann mit einem Analogrechner verglichen werden. Dabei wird die Kontinuitätsgleichung und die Bewegungsgleichung »richtig« gelöst, wenn die wesentlichen Ähnlichkeitskriterien eingehalten werden. Bei thermikbedingten Strömungen, wie sie in der Klimatechnik und der

Rauchableitung bei Brandgeschehen vorliegen, sind dies die Archimedes- und Reynolds-Ähnlichkeit. In früheren Arbeiten, z. B. Müllejans (1973) und Rolloos (1978), wurde experimentell nachgewiesen, dass das Strömungsfeld wesentlich nur durch die Archimedes-Ähnlichkeit bestimmt wird und die Reynolds-Ähnlichkeit vernachlässigt werden kann. Es ist also ausreichend, mit einer unvollständigen Ähnlichkeit zu arbeiten, wie dies in vielen Bereichen der Strömungsmechanik mit Erfolg praktiziert wird.

Bei den experimentellen Verfahren werden üblicherweise die thermodynamischen Einflüsse lediglich im Bereich des Plumes durch die Modellierung des thermischen Auftriebes berücksichtigt. Die thermodynamische Randbedingung an den Umfassungswänden kann nach Müllejans (1973) durch den Temperaturveränderungsgrad berücksichtigt werden. Dies ermöglicht die Auswahl einer modellgetreuen Plume-Strömung – Gasgemisch (z. B. Helium/Luft) und Gastemperatur – um die thermischen Randbedingungen eines realen Brandgeschehens modellgetreu zu simulieren. Es sei nochmals darauf verwiesen, dass die Grundlagenuntersuchungen von Thomas et al. (1963) an Modellen mit isolierten Umfassungswänden zur Reduzierung der Rauchgasabkühlung durchgeführt wurden. In der Beurteilung dieser Einflussgröße weisen sie darauf hin, dass die Temperaturen im Rauchgaspolster nicht unter etwa 50 °C sinken sollten. Wird für Modelluntersuchungen lediglich erwärmte Luft, welcher zur Strömungssichtbarmachung ein Nebelfluid beigemischt wird, verwendet, so lässt sich diese Randbedingung nicht einhalten. Das der Randbedingung von Thomas et al. (1963) entsprechende Dichteverhältnis  $\rho_{\text{BrL}}/\rho_{\text{L}} \approx 0,9$  lässt sich unter Verwendung eines Helium/Luft-Gemisches zur Simulation der Brandgase jedoch leicht sicherstellen.

Ein wesentlicher Vorteil der physikalischen Modellierung ist die modellgetreue Nachbildung der Windwirkung. Hierzu ist die Messung der Druck/Zeit-Verläufe in so genannten Grenzschichtwindkanälen erforderlich. Dabei ist außer dem betrachteten Gebäude dessen Umgebungsbebauung nachzustellen. Über die erforderlichen Maßnahmen zur Simulation der atmosphärischen Windströmung in Grenzschichtwindkanälen liegen mit der WtG-Richtlinie umfangreiche Informationen vor. Diese Richtlinie wurde im Rahmen der Qualitätssicherung von der Windtechnologischen Gesellschaft (WtG) erarbeitet. Werden die Rauchableitungsuntersuchungen an größeren Modellen (Maßstab  $M \geq 1:100$ ) oder an Teilmodellen durchgeführt, müssen die im Grenzschichtwindkanal gemessenen Druck/Zeit-Verläufe unter Berücksichtigung des geänderten Zeitmaßstabes bei den Entrauchungsuntersuchungen simuliert werden.

## 5 Literatur

- Czech, K.J. (1999): Praktische Erfahrungen zur Entrauchung von Gebäuden, VdS Fachtagung »Ingenieurmäßige Verfahren im Brandschutz«, VdS Schadenverhütung, Köln
- Czech, K.J. (2000): Brandschutz durch Rauchabzüge und Sprinkler, Brandschutz 1/2000, Bertelsmann Fachzeitschriften GmbH
- Gerhardt, H.J. (2000): Experimentelle Entrauchungsstudie – Prognosen und Abnahmeversuche, VDI-Bericht Nr. 1560, S. 17–37
- Gerhardt, H.J. und Krüger, O. (2000): Experimentelle Untersuchungen zur Entrauchung großer Räume unter besonderer Beachtung des Windeinflusses; in: VFDB-Zeitschrift, Verlag W. Kohlhammer (Hrsg.), Heft 2, Mai 2000, S. 47–54
- Heins, Th. (1991): Simulationsmodell zur sicherheitstechnischen Beurteilung der Rauchausbreitung bei Bränden in ausgedehnten Räumen, Diss. TU Braunschweig
- Hosser, D., Dobbernack, R. und Siegfried, W. (1997): Rauchabzug in