Bau<u>forschung</u>

Entrauchung – Grundlagen

- Bd. A. Entrauchungsanlagen
- Bd. B. Überdruckbelüftungsanlagen für Sicherheitstreppenräume in Hochhäusern

Т 3029

Fraunhofer IRB Verlag

T 3029

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die Originalmanuskripte wurden reprotechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprotechnischen Eignung des Originalmanuskriptes ab, das uns vom Autor bzw. von der Forschungsstelle zur Verfügung gestellt wurde.

Im Originalmanuskript enthaltene Farbvorlagen, wie z.B. Farbfotos, können nur in Grautönen wiedergegeben werden. Liegen dem Fraunhofer IRB Verlag die Originalabbildungen vor, können gegen Berechnung Farbkopien angefertigt werden. Richten Sie Ihre Anfrage bitte an die untenstehende Adresse.

© by Fraunhofer IRB Verlag

2004, ISBN 3-8167-6533-5

Vervielfältigung, auch auszugsweise, nur mit ausdrücklicher Zustimmung des Verlages.

Fraunhofer IRB Verlag

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69 70504 Stuttgart

Nobelstraße 12 70569 Stuttgart

Telefon (07 11) 9 70 - 25 00 Telefax (07 11) 9 70 - 25 08

E-Mail irb@irb.fraunhofer.de

www.IRBbuch.de



.

Forschungs- und Versuchslabor des Lehrstuhls für Bauklimatik und Haustechnik der Technischen Universität München Univ.-Prof. Dr.-Ing. Gerhard Hausladen

> Forschungslabor für Haustechnik der Techn. Universität München Karl-Benz-Straße 15 D-85221 Dachau Tel. 08131/2 00 40 Fax 08131/2 00 00 Lehrstuhl: Tel. 089/289-22475 Fax 089/289-23851

März 2003

Bericht über das Forschungsvorhaben

Rauchfreihaltung/Entrauchung von Räumen und Gebäuden Grundlagenermittlung für die Erstellung bauaufsichtlicher Richtlinien Kurztitel: Entrauchung - Grundlagen

Band A Entrauchungsanlagen

Forscher©: Jörg Zitzelsberger Dieter Ostertag Josef Kuhn

Erstellt im Auftrag des Deutschen Instituts für Bautechnik (DIBt) in Berlin mit großzügiger finanzieller Unterstützung durch die Friedrich-Schiedel-Stiftung und die Firma Trox, Neukirchen-Vluyn

Aktenzeichen beim DIBt: P 32-5-18.20-940/00

Zum Inhalt

In modernen baulichen Anlagen ist vielfach die Ableitung von Brandrauch über Fenster oder andere Öffnungen nicht möglich; z. B. bei großen Raumtiefen, in unterirdischen Anlagen oder in Atrien. Es werden vielmehr Einrichtungen zur Ableitung von Brandrauch erforderlich, um den bauaufsichtlichen Grundsatzanforderungen, die Rettung von Menschen und Tieren sowie Löschmaßnahmen zu ermöglichen, gerecht zu werden. Man unterscheidet Entrauchungsanlagen und Überdruckbelüftungsanlagen. Die Bemessung erfolgt wegen der baulichen Vielfalt in jedem Einzelfall und bislang nach uneinheitlichen Gesichtspunkten. Meinungsunterschiede bestehen bezüglich des Anforderungsniveaus und bezüglich der geeigneten Nachweisverfahren.

Eine umfangreiche Literaturrecherche ergab, dass viele Wirkungen von Bränden und von Brandrauch erforscht sind, Teilaspekte aber auf ihre Erforschung harren. In den verschiedenen Staaten bestanden unterschiedliche Forschungsschwerpunkte und unterschiedliche Auffassungen zur rechnerischen Formulierung des Brandgeschehens. Einheitliche Auffassung besteht über die positive Wirkung von Entrauchungsanlagen, die Gegenstand des vorliegenden Bandes A zum Forschungsvorhaben sind. Der Band B befasst sich mit Überdruckbelüftungsanlagen.

In neuesten bauaufsichtlichen Richtlinien (Industriebaurichtlinie, Versammlungsstättenrichtlinie) werden erstmals Anforderungen gestellt, deren Erfüllung rechnerisch nachzuweisen ist. Es wird ingenieurmäßiges Vorgehen erwartet, über die anzuwendenden Rechenverfahren bislang aber Nichts ausgesagt.

Der vorliegende Band A behandelt die Schutzziele und die Anwendungsbereiche für Entrauchungsanlagen in Gebäuden. Die Bemessungsgrundlagen für Entrauchungsanlagen werden schrittweise aufgezeigt. Ausgehend von den anzusetzenden Brandszenarien über die Zunahme der Rauchgasmengen innerhalb des Gebäudes und zur Brandgasableitung aus Gebäuden werden für die einzelnen Schritte bis zur Bemessung von Entrauchungsanlagen die erforderlichen Algorithmen mit ihren Anwendungsgrenzen angegeben. Es folgen Hinweise zur baulichen Ausführung von Entrauchungsanlagen und schließlich Vorschläge für die bauaufsichtliche Behandlung.

Es folgen eine Zusammenfassung und ein Literaturnachweis mit 138 Quellenangaben.

About the content

In modern buildings the extraction of smoke through windows or other openings is not possible, for example in very large rooms, in underground facilities or in atria. Instead equipment to remove smoke is required to comply with basic building regulations, to enable people and animals to be rescued and to enable fire fighters to gain access to the area to fight the fire. A distinction is made between smoke extraction systems and pressure ventilation systems. As a result of the wide range of designs, every system must be designed to meet the requirements of the specific application and in the past this has meant that there is a lack of standard design aspects. Differences of opinion exist regarding the level of requirements and regarding suitable verification procedures.

Extensive literature research has shown that many effects of fires and smoke have been researched, but some aspects are still awaiting research. Various countries have seen research focus of different aspects and different views on the calculated formulation of the processes of a fire. The only standard view centres on the positive effect of smoke extraction systems, which are covered in this volume A of the research project. Volume B then looks at pressure ventilation systems.

The latest building regulations (Industrial Building Directive and Public Areas Directive) for the first time make requirements compliance with which must be verified by calculations. Engineering procedures are required for this but no details are given of the calculation methods that must be used.

This volume A looks at the protection objectives and the applications for smoke extraction systems in buildings. The design basis for smoke extraction systems is described step by step. Starting from various fire scenarios resulting in the increase in smoke volumes within the building and the extraction of this smoke from buildings, the required algorithms for the various steps up to the design of the smoke extraction systems are described, along with details of the limits of their applications. This is followed by notes on the construction of smoke extraction systems and finally there are suggestions for building regulations procedures.

The above is then followed by a summary and a bibliography containing 138 source references.

Sur le contenu

Dans les installations de construction modernes, la dérivation de la fumée d'incendie par les fenêtres ou d'autres ouvertures n'est souvent pas possible, par exemple, lors de grandes profondeurs de pièces, dans les installations souterraines ou dans les atriums. Des dispositifs destinés à évacuer la fumée deviennent au contraire nécessaires afin de permettre les exigences fondamentales de la surveillance des chantiers, le sauvetage des personnes et des animaux ainsi que les mesures d'extinction. On différencie entre les installations d'évacuation de fumée et les installations de ventilation sous surpression. Le dimensionnement est exécuté pour chaque cas individuel en raison de la diversité constructive et, jusqu'à présent, selon des points de vue désunis. Les différences d'opinion ont pris naissance quant au niveau exigé et les procédés justificatifs appropriés.

Une recherche littéraire détaillée a montré que de nombreuses répercussions des incendies et de la fumée d'incendie ont été examinées, mais que des aspects partiels attendent d'être recherchés. Il existait dans les divers pays différents points principaux de recherche et différentes conceptions pour formuler l'événement d'incendie par des calculs. L'opinion globale persiste quant à l'effet positif des installations d'évacuation de fumée qui font l'objet du présent tome A sur le projet de recherche. Le tome B traite les installations de ventilation sous surpression.

Dans les directives les plus récentes de la surveillance des chantiers (directive de construction industrielle, directive des salles de réunion), on a posé pour la première fois des exigences dont la conformité peut être prouvée par des calculs. On s'attend à une procédure conforme aux règles d'ingénierie sur les procédés de calcul appliqués, mais aucune affirmation n'a été faite jusqu'à présent.

Le présent tome A traite les buts de protection visés et les domaines d'application pour les installations d'évacuation de fumée dans les bâtiments. Les bases du dimensionnement pour de telles installations sont montrées étape par étape. Les algorithmes nécessaires avec leurs limites d'application sont indiqués pour les étapes individuelles, en partant des scénarios d'incendie supposés, jusqu'au dimensionnement des installations d'évacuation de fumée, sans omettre l'augmentation des quantités de gaz de fumée à l'intérieur du bâtiment et l'évacuation des gaz d'incendie vers l'extérieur du bâtiment. Il s'en suit des remarques sur la réalisation constructive des installations d'évacuation de fumée et, pour finir, des propositions pour le traitement conformément à la surveillance des chantiers.

Ensuite, une récapitulation et un justificatif littéraire avec 138 indications de sources sont présentés.

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	1
	1.1 Historie	1
	1.1.1 Über die Entwicklung von Entrauchungsanlagen	1
	1.1.2 Über die Entwicklung von Druckbelüftungsanlagen	4
	1.2 Brandgeschehen und dessen Beeinflussung	4
	1.3 Zur Frage der Brandraumtemperatur bei Sprinklerung	7
	1.4 Rauchbewegung in Gebäuden im Brandfalle	8
2	Schutzziele und Anwendungsbereiche von Einrichtungen zur Rauch- und	
	Wärmeableitung in Gebäuden	11
	2.1 Bauaufsichtliche Grundsatzanforderungen	11
	2.2 Personenschutz	12
	2.2.1 Grundsätzliches	12
	2.2.2 Notwendige Verdünnung zur Erzielung ausreichender Sichtweite	13
	2.2.3 Notwendige Verdünnung zur Begrenzung der Wirkung schädlicher	13
	2.2.4 Mindogthähe der reugharmen Schicht	13
	2.2.4 Windesthöhe der Taucharmen Schent	13
	2.2.5 Ettraghenkensgrenzen für Wahne	17
	2.2.0 Temperatur in der Drandgassement über dem Rettungsweg	20
	2.5 Begrenzung der Brandausbreitung und Vermeiden / Verzögern des Flash-ov	er 20
	2.4 Degrenzung der Drandaussrentung und vermenden 7 verzogenn des Flash-ov	0120
	Richtlinien	21
	2.6 Anwendung von Druckbelüftungsanlagen und bestehende bauaufsichtliche Richtlinien	24
	Кюмписи	
3	Bemessungsgrundlagen für Entrauchungsanlagen	27
	3.1 Modellierung der Bemessungsschritte	27
	3.1.1 Allgemeines	27
	3.1.2 Einraum-Zonenmodell	29
	3.1.3 Mehrraum-Zonenmodelle	32
	3.1.4 Erhaltungssätze für Masse, Energie und Impuls	
	5.1.4 Emailungssalze für Wasse, Energie und impuls	34
	3.2 Der Brand als Bemessungsgrundlage	34 36
	 3.2 Der Brand als Bemessungsgrundlage	34 36 36
	 3.2 Der Brand als Bemessungsgrundlage	34 36 36 36
	 3.2 Der Brand als Bemessungsgrundlage	34 36 36 sen37
	 3.2 Der Brand als Bemessungsgrundlage	34 36 36 sen37 39
	 3.2 Der Brand als Bemessungsgrundlage	34 36 36 sen37 39 42
	 3.2 Der Brand als Bemessungsgrundlage	34 36 36 sen37 39 42 45
	 3.2 Der Brand als Bemessungsgrundlage	34 36 36 sen37 39 42 45 45
	 3.2 Der Brand als Bemessungsgrundlage	34 36 36 sen37 39 42 45 45 47
	 3.2 Der Brand als Bemessungsgrundlage	34 36 36 sen37 39 42 45 45 45 47 49

	3.2.4.1 Bemessungsbrände nach DIN 18232	51
	3.2.4.2 Bemessungsbrände nach prEN 12101-5	56
	3.2.4.3 Bemessungsbrände nach ISO/PDTR 13387-2	57
	3.2.4.4 Bemessungsbrände nach US-amerikanischen Richtlinien und Normen	61
	3.2.4.5 Bemessungsbrände nach britischer Literatur	64
	3.2.4.6 Berücksichtigung von Sprinkleranlagen nach deutscher Literatur	65
	3.2.4.7 Bemessungsbrände für Atrien	65
	3.2.5 Dauer von Bränden	66
	3.3 Anwachsen des Brandgasstromes innerhalb von Gebäuden	67
	3.3.1 Plume direkt über dem Feuer	69
	3.3.1.1 Flammenhöhe	69
	3.3.1.2 Plume über "großem" Feuer	72
	3.3.1.3 Plume über "kleinem" Feuer	74
	3.3.1.4 Übergangsbereich zwischen "großem" und "kleinem" Feuer	78
	3.3.1.5 Plume-Eigenschaften	83
	3.3.2 Rauchgasströmung aus einer Öffnung des Raumes heraus – Fenster-Plume	89
	3.3.2.1 Fenster-Plume in der Pre-flash-over-Phase	90
	3.3.2.2 Fenster-Plume in der Vollbrand-Phase	94
	3.3.3 Rauchgasströmung unter Vorsprüngen und Balkonen – Balkon-Plume	96
	3.3.4 Überström-Plume oder Spill-Plume	96
	3.3.4.1 Spill-Plumes mit freier Einmischung nach britischer Literatur	100
	3.3.4.2 An Fassaden anliegende Spill-Plumes nach britischer Literatur	101
	3.3.4.3 Spill-Plumes mit freier Einmischung nach US-amerikanischer Literatur.	102
	3.3.4.4 An Fassaden anliegende Spill-Plumes nach US-amerikanischer Literatur	:.102
	3.3.5 Verdünnung der Rauchgase	104
	3.4 Brandgasableitung aus Gebäuden	105
	3.4.1 Wirkungsweise natürlicher und maschineller Rauchabzüge	105
	3.4.1.1 Natürliche Rauchabzüge NRA	105
	3.4.1.2 Maschinelle Rauchabzüge (MRA)	105
	3.4.2 Rauchschicht	106
	3.4.2.1 Temperatur der Rauchschicht	106
	3.4.2.2 Mindestdicke der Rauchschicht	109
	3.4.3 Rauchschürzen	.110
	3.4.4 Abzugseinrichtungen	.111
	3.4.5 Zulufteinrichtungen	.118
	3.4.6 Äußere Einflüsse	.121
	3.5 Ungeeignete Bemessungsansätze	.122
	3.5.1 Brandlastansatz	.122
	3.5.2 Luftwechselansatz	.123
4	Bemessung von Entrauchungsanlagen	.124
	4.1 Grundsätzliches	.124
	4.2 Schritt-für-Schritt-Bemessung	.124
	4.3 Bemessung nach DIN 18232-2	.127

	4.4 Bemessung nach DIN 18232-5	128
	4.5 Bemessungsbeispiel	128
5	Hinweise zur Ausführungsplanung von Entrauchungsanlagen	130
5	5.1 Allgemeines	130
	5.2 Natürliche Entrauchungsanlagen	130
	5.3 Maschinelle Entrauchungsanlagen	131
	5.3.1 Bestandteile maschineller Entrauchungsanlagen	131
	5.3.2 Anforderungen an die Bauteile maschineller Entrauchungsanlagen	132
	5 3 2 1 Anforderungen an Entrauchungsventilatoren	132
	5.3.2.2 Anforderungen an elektrische Anlagen mit Funktionserhalt	136
	5 3 2 3 Anforderungen an Entrauchungsklannen	136
	5 3 2 4 Anforderungen an Verschlussklappen	137
	5 3 2 5 Anforderungen an Entrauchungsleitungen	138
	5.3.2.6 Anforderungen an Bauchschürzen	139
	5.3.2.7 Anforderungen an Absaugöffnungen	140
	5.3.2.8 Anforderungen an Zuluftöffnungen	140
6	Emerfahlungen für heusenfrichtliche Dichtlinien und Menschumgen	1 4 1
0	Emplemiungen für bauaufsichuliche Kichtlinien und verordnungen	141
	o.1 Muster-Richtlinie über den baulichen Brandschutz im Industriebau (Muster- Industriebaurichtlinie - M IndBauRL) - Fassung März 2000 –	141
	6.2 Musterverordnung über den Bau und Betrieb von Versammlungsstätten (Muste	
	Versammlungsstättenverordnung - MVStättV) - Fassung Mai 2002 –	142
	6.3 Muster-Verordnung über den Bau und Betrieb von Verkaufsstätten (Muster-	
	Verkaufsstättenverordnung) – MVkVO- Fassung September 1995	142
	6.4 Anwendung der Grundlagen auf Atrien und komplexe Gebäude	143
	6.5 Umbaute Parkhäuser	143
7	Zusammenfassung	144
8	Literatur	148

Inhaltsverzeichnis des Bandes B dieses Forschungsberichtes

1 Einleitung

- 2 Status Quo in Deutschland
 - 2.1 Aufgaben der Überdruckbelüftung in Sicherheitstreppenräumen von Hochhäusern
 - 2.2 Die Bestimmungen des deutschen Baurechtes
 - 2.3 Der übliche Weg der Umsetzung
- 3 Eine Literaturrecherche im deutsch- und englischsprachigen Raum
 - 3.1 Allgemeines
 - 3.2 Brandereignisse in Hochhäusern
 - 3.3 Gebäude-Undichtigkeiten

- 3.4 Der thermische Auftrieb Stack Action
- 3.5 Die Druckverteilung im Gebäude
- 3.6 "Stairwell Pressurization" die amerikanische Lösung
- 4 Sicherheitstreppenräume für Hochhäuser in Deutschland
 - 4.1 Druckverteilung im Gebäude
 - 4.2 Der Druckverlauf im Treppenraum
 - 4.2.1 Allgemeines
 - 4.2.2 Der Sicherheitstreppenraum in Hochhäusern
 - 4.2.3 Die Luftführung
 - 4.2.4 Druckverluste durch Reibung
 - 4.2.5 Druckgewinn durch Thermik
 - 4.2.6 Berechnungen
- 5 Grenzen der üblichen Technik
 - 5.1 Die übliche Technik
 - 5.2 Ein Beispiel
 - 5.3 Die Grenzen des üblichen Systems
- 6 Besondere Problempunkte
 - 6.1 Zulässiger Differenzdruck an Türen- Türöffnungskräfte
 - 6.2 Automatische Außenöffnungen in den Geschossen
 - 6.2.1 Fassadenöffnungen
 - 6.2.2 Abströmkanäle (horizontal)
 - 6.2.3 Abströmschächte über Dach, mit oder ohne Ventilatoren
 - 6.3 Ausgang ins Freie
 - 6.4 Windeinfluss
 - 6.4.1 Windeinfluss bei Außenöffnungen des Brandraumes
 - 6.4.2 Windeinfluss bei Fortluftöffnungen der Treppenraumlüftung
 - 6.4.3 Windeinfluss bei Außenluftansaugöffnungen
 - 6.4.4 Windeinfluss bei Ausgängen
 - 6.5 Schleusen-Lüftung
 - 6.6 RWA-Öffnung

7 Eine grundsätzlich neue Lösung - die Überdruckbelüftung mit Thermik-Kompensation

- 7.1 Grundgedanke und technische Umsetzung
- 7.2 Die Anwendung auf das Objekt, das die Entwicklung angestoßen hat
- 7.3 Die Anwendung auf ein 120 m-Hochhaus
- 7.4 Einsatzgrenzen
- 8 Einfachere, kostengünstigere Lösungen für geringere Gebäudehöhen
- 9 Lüftung innenliegender Treppenräume (nicht: Sicherheitstreppenräume)
- 10 Empfehlungen für bauaufsichtliche Richtlinien

•

Symbol	Einheit	Bedeutung	
A	m^2	Fläche	
A_f	m^2	Brandfläche, Brandherdfläche	
A_{Raum}	m^2	Raumfläche	
A_{R}, A_{Res}	<i>m</i> ²	Rauchabschnittsfläche; durch Rauchschürzen oder Wände be- grenzte Deckenflächen	
A_t	<i>m</i> ²	totale innere Raumoberfläche, jedoch <u>ohne</u> Wandöffnungsflächen nach EUROCODE 1, <u>einschließlich</u> Wandöffnungsflächen nach PETTERSON (1974)	
A_W	m^2	Fläche von Wandöffnungen	
$A_{\it Wirk}$	m^2	Wirkfläche eines Rauchabzugs, als Wirkfläche je Absaugstelle / Abzug gewählter Ausschnitt des Rauchabschnitts	
a	т	Höhenkorrekturmaß für den virtuellen Ursprung eines Überlauf- Plumes	
В	т	Breite eines Balkons	
С	_	Konstante	
C_d		Ausflusskoeffizient	
C_E	-	Einmischkonstante	
c_p	kJ/(kg·K)	spezifische Wärmekapazität	
C_A		Durchflussbeiwert für natürliche Rauchabzüge	
CZ	-	Korrekturfaktor für Zuluftöffnungen	
D	т	Durchmesser, Dicke, lineare Abmessung eines Brandherdes	
D_B	т	Dicke der Rauchschicht unter einem Balkon	
D_d	т	Höhenversatz (engl.: <u>d</u> ownstand)	
D_W	т	Dicke der Rauchschicht in der Raumöffnung (engl.: window)	
d	т	Dicke der raucharmen Schicht	
d_I	т	Dicke der (sichtbaren) Rauchschicht	
d_S	т	Dicke der Rauchschicht	
Δd_S	т	Dicke der Rauchschicht unterhalb des Abzugs	
Fr		Froude-Zahl = $w^2/(g \cdot l)$	
<u>g</u>	m/s²	Erdbeschleunigung	
H	т	Höhe, Raumhöhe	
H_{f}, H_{Feuer}	т	Lage des Brandherdes über dem Fußboden	
H_{Sch}	m	Höhe (Länge) der Rauchschürze	
H_u	MJ/kg	unterer Heizwert	
H_W	m	Höhe einer Wandöffnung	
h	т	Höhe zwischen Brandherd und Öffnungsoberkante	
h _{fl}	т	Flammenhöhe	

Formelzeichen

Symbol	Einheit	Bedeutung	
K	_	Bruchteil der konvektiven Energie, die in der Rauchschicht verblieben ist	
L	m	Länge, Länge der Überströmkante, über die Rauchgas abströmt	
L m		Breite einer unter einer Decke oder einem Balkon strömenden Rauchgasschicht	
$L_{min,tr}$	m³ _N /kg _B	Mindestbedarf an trockener Luft	
$L'_{min,tr}$	kg/kg _B	Mindestbedarf an trockener Luft	
ℓ_T	т	Dicke der Deckenströmung (ceiling jet)	
m	kg	Masse	
m _{RG,min}	kg/kg _B	stöchiometrische Verbrennungsgasmenge, Rauchgasmenge	
ṁ	kg/s	Massenstrom	
m ^A	kg/s	Massenstrom des Abzugs	
$\dot{m}_{_B}$	kg/s	Massenstrom des verbrannten Brandguts, Abbrandrate	
$\dot{m}_{\scriptscriptstyle Bemessung}$	kg/s	Massenstrom, der aufgrund Bemessung aus einem Rauchabschnitt abzuführen ist	
\dot{m}_{crit}	<i>kg/s</i> maximaler Massenstrom eines Abzuges ohne Lufteinsaugun		
\dot{m}_E kg/s Massenstrom der eingemischten Luft		Massenstrom der eingemischten Luft	
\dot{m}_{p} kg/s Massenstrom des (freien) Plume		Massenstrom des (freien) Plume	
$\dot{m}_{RG,min}$ kg/s mittlerer stöchiometrischer Massenstrom		mittlerer stöchiometrischer Massenstrom	
\dot{m}_{slot} kg/s Massenstrom, der von einem Schlitzeinlass aufgef soll		Massenstrom, der von einem Schlitzeinlass aufgefangen werden soll	
$\dot{m}_{slot,exhaust}$	kg/s	Massenstrom, bestehend aus Rauchgas und Luft, der von einem Schlitzauslass abzuführen ist	
\dot{m}_{Spill}	kg/s	Massenstrom des Überlauf-Plumes (engl.: spill plume)	
\dot{m}_{W}	kg/s	Massenstrom in einer senkrechten Raumöffnung (window)	
ḿz	kg/s	Zuluft-Massenstrom	
Р	m	Umfang der Brandfläche, des Brandherdes (Perimeter)	
р	hPa	Druck (absolut)	
$\varDelta p$	Pa	Druckdifferenz	
$\Delta p_{Auftrieb}$	Pa	verfügbarer Auftriebsdruck	
Δp_A	Pa	Druckverlust im Abzug	
Δp_{MRA}	Ра	durch MRA mögliche Verschiebung des Druckverlaufs im Ge- bäude (z.B. zur Unterdruckhaltung)	
Δp_Z	Pa	Druckverlust in der Zuluft	
Q	MJ	Wärmemenge, Brandlast als potentielle Wärmemenge	
q	MJ/m²	flächenbezogene Brandlast	
q_F	MJ/m²	Brandlast auf Fußbodenfläche bezogen	

Symbol	Einheit	Bedeutung	
q_t MJ/m^2 Brandlast auf gesamte (totale) Raumoberfläche bez		Brandlast auf gesamte (totale) Raumoberfläche bezogen	
Ż	kW	Wärmestrom	
ġ	kW/m²	Wärmestromdichte	
\dot{Q}_A kW (konvektiver) Wärmestrom im Abzug		(konvektiver) Wärmestrom im Abzug	
\dot{Q}_{c}	kW	konv. Wärmestrom innerhalb des Raumes	
$\dot{Q}_{c,0}$	kW	konv. Wärmestrom an der Raumöffnung	
\dot{Q}_{f}	kW	Brandleistung	
\dot{q}_{f}	k₩/m²	spezifische Brandleistung	
$\dot{Q}_{\nu,r}$	kW	Wärmeabgabe der Rauchschicht infolge Strahlung	
$\dot{Q}_{\nu,\alpha}$	kW	Wärmeabgabe der Rauchschicht infolge Wärmeübergang an die Bauteile	
Żz	kW	Wärmestrom in der Zuluft (≈ 0)	
\dot{Q}_{0}	kW	Referenzbrandleistung für quadratisch wachsende Brände	
\dot{Q}_P	kW	konvektiver Anteil der Brandleistung	
$\dot{Q}_{P,r}$	kW	Strahlungsanteil der Brandleistung (überwiegend aus dem Flam- menbereich)	
R	J/(kg·K)	Gaskonstante	
Ŕ	kg/s	Abbrandrate (häufig in Holzgleichwert angegeben)	
r	т	radialer Abstand von der Plumeachse	
Т	Κ	absolute Temperatur	
t	S	Zeit	
T_S	Κ	mittlere absolute Temperatur der Rauchschicht	
T_{∞}	K	absolute Temperatur in der Umgebung	
T_P	K	absolute Temperatur des Rauchgasplumes (an der betrachteten Höhe z)	
V	m ³	Volumen	
V		Verdünnung	
\dot{V}	<i>m³/s</i>	Volumenstrom	
$\dot{V}_{Bemessung}$	m³/s	Volumenstrom, der aufgrund Bemessung aus einem Rauchab- schnitt abzuführen ist	
<i>v</i> _r	m/min	radiale Brandausbreitungsgeschwindigkeit	
V _{crit}	m³/s	maximaler Volumenstrom einer Absaugstelle ohne Lufteinsau- gung	
W	m	Weite (Breite) einer Wandöffnung	
W	m/s	Strömungsgeschwindigkeit, Geschwindigkeit in den Abluftöff- nungen	

Symbol	Einheit	Bedeutung	
z m Höhe über dem Fußboden		Höhe über dem Fußboden	
<i>Z</i> ₀ <i>m</i>		Lage der virtuellen Brandquelle über $z = 0$ (wenn negativ, dann unterhalb $z = 0$)	
Zp	т	effektive Steighöhe eines Plumes (nach 3.3.4)	
Z _{Spill}	т	Steighöhe eines Überströmplumes ab Überströmkante	
Z _{Spill,eff}	т	effektive Steighöhe eines Überströmplumes in großräumigen Rauchreservoirs	
ZNPP	m	Lage der druckneutralen Ebene	
α	$W/(m^2 \cdot K)$	Wärmeübergangskoeffizient	
α_0	kW/s^2	Brandwachstumsgeschwindigkeit	
ρ	kg/m³	Dichte	
ρ_0 kg/m ³ Dichte im Normzustand (0°C, 1013,25 hPa)		Dichte im Normzustand (0°C, 1013,25 hPa)	
ρ_{∞} kg/m ³ Dichte der Umgebungsluft		Dichte der Umgebungsluft	
<i>₽spill</i>	ρ_{Spill} kg/m^3 mittlere Dichte in einem Überlauf-Plume (Spill-Plume) in Höhe z_{Spill}		
Θ	Κ	Temperaturdifferenz gegenüber Umgebungstemperatur (Übertemperatur)	
Θ_S	Κ	Übertemperatur der Rauchschicht gegenüber der Umgebungstem- peratur	
	$\vartheta_{P}, \circ C$ Celsiustemperatur		
λ	– Luftverhältniszahl		
τ	S	Zeitdauer, Einwirkzeit	
τ_{Brand}	min	Branddauer	
Φ		Äquivalenzverhältnis	
χ	_	Anteil konvektiver Energie im Plume über dem Brandherd	

1 Einführung

1.1 Historie

1.1.1 Über die Entwicklung von Entrauchungsanlagen

Brände, die in Theatern auftraten und meist von der Bühne ausgingen, forderten viele Menschenleben (KLOTE und MILKE in [73]):

1877	in Brooklyn	283 Tote,
1881	im Ringtheater in Wien	449 Tote und
1903	in Iroquois	571 Tote.

Nach THOMAS [119] wurden zur Ringtheater-Katastrophe von Wien Untersuchungen an Modellen im Maßstab 1 : 3 und 1 : 10 durchgeführt. Brandkatastrophen in Theatern begegnete man dann durch das "Guckkasten-Theater" mit einem Fire Safety Curtain zwischen Zuschauerraum und Bühnenbereich und einem Rauchabzug über der Bühne. Ein Brand im Palace-Theatre in Edinburgh im Jahre 1911 forderte keine Menschenleben, weil die Bühne mit einem Rauchabzug versehen war [73].

MORGAN et. al. nennen einige Brände bei der Autoindustrie in den Jahren 1953, 1957 und 1963, die die Entwicklung von Rauchabzügen beeinflussten. In Industrieanlagen wurden Rauchabzüge nach diesen Großbränden gebräuchlich. Die Fire Research Station in Borehamwood bei London entwickelte in den 60-er-Jahren Algorithmen für Brände, die direkt unter einer auftriebsbehafteten Rauchschicht unter der Decke bzw. unter dem Dach eines Gebäudes auftreten. Als Pionierarbeit ist das FIRE RESEARCH TECHNICAL PAPER NO. 7 von THOMAS et. al. [117] aus dem Jahre 1963 anzusehen. Es unterscheidet kleine Brände, bei denen die Flammen nicht bis in die Rauchschicht hineinreichen, und große Brände, bei denen die Flammenzone in die Rauchschicht hineinreicht. HINKLEY [57] berichtet über neuere Forschungen, die zur Verschiebung der Grenze zwischen kleinen und großen Bränden führte, und dass ganz Europa die THOMAS-Formeln von 1963 benutzen würde. nahezu zeitgleich wurde ein offizielles vereinfachtes Bemessungsverfahren für den Rauchabzug ("simplified approach to smoke-ventilation calculation") [82] veröffentlicht, in das der als klein bezeichnete Brand wegen seines seltenen Anwendungsfalles gar nicht mehr aufgenommen wurde. Die deutsche Normung zu DIN 18232 benutzte bisher ebenfalls nur den "großen Brand". Erst die für 2003 vorgesehene Ausgabe DIN 18232-2 für natürliche Abzüge wird - wie von THOMAS ursprünglich vorgesehen - wieder zwischen großen und kleinen Bränden unterscheiden.

Die stürmische Entwicklung von überdachten Einkaufsstraßen und Innenhöfen nahezu in allen Gegenden der Erde, häufig in Form sehr hoher Atrien, führte zur Erforschung hierfür gegebenenfalls besser geeigneter Algorithmen. Japanische Untersuchungen theoretischer und experimenteller Art aus dem Jahre 1985 ([114] und [130]) führten für hohe Bauten mit begrenzten Bränden zu Algorithmen wie sie für kleine Brände schon bekannt waren. In Deutschland folgte eine Fülle von Publikationen zur Atrien-Problematik in den Jahren 1988 bis 1993; vergl. z.B. [66], [67], [68], [69] und [72]. Soweit in den genannten Veröffentlichungen Algorithmen angesprochen werden, handelt es sich um die japanischen Ergebnisse, die unter dem Namen TANAKA-Plume für Atrien angewendet werden. KALLENBACH äußerte 1992 [71], dass sich die Wissenschaft darüber im Klaren sei, welche Brandszenarien in Atrien anzusetzen seien und wo die wesentlichen Probleme lägen.

Nach KLOTE und MILKE [73] wurde in Nordamerika in den letzten Jahrzehnten der mit Ventilatoren betriebene Rauchabzug zum Standard für nahezu alle Atrien, während in anderen Gegenden, wie Europa, Australien und Neuseeland sowohl natürliche als auch maschinelle Rauchabzüge eingesetzt werden. Dieser Umstand liegt darin begründet, dass in USA vom ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers) die Entwicklung der Rauchabzüge vorangetrieben wurde, während in anderen Gebieten die Entrauchung durch die Lichtkuppel-Industrie fortentwickelt wurde, und maschinelle Abzüge nur zur Anwendung kamen, wenn der natürliche Abzug gar nicht mehr ging.

In Großbritannien folgten folgenschweren Bränden in Einkaufszentren, wie 1977 in Liverpool [80], intensive Untersuchungen. Es entstanden 1982 Richtlinien [15], die einen - heute noch verwendeten – Energieeintrag von 5 MW aus einem gesprinklerten Einzelhandelsgeschäft in ein Atrium oder in eine überdachte Ladenstraße nannten. Mangels günstigerer Forschungsergebnisse wurde der zu bewältigende Brandgasmassenstrom infolge Einmischung an Umlenkkanten wie Balkonen oder Galerien um den Faktor zwei vergrößert gegenüber einem ohne Umlenkung aufsteigenden Brandgasmassenstrom. Es folgten in Großbritannien ausführliche als offiziell anzusehende Richtlinien im Jahre 1990 für überdachte Einkaufsstraßen [86] und im Jahre 1994 für Atrien [53]. Die Inhalte dieser Richtlinien wurden in einen europäischen Normungsvorschlag [43] aufgenommen. In den britischen Richtlinien und im europäischen Normungsvorschlag blieben die japanischen Arbeiten [114] und [130] unerwähnt. Die weitere Bearbeitung des Normungsvorschlages [43] wurde im September 2000 eingestellt, weil den Mitgliedsstaaten der EU die Regelungshoheit im Bereich von Entrauchungsanlagen entzogen worden wäre und es sich bei dieser Norm nicht um eine Produkt- oder Prüfnorm handelte. Obwohl dieser Normungsvorschlag nie veröffentlicht wurde, erfuhr er eine weite Verbreitung und Anwendung. Die Hauptinitiatoren dieser Norm haben aufgrund des sich abzeichnenden Widerstandes gegen die Veröffentlichung den wesentlichen Inhalt gemeinsam mit ergänzenden Beispielen als Buch veröffentlicht [88].

Das britische Normungsinstitut veröffentlichte 1997 einen Draft for Development, Part 1 [18] "Guide to the application of fire engineering principles", der auf etwa 100 Seiten Anleitungen zum ingenieurmäßigen Vorgehen bei Brandschutzproblemen enthält. Im Part 2 [19] "Commentary on the equations given in Part 1" werden die Anwendungsgrenzen und der Vertrauensbereich zu der Vielzahl der im Part 1 angegebenen Formeln mitgeteilt. Dies erfolgte auf der Grundlage einer Untersuchung, die das Department of Fire Safety am INSTITUTE OF TECHNOLOGY an der UNIVERSITÄT LUND in Schweden durchführte.

In Deutschland wurden in den 70-er-Jahren Entrauchungsanlagen nur in Einzelfällen als Kompensationsmaßnahmen bei fehlender Rauchabzugsmöglichkeit über Fenster- oder Türöffnungen eingesetzt, wie dies z.B. beim 1980 eröffneten ICC in Berlin geschah. Zwischenzeitlich sind Bauteile für natürliche und für maschinelle Entrauchungsanlagen in die Bauregellisten aufgenommen und damit auch die Art des erforderlichen Eignungsnachweises festgelegt worden. Das DEUTSCHE INSTITUT FÜR BAUTECHNIK vergab Forschungsvorhaben zu maschinellen Entrauchungsanlagen; vergl. Bericht von 1993 [99] und Bericht von 2000 [98].

Aus dem INSTITUTE OF TECHNOLOGY an der UNIVERSITÄT LUND in Schweden liegt eine Grundlagenarbeit aus dem Jahre 1974 [93] über die brandschutztechnische Bemessung von Stahlkonstruktionen vor. Sie enthält den Einfluss der Ventilation bei Vollbrand auf die Brandraumtemperatur. Die Ergebnisse und Erkenntnisse dieser Arbeit werden noch in allerneuesten Veröffentlichungen zitiert wie z.B. im SFPE Handbook of Fire Protection Engineering [110] von 2002.

Mit den Arbeiten von 1963 [117] und von 1974 [93] darf man sicher im Ausland den Einsatz von Ingenieurmethoden für brandschutztechnische Bemessungen als begründet ansehen.

Mit der Einführung der EUROCODES als Technische Baubestimmungen, z.B. in Bayern im Jahre 2001, wurden in Deutschland erstmals Ingenieurmethoden offiziell für brandschutztechnische Bemessungen vorgesehen. Dies darf nicht darüber hinweg täuschen, dass bisher nur eine verhaltene Akzeptanz für Ingenieurmethoden im Brandschutz besteht. MEHL [78] spricht 2002 von einer Akzeptanz der Ingenieurmethoden, führt aber Beispiele an, bei denen nicht darauf zurück gegriffen werden kann (z.B. Rettungswege betreffende Fragestellungen). Er führt weiter zu den "Ingenieurmethoden im Brandschutz" aus, dass diese als zweite Möglichkeit neben der Einhaltung jeder Einzelvorschrift nach Baurecht einsetzbar sind. Er erklärt die Anwendung des Begriffes "Wärmebilanzrechnungen" anstelle des umfassenderen Begriffes "Ingenieurmethoden im Brandschutz" als inkorrekt, weil damit häufig eine Fehlinterpretation einhergeht, die die Bedeutung der strömungstechnischen Gesetzmäßigkeiten verkennt. H. HAGEN [51] berichtete 2002, dass die Bauvorschriften im Wandel begriffen sind und eine Tendenz zum ingenieurmäßigen Vorgehen bestehe.

Voraussetzung für eine umfassende Akzeptanz der Ingenieurmethoden im Brandschutz wird die Bereitstellung eindeutiger Rechenverfahren, Brandszenarien, Stoffeigenschaften und die Festlegung anderer Einflussgrößen sein. Es kann nicht angehen, dass "anerkannte" – weil oft zitierte – Rechenprogramme "black boxes" bleiben und zu Fehlbeurteilungen führen können. MORGAN, seit mehreren Jahrzehnten mit Experimenten und Rechenverfahren befasst, warnt vor dem "Missbrauch" (vergl. Kapitel 17.4 in [88]). Die enorme Vielfältigkeit des modernen Bauwesens macht die Anwendung von Ingenieurmethoden erforderlich. Sie sind durch starre Einzelregelungen und unendlich lange Bemessungstabellen nicht mehr zu verdrängen.

Der vorliegende BAND A des Forschungsberichtes befasst sich mit Ingenieurmethoden zur Bemessung von ENTRAUCHUNGSANLAGEN.

1.1.2 Über die Entwicklung von Druckbelüftungsanlagen

Innenliegende Treppenräume in einem Wohnhochhaus wurden in Deutschland erstmals um 1970 unter der Auflage genehmigt, dass für den Brandfall wirkungsvolle Lüftung nachgewiesen wird. Die hierzu durchgeführten Versuche und deren Ergebnisse wurden 1972 von SEEGER und JOHN beschrieben [107]. Es folgten Regelungen für notwendige innen liegende Treppenräume und für Sicherheitstreppenräume in einem Muster einer Hochhausrichtlinie, die in den Bundesländern unterschiedlich berücksichtigt wurden. Die Höhe der Hochhäuser wuchs zwischenzeitlich aber in Deutschland auf ein Vielfaches der Hochhausgrenze von 22 m an. OSTERTAG und ZITZELSBERGER [92] wiesen 2001 auf die damit verbundenen Gefahren für Leib und Leben bei extremen Wetterbedingungen hin. In Nordamerika (USA und Kanada) begann bereits in den 60-er-Jahren die Untersuchung der Witterungseinflüsse auf Treppenräume und Aufzugschächte und die Entwicklung von Druckbelüftungsanlagen.

Der separate und für sich abgeschlossene BAND B zum Forschungsvorhaben befasst sich mit Ingenieurmethoden zur Bemessung von DRUCKBELÜFTUNGSANLAGEN.

1.2 Brandgeschehen und dessen Beeinflussung

Brände sind immer ein instationäres Ereignis, in dem der Faktor Zeit eine wichtige Rolle spielt. Voraussetzung für Brände ist nach HINKLEY und WILLIAMS [58] aber ein Sauerstoffgehalt in der Luft von mindestens 12%; diese Eigenschaft wird für den Sachwertschutz auch genutzt; vergl. FRIEDRICH [44]. Für Holzwerkstoffe wird dies aber nicht zutreffen, da Holz nach [97] bereits 35 Massen-% Sauerstoffgehalt für die Verbrennung "selbst mitbringt"; in Feuerwiderstandsprüföfen kann man Brennen von Holz sogar noch bei einer Sauerstoffkonzentration im Brandraum von 4% oder geringfügig darüber beobachten. 12% Sauerstoffgehalt und darunter sind allerdings für den Menschen nur kurzzeitig zu ertragen [18], nach [58] gibt es bei 12% Sauerstoffgehalt kein Überleben.

Die Phasen eines Brandes sind schematisch in Bild 1.2-1 dargestellt (nach Walton und THOMAS [128]). An die Zündung (1) schließt das Wachstum des Brandes (2) an. Unter der Decke eines Raumes sammeln sich die aufsteigenden Rauchgase zu einer heißen Rauchgasschicht. Laboruntersuchungen ergaben, dass die meisten brennbaren Stoffe bei einer Strahlungsintensität von weniger als 25 kW/m² pyrolysiert und gezündet werden (BABRAUSKAS, V. [9]). THOMAS [119] gibt als Auslöser für Flammenbildung auf der

Oberfläche brennbarer Stoffe einen am Boden ankommenden Strahlungswärmefluss von 20 kW/m² an. Bei Temperaturen zwischen ca. 550 und 600°C strahlt eine dicke schwarze Rauchgasschicht gemäß des STEFAN-BOLTZMANN-Gesetzes

$$\dot{q}_{s} = \varepsilon \sigma_{s} T^{4} [W/m^{2}]$$
(1.2-1)

mit mehr als 20 kW/m² nach unten auf brennbare Stoffe (mit der STEFAN-BOLTZMANN-Konstanten $\sigma_s =5,67 \times 10^{-8}$ [W/(K⁴m⁴)], der absoluten Rauchschichttemperatur *T* und einer Emissionszahl $\varepsilon \approx 0,8$ für die strahlende Rauchschicht). Es tritt deshalb ein nahezu gleichzeitiges Zünden aller infolge der hohen Energiedichte pyrolysierten brennbaren Stoffe im Raum ein. Dieses Ereignis wird als Flash-over (3) bezeichnet. Danach geht der Brand mit starkem Temperaturanstieg in den Vollbrand (4) über. Im Allgemeinen wird in dieser Phase mehr Brandlast pyrolysiert als mit dem im Raum verfügbaren Sauerstoff verbrannt werden kann. Man spricht deshalb von einem lüftungsgesteuerten Brand. Aus den Raumöffnungen treten dann unvollständig verbrannte Verbrennungsprodukte aus, die dann außerhalb "nachverbrennen" können. Der Brand beginnt zu erlöschen (5) wenn der wesentliche Anteil der Brandlast verbrannt ist und erlischt schließlich völlig nach dem Verzehr aller Brandlasten.



Dauer des Brandes

Bild 1.2-1: Phasen eines Brandes (nach WALTON u. THOMAS [128])

Die Zündphase (1) kann wenige Augenblicke (z.B. bei Brandstiftung) oder aber Tage und Wochen (z.B. bei unbemerkten Veränderungen in elektrischen Leitungsanlagen) dauern. Die Wachstumsphase eines Brandes (2) wird beeinflusst durch die spezifische Brandleistung (auch Energiefreisetzungsrate (engl.: heat release rate) genannt) (kW/m²), das Anwachsen der Brandfläche und der Temperatur in der Rauchschicht unter der Decke des Raumes. Die spezifische Brandleistung hängt u.a. von der Art des brennenden Stoffes, seinem Feuchtegehalt und seiner Oberflächenbeschaffenheit ab. Nach Literaturangaben betragen die spezifischen Brandleistungen zwischen 100 kW/m² und ca. 600 kW/m² für häufige Risiken. Sie können bis zu mehrere MW/m² betragen, wenn brennbare Stoffe in Regalen gelagert sind. In die aufsteigenden heißen Brandgase über einem Feuer mischt sich mit zunehmender Höhe mehr und mehr Luft aus der Umgebung ein, so dass die Temperatur mit der Höhe abnimmt. In niedrigen Räumen sammeln sich deshalb rasch Gase mit mehr als 500°C unter der Decke an. Die Strahlung dieser Heißgasschicht führt in vielen Fällen schon drei bis sechs Minuten nach der Zündung zum Flash-over (3). In Wohngebäuden können sich nach THOMAS [119] gefährliche heiße Rauchschichten in Zeiträumen der Größenordnung von Sekunden bilden. Der Vollbrand (4) erreicht mit ausreichender Zuluft Temperaturen um 1000°C und mehr und führt zu einer starken Beanspruchung bzw. Schädigung tragender und raumabschließender Bauteile.



Bild 1.2-2: Beispiele für den Verlauf der Brandraumtemperaturen bei Vollbrand für unterschiedliche Brandbelastungen und unterschiedliche Lüftungsfaktoren für den schwedischen Standardbrandraum; aus [128] entnommen

Der Einfluss der Ventilation wurde in einer Arbeit von PETTERSON et. al. [93] gezeigt. Er kann auch bei WALTON und THOMAS [128] nachgelesen werden. In der Phase des Erlöschens oder der Abkühlphase (5) nach einem Brand treten häufig in angrenzenden Bereichen durch "Nachschieben" der Temperaturwelle starke Temperaturerhöhungen auf, die zu Sekundärbränden führen können; die Feuerwehren begegnen dieser Tatsache durch stundenlange Brandwache nach erfolgtem Löschen.

Beispiele für den Verlauf der Brandraumtemperatur in Abhängigkeit von der Brandbelastung (Brandlast bezogen auf die totale innere Raumoberfläche; mit Q_t bezeichnet) und vom Lüftungsfaktor zeigt Bild 1.2-2. Der angegebene Lüftungsfaktor $A_0 \sqrt{H_0 / A_t}$ ist nicht korrekt. Er muss vielmehr lauten:

Lüftungsfaktor =
$$A_0 \sqrt{H_0} / A_t [m^{1/2}]$$
 (1.2-2).

Der Lüftungsfaktor enthält die Fläche A_0 und die Höhe H_0 der Lüftungsöffnung sowie die totale innere Raumoberfläche A_t , auf die auch die Brandlast bezogen ist.

Das Abführen von Brandgasen aus der sich unter der Raumdecke bildenden Rauchschicht führt zu einer Temperaturabsenkung in dieser Schicht und damit zu der Möglichkeit, den Flash-over zu verzögern oder zu verhindern; diese Beeinflussung des Brandgeschehens ist wesentlicher Bestandteil des vorliegenden Forschungsberichtes.

Der Einsatz von Sprinklern führt, sofern die Auslösung erfolgte, zu einer Absenkung der spezifischen Energiefreisetzung, zu keinem weiteren Anwachsen der Brandfläche und möglicherweise zum Erlöschen eines Brandes in der Pre-flash-over-Phase.

In Bild 1.2-3 zeigt der mit "6" gekennzeichnete Ast den möglichen Temperaturabfall nach erfolgreicher Unterdrückung des Flash-over.



Dauer des Brandes

Bild 1.2-3: Phasen eines Brandes einschließlich der Verhinderung des Flash-over

GÜNTHER [49] unterschied 1995 in seinem Beitrag "...MicroDrop, ein (fast) neues Löschverfahren" zwischen Flächenwirkung, die bei Sprinklern auftritt und Volumenwirkung, die bei Sprühnebel-Löscheinrichtungen auftritt. Bei Letzterer tritt eher ein Stickeffekt als ein Ablöschen ein, mit dem Vorteil des deutlich geringeren Wasserbedarfes und den deutlich reduzierten Wasserschäden.

Brände lassen sich auch durch Gaslöschanlagen begrenzen oder löschen. Es handelt sich dabei um eine Inertisierung (Stickeffekt), die nur für den Sachschutz in Frage kommen kann. Der vorliegende Bericht wurde für bauaufsichtliche Belange erstellt, bei denen der Personenschutz immer im Vordergrund steht. Deshalb werden andere als Wasserlöscheinrichtungen nicht berücksichtigt.

1.3 Zur Frage der Brandraumtemperatur bei Sprinklerung

Über den Einfluss von Sprinklern auf die Temperatur im Brandraum bestehen unterschiedliche Auffassungen. In Deutschland ist die Meinung verbreitet, dass bei erfolgreicher Sprinklerung keine Temperaturen über 100°C im Brandraum aufträten, weil überhitzter Wasserdampf im Brandraum nicht auftreten könne. Hierzu ist zu sagen, dass die Luft bei beliebigen Temperaturen Wasserdampf im überhitzten Zustand enthält, solange keine Sättigung mit nachfolgender Tröpfchenbildung (Nebel) eintritt. Zur physikalischen Untermauerung ist den VDI-Wasserdampftafeln zu entnehmen, dass jeweils bei Sättigung und bei einer Temperatur

von 40°C ein Partialdruck von	73,74	hPa und
von 60°C ein Partialdruck von	199,20	hPa vorliegt und bei einer Temperatur
von 100°C ein Partialdruck von	1.013,25	hPa vorläge.

100-grädige feucht gesättigte "Luft" ist aber nichts anderes als reiner Wasserdampf mit einem "Partialdruck" der dem Gesamtdruck (auf Meereshöhe) entspricht. Bei Temperaturen über 100°C kann feuchte Sättigung nur noch in Druckbehältern aufrechterhalten werden. Wir dürfen damit festhalten, dass bei Brandbekämpfungsmaßnahmen mit Löschwasser keinerlei Grenztemperatur infolge des Löschwassers besteht.

Egal ob die Raumtemperatur 40°C, 60°C, 100°C, 200°C oder darüber beträgt,

es liegt immer Luft als Gemisch mit überhitztem Wasserdampf vor.

Diese physikalisch begründeten Ausführungen unterstützen auch die Normungsbemühungen im europäischen Ausland und zahlreiche Versuchsergebnisse im Inland.

So vertraten die französischen Experten in europäischen Normungsgremien die in Paris hinterlegte Anforderung von 200°C für gesprinklerte Bereiche. Die aus Großbritannien in die europäische Normungsarbeit eingebrachten Bemessungsbrände (verg. Tabelle 3.2-9) reduzieren die Brandleistungen bei Sprinklerung lediglich auf ¼ bis ¼ der Brandleistung ohne Sprinkler. Diese Leistung kann bei Räumen mit ca. 2,6 m Höhe nicht mit einem nur 100°C heißen Brandgas abgeführt werden! Persönlich mitgeteilte Untersuchungsergebnisse eines deutschen Kaufhauskonzernes enthielten Spitzenwerte bis 750°C trotz erfolgreicher Sprinklerung. V. SCHNEIDER berichtet 1993 [105] über Sprühnebel-Löschversuche mit Löscherfolgen und einer Temperatur um 200°C im Brandraum. Mit einer Feldmodell-Simulation konnten solche Temperaturen auch rechnerisch nachvollzogen werden. 1996 veröffentlichten KUTZ et. al. [76] Ergebnisse aus Sprinklerversuchen, die ebenfalls mit einem Feldmodell-Rechenprogramm nachgerechnet wurden. Es wurden Temperaturen bis fast 300°C unter der Decke eines 2,55 m hohen Raumes ermittelt; in 1,7 m Höhe betrug die Temperatur noch 140°C (feuchte Luft).

1.4 Rauchbewegung in Gebäuden im Brandfalle

Infolge ihrer Auftriebswirkung steigen heiße Brandgase innerhalb des brennenden Bereiches kegelförmig über dem Feuer nach oben und sammeln sich unter der Decke. Der Auftriebsdruck von bis zu 8 Pa je Meter Rauchschichtdicke dient als Antrieb zum Abströmen über Öffnungen oder Undichtheiten in andere Bereiche.

Die **natürliche Schornsteinwirkung** im gesamten Gebäude infolge Temperaturdifferenzen zwischen innen und außen begünstigt vor allem in Hochhäusern bei extremen Außentemperaturen das Eintreten von Brandrauch in Treppenräume oder die Ausbreitung über Gebäudeundichtheiten in andere Geschosse. Infolge der Schornsteinwirkung entstehen im Gebäude Überdrücke je ein Meter Gebäudehöhe zwischen ca. -0,5 Pa im Sommer und bis zu +2 Pa im Winter.

Wind kann vor allem bei hohen Gebäuden zu erheblichen Differenzdrücken zwischen der Luv- und der Leeseite führen und damit eine Querströmung von Brandrauch bewirken. 50 Pa Differenzdruck sind keine Seltenheit; bei stürmischem Wetter können auch 250 Pa auftreten. POREH [94] weist darauf hin, dass sich durch Windeinfluss in unterteilten Atrien unterschiedlich hohe raucharme¹ Schichten einstellen können.

Raumlufttechnische Anlagen können Rauchgasbewegungen in Gebäuden ungünstig beeinflussen. Die Differenzdrücke können zwischen 10 und 50 Pa, vereinzelt auch mehr, betragen und im Brandraum sowohl Unterdruck als auch Überdruck bewirken.

Nach KLOTE und MILKE [73] kann darüber hinaus der Kolbeneffekt von fahrenden Aufzugskabinen die Rauchausbreitung in Gebäuden begünstigen; kurzzeitig können Differenzdrücke zwischen 20 und 100 Pa entstehen.

Eine Gegenüberstellung von Differenzdrücken aufgrund unterschiedlicher Ursachen enthält die von KLOTE und MILKE [73] mitgeteilte Tabelle 1.4-1

Die behinderte **Expansion von Brandgasen** würde in einem dichten und druckfesten Behälter bei einem Temperaturanstieg auf ca. 300°C einen Überdruck von ca. 100.000 Pa erzeugen. In der Praxis äußert sich die Expansion jedoch meist nur in einer Volumenstromänderung zwischen nachströmender Kaltluft und abströmenden Brandgasen.

204 Brandgastote in Wohnungen innerhalb eines Jahres führten in Großbritannien zu einem Informationsblatt von HOPKINSON [60], das die Mechanismen der Brandrauchausbreitung in Gebäuden einschließlich seiner versteckten Wege in Form baulicher Unzulänglichkeiten beschreibt.

¹ Der Begriff "raucharme Schicht" wird neuerdings anstelle des früher benutzten Begriffes "(angestrebte) rauchfreie Schicht" angewendet, da der ältere Begriff "rauchfreie Schicht" eine zu hohe Erwartungshaltung impliziert (vergl. HEGGER [54] zum Begriff "raucharm").

Driving Force	Location of Δp	Conditions	Δp (Pa)
Stack effect,	Shaft to outside	For all stack effect examples, $T_s = 21$ °C and $T_o = -18$ °C:	
Equation (5.26)			
		h = 10 m	18
		h = 100 m	180
Buoyancy of combus-	Fire room to adjacent	For $T_f = 870$ °C and $T_o = 21$ °C:	<u> </u>
tion gases,	room at ceiling	h = 1.5 m	13
Equation (5.31)	~	h = 3 m	26
Wind effect,	Across the building	For all wind examples, $\rho = 1.20 \text{ kg/m}^3$, $\overline{C}_{w1} = 0.8$ and	
Equation (5.34)	(windward to leeward wall)	$\bar{C}_{w2} = -0.3$:	
		$U_H = 7 \text{ m/s}$	32
		$U_H = 14 \text{ m/s}$	130
Ventilation systems	Across barrier of smoke control system	Note: Values based on experience.	12 to 90
Elevator piston effect,	Elevator lobby to	For all the examples of the upper limit of pressure difference	·····
Equations (5.41) to (5.43)	building	due to elevator car motion, $\rho = 1.20 \text{ kg/m}^3$, $A_{rs} = 0.149 \text{ m}^2$,	
		$A_{ir} = 0.039 \text{ m}^2, A_{oi} = 0.0502 \text{ m}^2$:	
		For a single-car shaft with $C_c = 0.83$, $A_s = 5.61 \text{ m}^2$, and $A_a =$	
		1.80 m ² :	
		Conditions For all stack effect examples, $T_s = 21$ °C and $T_o = -18$ °C: h = 10 m h = 100 m For $T_f = 870$ °C and $T_o = 21$ °C: h = 1.5 m h = 3 m For all wind examples, $\rho = 1.20$ kg/m ³ , $\overline{C}_{w1} = 0.8$ and $\overline{C}_{w2} = -0.3$: $U_H = 7$ m/s $U_H = 14$ m/s Note: Values based on experience. r all the examples of the upper limit of pressure difference e to elevator car motion, $\rho = 1.20$ kg/m ³ , $A_{rs} = 0.149$ m ² , $A_{ir} = 0.039$ m ² , $A_{oi} = 0.0502$ m ² : T = 1.80 m ² : U = 2.03 m/s U = 3.56 m/s a double-car shaft with $C_c = 0.94$, $A_s = 11.22$ m ² , and $A_a = 7.41$ m ² : U = 2.03 m/s	20
		U = 3.56 m/s	65
		For a double-car shaft with $C_c = 0.94$, $A_s = 11.22 \text{ m}^2$, and $A_a =$	
		7.41 m ² :	
		U = 2.03 m/s	5
		U = 3.56 m/s	12

Tabelle 1.4-1: Gegenüberstellung von Differenzdrücken nach [73]

2 Schutzziele und Anwendungsbereiche von Einrichtungen zur Rauchund Wärmeableitung in Gebäuden

2.1 Bauaufsichtliche Grundsatzanforderungen

Die Forderung nach technischen Einrichtungen zur Ableitung von Brandrauch aus baulichen Anlagen ist aus den Grundsatzanforderungen der Bauordnungen bezüglich des Brandschutzes abzuleiten. Zunächst besteht keinerlei Veranlassung, derartige Einrichtungen vorzusehen. Erst die Art und die Nutzung von baulichen Anlagen zwingt in bestimmten Fällen, technische Einrichtungen als Kompensationsmaßnahmen zu fordern.

Der viel zitierte § 17 Abschnitt 1 der Musterbauordnung (MBO) [5] ergänzt die allgemeinen Anforderungen nach § 3 der MBO und besagt, dass bauliche Anlagen so beschaffen sein müssen, dass

- der Entstehung eines Brandes und
- der Ausbreitung von Feuer und Rauch

vorgebeugt wird und bei einem Brand

- die Rettung von Menschen und Tieren sowie
- wirksame Löscharbeiten

möglich sind.

Dies sind die allgemein formulierten Schutzziele, die in baulichen Anlagen jeglicher Art einzuhalten sind. Die Beurteilung der Möglichkeit, bei einem Brand Rettung und Löschmaßnahmen durchführen zu können, wird sich an dem "einfachen" Fall des von der Vorderseite und der Rückseite durch die Feuerwehr erreichbaren Gebäudes mittlerer Höhe mit einem Brandwandabstand von maximal 40 m, einem notwendigen Treppenraum und dem zweiten Rettungsweg über Rettungsgeräte der Feuerwehr sowohl von der Vorderseite als auch von der Rückseite eines Gebäudes zu orientieren haben; nicht mehr und nicht weniger. Technische Einrichtungen zur Ableitung von Brandrauch, egal ob Entrauchungsanlagen oder Druckbelüftungsanlagen, werden immer dann zur Kompensation einzusetzen sein, wenn der beschriebene "einfache" Fall nicht vorliegt.

Einige Muster-Sonderbauverordnungen enthielten bereits in der Vergangenheit Anforderungen an den Rauchabzug. Deutlich präzisere Festlegungen enthalten die neuen Muster der IndBauRL [6] und der VStättV [8], indem sie vor allem konkrete Anforderungen an die Rauchabführung aus Industriehallen und aus Versammlungsstätten einschließlich Theatern in Abhängigkeit von ihrer Größe enthalten, die die Anwendung von Ingenieurmethoden zur Bemessung von Entrauchungseinrichtungen notwendig machen. Für die Einhaltung der Forderung einer mindestens 2,5 m hohen raucharmen Schicht (wie in [6] und in [8] gefordert) gibt es nicht mehr die Alternativen (vergl. MEHL [78]), bauaufsichtliche Einzelanforderungen zu erfüllen oder ingenieurmäßige Verfahren anzuwenden, sondern allein die Bemessung mittels ingenieurmäßigen Verfahren.

Alle bauaufsichtlichen Anforderungen sind im weitesten Sinne als Mindestanforderungen für den Personenschutz zu verstehen. Sachwerte zu schützen ist nur in besonderen Fällen "Sache" der Bauaufsicht, wie z.B. der Schutz von Kulturgütern.

In den nachfolgenden Abschnitten wird dennoch materiell zwischen

- Personenschutz und der
- Begrenzung der Temperaturbeanspruchung von Bauteilen sowie der
- Begrenzung der Brandausbreitung und Vermeiden bzw. Verzögern des Flash-over

unterschieden, da erst das Zusammenwirken den baulichen Mindestanforderungen zum umfassenden Personenschutz gerecht wird.

Die in diesem Forschungsbericht bereitzustellenden Grundlagen sind mit entsprechend festzulegendem Anforderungsniveau auch für den Sachwertschutz anzuwenden.

2.2 Personenschutz

2.2.1 Grundsätzliches

Der Personenschutz muss sich am "normalen" Nutzer einer baulichen Anlage orientieren. Als normaler Nutzer müssen Personen mit teilweise unbekleideten Körperoberflächen angesehen werden, die im Brandfall ungeschützt konvektiver Wärme und Strahlungswärme sowie hoher Luftfeuchtigkeit – z.B. infolge verdampften Sprinklerwassers – ausgesetzt sind. Die Atmungsorgane und die Augen sind zusätzlich den schädigenden gas-, dampfund partikelförmigen Bestandteilen von Brandrauch ausgesetzt. Zusammen mit der Sichttrübung sorgen diese Eigenschaften für unberechenbares Verhalten der betroffenen Personen. Sehr sorgsam müssen deshalb die Grenzwerte für alle möglicherweise zugleich auftretenden Merkmale in den für Personen erträglichen Grenzen definiert werden. Diese substantiellen Grenzwerte müssen an eine zeitliche Begrenzung der Einwirkung gekoppelt werden.

In Deutschland haben sich z.B. JOHN und SCHATZ [70] und neuerdings auch V. SCHNEIDER und HEINS (vergl. [106]) und in Großbritannien PURSER (vergl. [95] und [96]) mit der Problematik der Einwirkung von Branderscheinungen und Brandprodukten auf den Menschen auseinander gesetzt. Ergebnisse dieser Arbeiten werden im Folgenden berücksichtigt.

2.2.2 Notwendige Verdünnung zur Erzielung ausreichender Sichtweite

Bezüglich der Sichttrübung verwenden JOHN und SCHATZ [70] den als Maß für die Sichttrübung gebräuchlichen Extinktions-Koeffizienten. Um eine hinreichende Sicht zu gewährleisten, fordern sie, diesen Wert auf $0,15 \text{ m}^{-1}$ zu begrenzen. Sie kommen zu dem Schluss, dass dieser Grenzwert in ungünstigen Fällen erst bei einer Verdünnung von ca. $1:1400^2$ durch Einmischen von Umgebungsluft in die stöchiometrische Brandgasmenge erreicht wird.

Bezüglich der Sichtweite wird nach [70] also gefordert:

Brandgasverdünnung ≥ 1400 .

Diese Verdünnung ist durch natürliche Rauchabzugsanlagen wegen des fehlenden Auftriebes nicht umsetzbar. Die Bemessung eines Flucht- und Rettungsweges innerhalb eines völlig verrauchten – mit Umgebungsluft jedoch "ausreichend" verdünnten – Bereiches wird nur in Sonderfällen möglich sein.

2.2.3 Notwendige Verdünnung zur Begrenzung der Wirkung schädlicher Brandgasbestandteile

In der o.g. Arbeit von JOHN und SCHATZ werden aus den maximalen Arbeitsplatz-Konzentrationen (MAK-Werte) für verschiedene schädliche Bestandteile des Brandgases die notwendigen Verdünnungen des Brandgases für eine Einwirkzeit von 30 Minuten bestimmt. Für CO (nach [70] der schädlichste Brandgasbestandteil) wird eine Verdünnung von mindestens 1 : 200² angegeben.

Bezüglich des Kohlenmonoxides (CO) wird nach [70] also gefordert:

Brandgasverdünnung ≥ 200 .

2.2.4 Mindesthöhe der raucharmen Schicht

Die neuesten Muster der IndBauRL [6] und der VStättV [8] fordern für Räume ab einer bestimmten Größe unabhängig vom Einsatz automatischer Feuerlöschanlagen eine

Mindesthöhe der raucharmen Schicht von 2,5 m.

Die Einhaltung dieser Mindesthöhe im Brandfalle ist rechnerisch nachzuweisen. Aus eigenen Berechnungen ist bekannt, dass bei Einhaltung der vorgenannten Mindesthöhe häufig

² Dieser Zahlenwert wurde von JOHN auch 1989 schon angegeben; vergl. [68].

das Temperaturkriterium³ nicht eingehalten werden kann. Auch U. SCHNEIDER bestätigt in [104], dass das Temperaturkriterium schwieriger einzuhalten ist als die Mindesthöhe der raucharmen Schicht.

Die Angaben über Mindesthöhen im europäischen Normentwurfsvorschlag [43] sind differenzierter, enthalten aber den o.g. Wert. Sie sind in der Tabelle 2.2-1 wiedergegeben.

Gebäudetyp	Mindesthöhe ⁴ d [m]
Öffentliche Gebäude (z. B. eingeschossige Einkaufszentren, Messehallen)	3,0
Nicht öffentliche Gebäude (z. B. Büros, Wohnungen, Gefängnisse)	2,5
Großgaragen mit der Höhe H	2,5 m oder 0,8 × H (der kleinere Wert ist einzuhalten)
Lager mit einer Lagerhöhe-Oberkante H_{Lager}	$H_{\text{Lager}} + 0,5 \text{ m}$

2.2.5 Erträglichkeitsgrenzen für Wärme

Der Mensch reagiert sehr sensibel auf Wärme und Feuchte. Wärme kann den Menschen attackieren

- in Form von konvektiver Wärme aus der ihn umgebenden Luft und
- in Form von Wärmestrahlung, die im Brandfalle auch über größere Entfernungen von Flammen oder heißen Rauchgasschichten auf den Menschen einwirkt.

PURSER hat in der 2-ten Auflage des SFPE-Handbuches [95] eine Vielzahl von Angaben aus der Literatur zusammengestellt und die großen Unterschiede der Angaben aufgezeigt. Seinen Beitrag für die dritte Auflage des gleichen Handbuches [96] ergänzte er mit der von ihm für DD 240:Part 1 [18] erstellten Tabelle. V. SCHNEIDER veröffentlichte in [106] eine ähnliche Tabelle. In der Tabelle 2.2-2 sind Angaben von PURSER und V. SCHNEIDER zusammengestellt. Es fällt auf, dass für mit Feuchte gesättigte Luft in [18] eine während mindestens 30 Minuten zu ertragende Lufttemperatur von 60°C angegeben wurde. Die Autoren des vorliegenden Berichtes bezweifeln diesen Wert und empfehlen dringend, für gesprinklerte Gebäude die von V. SCHNEIDER angegebene Grenztemperatur von

40°C für mit Feuchte gesättigte Luft für mindestens 30 Minuten Einwirkdauer

zu verwenden.

³ Zum Temperaturkriterium siehe Absatz 2.2.6.

⁴ Wenn die berechnete Rauchschichttemperatur weniger als 100 K über Umgebungstemperatur beträgt, müssen 0,5 m zu jedem Mindestwert von *d* hinzu addiert werden.

Einwirkung	Strahlungsintensität q _{rad} bzw. Temperatur θ	zugeordnete erträgliche Einwirkzeit τ	Quelle
Strahlung	< 2,5 kW/m ²	$\tau_{rad} > 5 \min$	[18], [106]
	2,5 kW/m²	$\tau_{rad} = 30 \ s$	[18], [106]
	10 kW/m²	$\tau_{\rm rad} = 4 {\rm s}$	[18], [106]
Konvektion	< 32°C (feucht gesättigt)	arbeitende Personen: $\tau_{conv} = 32 \min$	[95]
	< 40°C (feucht gesättigt)	$\tau_{\rm conv} > 30 \min$	[106]
	< 60°C (feucht gesättigt)	$\tau_{\rm conv} > 30 \min$ (vergl. Text)	[18]
	100°C (< 10 Vol-% H ₂ O)	$\tau_{\rm conv} = 12 \min$	[18], [106]
	120°C (< 10 Vol-% H ₂ O)	$\tau_{\rm conv} = 7 \min$	[18], [106]
	140°C (< 10 Vol-% H ₂ O)	$\tau_{\rm conv} = 4 \min$	[18], [106]
	160°C (< 10 Vol-% H ₂ O)	$\tau_{\rm conv} = 2 \min$	[18], [106]
	180°C (< 10 Vol-% H ₂ O)	$\tau_{\rm conv} = 1 \min$	[18], [106]

Tabelle 2.2-2: Erträglichkeitsgrenzen für Wärme

Die gemeinsame Wirkung von konvektiver Wärme und von Strahlungswärme ist nach PURSER mit der "Fractional Effective Dose"

$$FED = \frac{\tau_{\rm rad} + \tau_{\rm conv}}{\tau_{\rm rad} \cdot \tau_{\rm conv}} \cdot \Delta t$$
(2.2-1)

zu beurteilen. Die Erträglichkeitsgrenze ist erreicht, wenn FED = 1 ist. In der Gleichung (2.2-1) steht Δt für die im speziellen Fall notwendige Einwirkdauer in Minuten, wie z.B. 30 Minuten für die anzusetzende Dauer der Begehbarkeit von Rettungswegen. In dieser Gleichung und in der Tabelle 2.2-2 ist τ_{rad} die maximal erträgliche Einwirkzeit in Minuten für eine im Brandfall zu erwartende Strahlungsintensität und τ_{conv} die maximal erträgliche Einwirkzeit in Minuten für eine im Brandfall zu erwartende Lufttemperatur.

Nach PURSER kann für die von der Einwirkdauer abhängige Wirkung von Strahlungswärme die Gleichung

$$\tau_{\rm rad,i} = C_{\rm i} \cdot \dot{q}_{\rm rad}^{-4/3}$$
 (2.2-2)

in den Grenzen $\dot{q}_{\rm rad} = 2,5$ kW/m² und ca. $\dot{q}_{\rm rad} = 10$ kW/m² angewendet werden. Eine Strahlungsintensität von $\dot{q}_{\rm rad} = 2,5$ kW/m² ist der Schwellenwert für die Exposition von Haut gegenüber Strahlungswärme. Unterhalb dieses Wertes ist eine Exposition mindestens für einige Minuten tolerabel. Um diesen Wert oder darüber treten Hautschmerzen und innerhalb weniger Sekunden Verbrennungen der Haut auf. Die Auswertung der Gleichung (2.2-2) ist in Bild 2.2-1 grafisch dargestellt. Das unterste Feld zeigt die Erträglichkeitsgrenze mit $C_i = 1,33$ am unteren und $C_i = 1,67$ am oberen Rand. Darüber beginnen

Schmerz und Verbrennungen ersten Grades. Das große schraffierte Feld deckt mit $C_i = 4$ am unteren und $C_i = 12,17$ am oberen Rand den Bereich der Verbrennungen zweiten Grades ab. Verbrennungen dritten Grades beginnen etwa an der Linie mit $C_i = 16,67$.

- <u>Beispiel:</u> Eine Person soll im Brandfall eine offen stehende Brandraumtür passieren können. Im Flur herrsche eine Temperatur von 180°C; die aus der offenen Tür bei der flüchtenden Person ankommende Strahlungsintensität betrage 10 kW/m². Wie viel Zeit bleibt der Person, um die offene Tür zu passieren?
- <u>Lösung</u>: Tabelle 2.2-2 oder dem Bild 2.2-1 entnehmen wir $\tau_{rad} = 4$ s und der Tabelle 2.2-2 entnehmen wir $\tau_{conv} = 60$ s. Mit Gleichung (2.2-1) erhalten wir bis zur Grenze der Erträglichkeit (*FED*-Wert = 1) die zur Verfügung stehende Zeit mit $\Delta t = 3,75$ s; die hohe Strahlungsintensität bestimmt somit fast ausschließlich die zur Verfügung stehende Zeit, um die offene Tür zu passieren.



Bild 2.2-1: Die Wirkung von Strahlungswärme auf den Menschen

2.2.6 Temperatur in der Brandgasschicht über dem Rettungsweg

PURSER [96] schreibt zu Situationen, in denen Personen unterhalb ausgedehnter Rauchgasschichten flüchten müssen, dass eine Strahlungsintensität von 2,5 kW/m² von solchen Rauchgasschichten ausgehe, wenn die Rauchgastemperatur ca. 200°C aufweist. BEARD (USA) [11] fordert, dass zur Berechnung einer sicheren Fluchtzeit (calculating "Available Safe Egress Time", *ASET*: ein Begriff, der auch in den britischen Normentwurf [18] aufgenommen wurde) eine Rauchschichttemperatur "oberhalb der Augenhöhe" von 183°C angesetzt werden soll. Diese Rauchschichttemperatur entspricht dem vorgenannten Grenzwert einer Strahlungsintensität von ca. 2,5 kW/m² (mit $\varepsilon = 1$).

Die in Deutschland geübte Praxis, eine Rauchgasschicht bis zu 300°C über Kopf in Rettungswegen zuzulassen, muss deshalb auf Vertretbarkeit hinterfragt werden. Die DIN 18232-2 sagte hierzu in der Vergangenheit nichts aus und sagt auch in der Zukunft nichts dazu aus. In DIN 18232-1, Ausgabe 1989 [29], wird eine "Grenztemperatur" in der Rauchschicht von 300°C benutzt, um die Grenze zwischen "Entstehungsbrand" und "fortentwickeltem Brand" zu definieren. Diese Grenztemperatur wurde auch angewendet, um zwischen Rauchabzug und Wärmeabzug zu unterscheiden; die Eignung von "Rauchabzügen" wurde nach [33] bei einer Temperatur von 300°C geprüft. In der europäischen Normungsarbeit stießen diese deutschen Definitionen auf völliges Unverständnis (es wurde die Frage gestellt, ob denn in Deutschland mit einem z.B. 250°C heißen Rauchgas keine Wärme abgeführt würde). Zur Frage, woher nun wirklich in Deutschland die Rechtfertigung kommt, Fluchtwege unterhalb von bis zu 300°C heißen Brandgasen zu bemessen, kann nur spekuliert werden. Möglicherweise liegt dies daran, dass bisher keine Personenschäden zu verzeichnen sind.

Auch die Geometrie von Räumen und die Lage der darin vorgesehenen Fluchtwege hat Einfluss auf den beim Flüchtenden ankommenden Strahlungswärmefluss; dadurch könnten unterschiedliche Grenztemperaturen in der Rauchschicht als erträglich definiert werden.

Die von Rauchschichten über Kopf auf Personen auftreffende Strahlung beträgt nämlich in nicht weit ausgedehnten Räumen weniger als in weit ausgedehnten Räumen. Die Gleichung (1.2-1) für die Strahlungsintensität ist um einen Faktor zu erweitern, der die geometrischen Verhältnisse berücksichtigt. Dieser Faktor kann Werte zwischen 0 und 1 annehmen und wird in Deutschland (noch) "Winkelverhältnis" und im englischsprachigen Bereich "view factor" oder "configuration factor" genannt; in der deutschen Ausgabe der EUROCODES wird bereits der Begriff "Konfigurationsfaktor" benutzt. Er besagt, welcher Anteil von der maximal möglichen Strahlungsintensität (wie in weit ausgedehnten Räumen) auf eine Fläche bzw. Person auftrifft.

Die charakteristischen Abmessungen für das "Winkelverhältnis" für eine Person in der Mitte eines Raumes sind in Bild 2.2-2 angegeben.



Bild 2.2-2: Zur Berechnung des Winkelverhältnisses

Die Maße *a* und *b* sind die halbe Länge und die halbe Breite des Raumes und *c* ist der Abstand zwischen dem Kopf einer Person und der Unterkante der Rauchschicht. Mit diesen Festlegungen ist das Winkelverhältnis aus der Literatur (z.B. dem SFPE-Handbook [109] bzw. $[110]^5$ oder Lehrbüchern über Strahlungsheizung) zu entnehmen:

$$F_{d1-2} = \frac{2}{\pi} \left\{ \frac{X}{\sqrt{1+X^2}} \arctan\left[\frac{Y}{\sqrt{1+X^2}}\right] + \frac{Y}{\sqrt{1+Y^2}} \arctan\left[\frac{X}{\sqrt{1+Y^2}}\right] \right\}$$
(2.2-3).

Die Auswertung dieser Gleichung ist für einige Parameter X in Bild 2.2-3 dargestellt.





⁵ Im Anhang des Handbuches sind die Seiten a und b als ganze Länge und Breite des Raumes eingesetzt. Dass dies nicht zutreffen kann, ergibt sich aus der dort richtig angegebenen Gleichung für die Fläche dA₁ unter der Ecke der Fläche A₂ mit den Seiten a und b, und den Regeln für das Zusammensetzen von Winkelverhältnissen.

- <u>Beispiel</u>: In einem Raum hat sich eine 300°C heiße schwarze Rauchschicht unter der Decke angesammelt. Ihre Unterkante liegt etwa 0,7 m über der Kopfhöhe von Personen. Die Raumlänge betrage 20 m und die Breite 10 m. Die Emissionszahl der Rauchschicht betrage $\varepsilon = 0.8$. Welche Strahlungsintensität kommt am Kopf einer Person an, wenn sich die Person 1) in der Mitte des Raumes oder 2) in der Ecke des Raumes befindet?
- <u>Lösung zu 1)</u>: Person in Raummitte: $X=20/(2 \times 0,7)=14,3$; $Y=10/(2 \times 0,7)=7,1$; aus Bild 2.2-3 erhalten wir für diese Werte das Winkelverhältnis $F_{d1-2}=1$. Die am Kopf ankommende Strahlungsintensität beträgt in Raummitte somit:

 $\dot{q}_{rad} = F_{d_{1-2}} \cdot \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4 = 1 \times 0.8 \times 5.67 \times 10^{-8} \times (273+300)^4 / 1000 = 4.9 \text{ kW/m}^2$

Dieser Wert liegt weit über der zuträglichen Größe!

<u>Lösung zu 2)</u>: Person in Raumecke: Es ist nur noch ¹/₄ des Raumes mit der Geometrie nach Bild 2.2-2 zu betrachten; *X*=20/0,7=28,6; *Y*=10/0,7=14,3; aus Bild 2.2-3 erhalten wir für diese Werte ebenfalls das Winkelverhältnis $F_{d1-2}=1$; nach den Regeln für das Zusammensetzen bzw. Zerlegen von Winkelverhältnissen ist nun ¹/₄ des Winkelverhältnisses anzusetzen, also $F_{d1-2}=0,25$. Die von oben auf den Kopf auftreffende Strahlungsintensität beträgt in der Raumecke deshalb "nur" 4,9 : 4 = 1,23 kW/m².

Dieser erträgliche Wert kann allerdings durch direkte Flammenstrahlung weit übertroffen werden.

HOSSER äußerte in der Diskussion während des Praxisseminars 2002 in Braunschweig, dass häufig "aus dem hohlen Bauch gezogene Regelungen" in Richtlinien stünden und keiner mehr weiß wo sie herkamen. Der mehrfach nachzulesende Vorschlag (z.B. bei U. SCHNEIDER [104]), dass die Temperatur in einer Rauchschicht über einem Rettungsweg auf 300°C zu begrenzen sei, gehört sicher auch zu dieser Kategorie.

Der europäische Normentwurfsvorschlag [43] und MORGAN et. al. [88] tragen den aufgezeigten unzuträglichen Strahlungsbedingungen unterhalb von heißen Rauchgasschichten dadurch Rechnung, dass sie eine Grenztemperatur von 200°C für Rauchgasschichten angeben, unter denen Rettungswege führen. Es wird deshalb dringend empfohlen, auch hier zu Lande diese Grenztemperatur festzulegen:

In einer Rauchgasschicht über Rettungswegen beträgt die höchstzulässige Temperatur 200°C.

Eine derartige Festlegung sollte die Möglichkeit eines rechnerischen Nachweises einer höheren zuträglichen Grenztemperatur über die zuträgliche Strahlungsintensität von 2,5 kW/m² aber nicht ausschließen.

2.3 Begrenzung der Wirkung erhöhter Temperaturen auf Bauteile

Die Standsicherheit von Gebäuden während eines Brandes wird in der BRD Deutschland grundsätzlich dadurch erzielt, dass die Bemessung der tragenden Bauteile für einen Vollbrand von 30 oder 90 Minuten erfolgt; für "hohe" Hochhäuser ist auch eine Bemessung für einen Vollbrand von 120 Minuten vorgesehen.

Bauteile, die aufgrund ihrer Art nicht feuerwiderstandsfähig, nämlich weder feuerhemmend noch feuerbeständig oder hochfeuerbeständig im Sinne des Baurechts ausgeführt werden können, wie z.B. die Tragkonstruktion eines Atriumdaches, müssen durch Begrenzung der Wirkung erhöhter Temperaturen standsicher bleiben. Hierbei muss sich die zulässige Temperaturbeanspruchung nicht nur an der Festigkeitsgrenze des verwendeten Baustoffes (in den meisten Fällen Stahl) orientieren sondern auch an den möglichen Dehnungen, um Zwängungskräfte zu vermeiden.

Bei üblichen Baustählen wird im Allgemeinen bei einer Temperatur von 500°C noch keine Überschreitung der zulässigen Spannungen eintreten, sofern keine Zwängungen infolge Dehnung auftreten. Zwängungen können vermieden werden, indem konstruktive Maßnahmen getroffen werden, die Dehnungen

- bei Normalstählen von mindestens 1 mm pro m und 100 K Temperaturanstieg und
- bei Chromstählen von mindestens 1,6 mm pro m und 100 K Temperaturanstieg

ermöglichen.

2.4 Begrenzung der Brandausbreitung und Vermeiden / Verzögern des Flash-over

Zusätzliche Maßnahmen zur Begrenzung der Brandausbreitung und zum Vermeiden bzw. Verzögern des Flash-over sind aus bauaufsichtlicher Sicht nur dann zu fordern, wenn erst dadurch die bauaufsichtlichen Schutzziele erfüllt werden können; vergl. Absätze 2.1 bis 2.3.

KUNZE [75] listete 1992 die Brandgefahren in Atriengebäuden auf und bewertete sie. Zur Frage der Brandausbreitung durch Strahlung in gegenüber liegende Nutzbereiche führt er aus, dass hierzu lediglich die Abstandsflächen zwischen den einzelnen Nutzungen entsprechend den baurechtlichen Regelungen einzuhalten seien. Er setzt dabei eine spärliche Möblierung zwecks Begrenzung der Brandlast im Atrium voraus. Die Entwicklung in der Nutzung von Atrien geht aber zu steigendem Komfort und führt damit zu höheren Brandlasten in den Atrien. Die Frage der Brandausbreitung durch Strahlung wird deshalb in Zukunft mit beantwortet werden müssen. Ingenieurmäßige Rechenverfahren hierzu hält die Fachliteratur vor; z.B. das SFPE-Handbook [109] oder [110]. KLOTE und MILKE [73] geben ein Rechenbeispiel an, bei dem Polstermöbel in einem Atrium bei genügendem gegenseitigem Abstand nicht mehr durch Strahlung in Brand geraten.

2.5 Anwendung von Entrauchungsanlagen und bestehende bauaufsichtliche Richtlinien

Es werden durch Auftrieb wirkende und als natürliche Entrauchungsanlagen oder Rauchabzugsanlagen bezeichnete und mit Ventilatoren betriebene und als maschinelle Entrauchungsanlagen oder Rauchabzugsanlagen bezeichnete Anlagen unterschieden. Anwendungsbereiche für solche Anlagen sind solche baulichen Anlagen oder Teile davon, bei denen Brandrauch nicht über Fenster ins Freie abströmen kann, wie z.B.

- 1. ein- und mehrgeschossige Industriebauten
- 2. Versammlungsstätten einschließlich Theatern
- 3. ein- und mehrgeschossige Einkaufszentren
- 4. Atrien und komplexe Gebäude
- 5. umbaute Parkhäuser.

In Tunnels werden ebenfalls Entrauchungsanlagen eingesetzt; dort überwiegen mit Ventilatoren betriebene Anlagen.

Entrauchungsanlagen sind Gegenstand des vorliegenden Bandes A des Forschungsberichtes (der Band B befasst sich Druckbelüftungsanlagen).

Bauaufsichtliche Anforderungen bezüglich der Rauchabführung liegen zu den vorgenannten baulichen Anlagen Ziffern 1. bis 3. vor. Die Entrauchung betreffende Bestimmungen sind im Folgenden abgedruckt.

Zu 1. für Industriebauten [6]

Muster-Richtlinie über den baulichen Brandschutz im Industriebau

(Muster-Industriebaurichtlinie - M IndBauRL)

- Fassung März 2000 -

Auszug Rauchabzug / selbsttätige Feuerlöschanlagen

5.6 Rauchabzug

5.6.2 Bei Produktions- und Lagerräumen, die einzeln eine Fläche von mehr als 1600 m² haben, muss eine ausreichende Rauchableitung vorhanden sein, damit eine Brandbekämpfung möglich wird. Eine ausreichende Brandbekämpfung ist in der Regel dann möglich, wenn für jede zur Brandbekämpfung erforderliche Ebene eine raucharme Schicht mit mindestens 2,5 m Höhe rechnerisch nachgewiesen wird. Die Einrichtungen zur Rauchableitung müssen die technischen Anforderungen an Rauchabzugsanlagen erfüllen.

5.6.3 Für Räume nach Abschnitt 5.6.2 mit selbsttätigen Feuerlöschanlagen genügen natürliche Rauchabzugsanlagen mit mindestens 0,5 % aerodynamisch wirksamer Rauchabzugsfläche, bezogen auf die Fläche des Raumes. Anstelle von Rauchabzugsanlagen können Lüftungsanlagen verwendet werden, wenn diese so gesteuert werden, dass sie im Brandfall nur entlüften. Diese Lüftungsanlagen müssen hinsichtlich ihrer Ventilatoren nicht für den Brandfall ausgelegt sein; im Übrigen müssen sie den Anforderungen nach der Richtlinie über die brandschutztechnischen Anforderungen an Lüftungsanlagen entsprechen.

5.6.4 Rauchabzugsanlagen in Räumen nach Abschnitt 5.6.2 ohne selbsttätige Feuerlöschanlage müssen automatisch auslösen und von Hand ausgelöst werden können. Die Bedienstellen sind mit der Aufschrift "Rauchabzug" zu kennzeichnen; sie müssen erkennen lassen, ob die Rauchabzugsanlage betätigt wurde.

5.7 Selbsttätige Feuerlöschanlagen

Es dürfen nur selbsttätige, für das vorhandene Brandgut geeignete Feuerlöschanlagen mit über den Räumen flächendeckend verteilten Düsen o. a. berücksichtigt werden.

Zu 2. für Versammlungsstätten einschließlich Theatern [8]

Musterverordnung über den Bau und Betrieb von Versammlungsstätten

(Muster-Versammlungsstättenverordnung - MVStättV)

- Fassung Mai 2002 -

Auszug Rauchableitung

§16 Rauchableitung

(1) Versammlungsräume und sonstige Aufenthaltsräume mit mehr als 200 m² Grundfläche sowie Bühnen müssen Rauchabzugsanlagen haben. Notwendige Treppenräume müssen Rauchableitungsöffnungen mit einer freien Öffnungsfläche von mindestens 1 m² haben.

(2) Rauchabzugsanlagen müssen so bemessen sein, dass sie eine raucharme Schicht von mindestens 2,50 m auf allen zu entrauchenden Ebenen, bei Bühnen jedoch mindestens eine raucharme Schicht von der Höhe der Bühnenöffnung, ermöglichen.

(3) Für Versammlungsräume und sonstige Aufenthaltsräume mit nicht mehr als 400 m² Grundfläche genügen Rauchableitungsöffnungen mit einer freien Öffnungsfläche von insgesamt 1 Prozent der Grundfläche, Fenster oder Türen mit einer freien Öffnungsfläche von insgesamt 2 Prozent der Grundfläche oder maschinelle Rauchabzugsanlagen mit einem Luftvolumenstrom von 36 m³/h je Quadratmeter Grundfläche.

(4) Rauchableitungsöffnungen sollen an der höchsten Stelle des Raumes liegen und müssen unmittelbar ins Freie führen. Die Rauchableitung über Schächte mit strömungstechnisch äquivalenten Querschnitten ist zulässig, wenn die Wände der Schächte die Anforderungen nach § 3 Abs. 3 erfüllen. Die Austrittsöffnungen müssen mindestens 0,25 m über der Dachfläche liegen. Fenster und Türen, die auch der Rauchableitung dienen, müssen im oberen Drittel der Außenwand der zu entrauchenden Ebene angeordnet werden.

(5) Die Abschlüsse der Rauchableitungsöffnungen von Bühnen mit Schutzvorhang müssen bei einem Überdruck von 350 Pa selbsttätig öffnen; eine automatische Auslösung durch geeignete Temperaturmelder ist zulässig.

(6) Maschinelle Rauchabzugsanlagen sind für eine Betriebszeit von 30 Minuten bei einer Rauchgastemperatur von 300°C auszulegen. Maschinelle Lüftungsanlagen können als maschinelle Rauchabzugsanlagen betrieben werden, wenn sie die an diese gestellten Anforderungen erfüllen.

(7) Die Vorrichtungen zum Öffnen oder Einschalten der Rauchabzugsanlagen, der Abschlüsse der Rauchableitungsöffnungen und zum öffnen der nach Absatz 4 angerechneten Fenster müssen von einer jederzeit zugänglichen Stelle im Raum aus leicht bedient werden können. Bei notwendigen Treppenräumen muss die Vorrichtung zum öffnen von jedem Geschoss aus leicht bedient werden können.
(8) Jede Bedienungsstelle muss mit einem Hinweisschild mit der Bezeichnung "RAUCHABZUG" und der Bezeichnung des jeweiligen Raumes gekennzeichnet sein. An der Bedienungsvorrichtung muss die Betriebsstellung der Anlage oder Öffnung erkennbar sein.

Zu 3. für Einkaufszentren einschließlich überdachter Einkaufsstraßen [4]

Muster-Verordnung über den Bau und Betrieb von Verkaufsstätten

(Muster-Verkaufsstättenverordnung) - MVkVO -

- Fassung September 1995 -

Auszug Rauchabführung

§ 16 Rauchabführung

(1) In Verkaufsstätten ohne Sprinkleranlagen müssen Verkaufsräume ohne notwendige Fenster nach § 44 Abs. 2 MBO sowie Ladenstraßen Rauchabzugsanlagen haben.

(2) In Verkaufsstätten mit Sprinkleranlagen müssen Lüftungsanlagen in Verkaufsräumen und Ladenstraßen im Brandfall so betrieben werden können, dass sie nur entlüften, soweit es die Zweckbestimmung der Absperrvorrichtungen gegen Brandübertragung zulässt.

(3) Rauchabzugsanlagen müssen von Hand und automatisch durch Rauchmelder ausgelöst werden können und sind an den Bedienungsstellen mit der Aufschrift "Rauchabzug" zu versehen. An den Bedienungseinrichtungen muss erkennbar sein, ob die Rauchabzugsanlage betätigt wurde.

(4) Innenliegende Treppenräume notwendiger Treppen müssen Rauchabzugsanlagen haben. Sonstige Treppenräume notwendiger Treppen, die durch mehr als zwei Geschosse führen, müssen an ihrer obersten Stelle eine Rauchabzugsvorrichtung mit einem freien Querschnitt von mindestens 5 v. H. der Grundfläche der Treppenräume, jedoch nicht weniger als 1 m² haben. Die Rauchabzugsvorrichtungen müssen von jedem Geschoss aus zu öffnen sein.

Zu 4. für Atrien und komplexe Gebäude

Für Atrien und komplexe Gebäude bestehen derzeit keine festgeschriebenen Regelungen. Beteiligte sind sich aber schon geraume Zeit darüber im Klaren, dass Entrauchungsanlagen und andere Kompensationsmaßnahmen erforderlich sind; vergl. z.B. HOSSER / DOBBER-NACK [61], JOHN / SEEGER [69], KUNZE [75].

Zu 5. für umbaute Parkhäuser

Umbaute Parkhäuser bedürfen nach dem Muster einer Verordnung über den Bau und Betrieb von Garagen (Muster-Garagenverordnung) - GarVO - Fassung Mai 1993 – (geändert durch Beschlüsse vom 19. September 1996 und vom 18./19. September 1997) keiner Entrauchungsanlagen. Etwa in der Hälfte der Bundesländer werden jedoch Anforderungen gestellt, die den Einsatz von maschinellen Entrauchungsanlagen vorsehen; ein deutscher Hersteller von Entrauchungsventilatoren hat die unterschiedlichen Anforderungen in den einzelnen Bundesländern durch den TÜV-Südwest zusammenstellen lassen [121].

2.6 Anwendung von Druckbelüftungsanlagen und bestehende bauaufsichtliche Richtlinien

Druckbelüftungsanlagen dienen wie Entrauchungsanlagen der Ableitung von Rauch im Brandfalle. Sie erfüllen diese Aufgabe dadurch, dass sie einen zu schützenden Bereich (meist notwendige Treppenräume oder Sicherheitstreppenräume) bei geschlossenen Türen unter Überdruck gegen die angrenzenden Nutzbereiche halten, um dadurch ein Eindringen von Brandgasen in den zu schützenden Bereich zu vermeiden. Bei geöffneten Türen sollen sie in der Lage sein, einen ausreichend großen Luftvolumenstrom durch die Türöffnung in das brennende Geschoss zu leiten, um eine Brandgasströmung in den zu schützenden Bereich auszuschließen. Druckbelüftungsanlagen arbeiten immer mit Ventilatoren.

Das Ableiten von Brandrauch erfolgt mit Druckbelüftungsanlagen also nicht durch Absaugen sondern durch Verdrängen.

Bauaufsichtliche Richtlinien, die Druckbelüftungsanlagen fordern, bestehen für innenliegende notwendige Treppenräume und Sicherheitstreppenräume. Die Anforderungen für Druckbelüftungsanlagen in Hochhäusern finden sich im Abschnitt 3.6 Treppenräume der Hochhausrichtlinien. Die betreffenden Bestimmungen sind im Folgenden abgedruckt.

Druckbelüftungsanlagen in Hochhäusern [2]

Muster für Richtlinien über die bauaufsichtliche Behandlung von Hochhäusern

- Fassung Mai 1981 -

Auszug aus 3.6 Treppenräume

3.6.1 Anzahl, Zugänglichkeit

In Hochhäusern sind mindestens zwei Treppen oder statt zweier Treppen eine Treppe in einem Sicherheitstreppenraum (§ 42 Abs. 2 Satz 1MBO) notwendig. Ist nur ein einziger Sicherheitstreppenraum vorhanden, muss dieser an der Außenwand liegen (Nr. 3.6.6.1). Sind zwei und mehr notwendige Treppen vorhanden, so müssen sie entgegengesetzt und in verschiedenen Rauchabschnitten nach Nr. 3.7.1.1 liegen. In Hochhäusern, bei denen das Maß nach § 2 Abs. 4 MBO mehr als 60 m beträgt, müssen alle notwendigen Treppen in Sicherheitstreppenräumen liegen, mindestens müssen jedoch zwei Treppen mit Sicherheitstreppenräumen vorhanden sein. In jedem Geschoss müssen zwei Treppen in Sicherheitstreppenraum, in Hochhäusern nach Satz 4 zwei Treppen in Sicherheitstreppenräumen erreichbar sein.

3.6.2 Bauliche Beschaffenheit

•••

Treppenräume müssen an ihrer obersten Stelle eine Rauchabzugsöffnung haben. Die Öffnung muss einen freien Querschnitt von mindestens 5 v. H. Grundfläche des zugehörigen Treppenraumes, mindestens jedoch 1 m² haben; liegt die Öffnung in einer Wand, muss der freie Querschnitt jedoch mindestens 7,5 v. H., mindestens jedoch 1,5 m² haben.

Die Vorrichtung zum Öffnen und Schließen der Rauchabzüge müssen im Treppenraum liegen und in jedem Geschoss bedient werden können. Die Bedienungsstellen müssen in jedem Geschoss mit der Aufschrift "Rauchabzug" und im Erdgeschoss zusätzlich mit dem Schild "Bei Betätigung Türen bis zum Freien öffnen" sowie mit den erforderlichen Hinweisen für das Öffnen und Schließen des Rauchabzugs gekennzeichnet sein. Die Stellung der Rauchabzugsklappe (-offen oder geschlos-

^{•••}

sen-) muss jederzeit an den Bedienungsstellen erkennbar sein. Automatisch betätigte Rauchabzugsvorrichtungen müssen so beschaffen sein, dass sie zusätzlich von Hand betätigt werden können.

3.6.3.2 Lage im Gebäudeinnern

Nach § 43 Abs. 1 Satz 2 MBO können innenliegende Treppenräume gestattet werden, wenn ihre Benutzung durch Raucheintritt nicht gefährdet werden kann und wegen des Brandschutzes Bedenken nicht bestehen. Diese Voraussetzungen sind erfüllt, wenn folgendes eingehalten wird:

a) Die innenliegenden Treppenräume dürfen nur über Vorräume zugänglich sein; die Vorräume dürfen weitere Öffnungen nur zu allgemein zugänglichen Fluren, Aufzügen und Sanitärräumen haben. Türen zwischen Treppenraum und Vorräumen müssen selbstschließend und mindestens feuerhemmend sein und aus nichtbrennbaren Baustoffen bestehen. Türen zwischen Vorräumen und allgemein zugänglichen Fluren müssen rauchdicht und selbstschließend sein. Zwischen Türen zum Treppenraum und Türen zu allgemein zugänglichen Fluren muss ein Abstand von mindestens 3 m bestehen. Liegen an den Vorräumen Aufzüge, so dürfen alle Haltestellen der Aufzüge nur über Vorräume zugänglich sein.

b) Der Treppenraum ist mit einer Lüftungsanlage zu versehen, die auf Dauer einen mindestens einfachen Luftwechsel je Stunde erreicht. Im Brandfall muss diese oder eine andere Lüftungsanlage den Treppenraum mit einem Luftvolumenstrom von mindestens 10.000 m³/h von unten nach oben durchspülen. Der im Treppenraum durch diesen Luftvolumenstrom entstehende maximale Überdruck gegenüber der Atmosphäre darf 50 Pa nicht überschreiten. Dies kann z.B. durch ausreichend große Öffnungen im oberen Teil des Treppenraumes erreicht werden. Die verstärkte Lüftung muss durch Rauchschalter in jedem Geschoss selbsttätig in Betrieb gesetzt werden können. Die Rauchabzugsöffnungen sind entsprechend zu bemessen; ihre Größe muss jedoch mindestens Nr. 3.6.2 entsprechen. Die Lüftungsanlage für den Brandfall ist an die Ersatzstromversorgung anzuschließen; ihre Bemessung ist nachzuweisen. Sie ist einschließlich der Ansaugleitung vom Freien so anzuordnen und herzustellen, dass Feuer und Rauch durch sie nicht in den Treppenraum übertragen werden können.

c) Die Treppenläufe dürfen im Treppenraum nicht durch Wände oder Schächte voneinander getrennt sein. Die Treppenräume dürfen nicht in Rauchabschnitte unterteilt werden.

3.6.6 Sicherheitstreppenräume

Sicherheitstreppenräume müssen mit ihren Zugängen so beschaffen sein, dass Feuer und Rauch nicht in sie eindringen können.

3.6.6.3 Lage im Gebäudeinnern

Wird ein innenliegender Sicherheitstreppenraum gestattet, so darf dieser in jedem Geschoss nur über eine Sicherheitsschleuse erreichbar sein. Die Sicherheitsschleuse muss selbstschließende, mindestens feuerhemmende Türen haben. Sie muss mindestens 1,5 m breit sein; die Türen müssen mindestens 3 m voneinander entfernt sein.

Jeder Treppenraum mit den zugehörigen Sicherheitsschleusen muss eine eigene Lüftungsanlage haben. Der Treppenraum muss mit seinen Zugängen und der Lüftungsanlage so beschaffen sein, dass Feuer und Rauch nicht in ihn eindringen können.

Diese Voraussetzungen sind erfüllt, wenn die Lüftungsanlage des Treppenraumes nach Nr. 3.6.3.2 so eingerichtet oder durch eine zweite Lüftungsanlage für alle Schleusen ergänzt wird, dass im Brandfall bei geöffneten Schleusentüren in dem vom Brand betroffenen Geschoss und beim ungünstigsten Druck im Treppenraum von der Schleuse in den Brandraum ein Luftvolumenstrom

$V_L = k \cdot b \cdot h^{1,5}$ in m³/s

strömt. Darin sind b und h die Breite und Höhe der Tür in Meter, k ist ein Faktor, der von der Temperatur abhängig ist, die im Brandfall in dem an den Treppenraum angrenzenden Raum auftreten kann. Schließt an die Schleuse ein allgemein zugänglicher Flur an, so ist k = 1,5, in allen anderen Fällen k = 1,8 anzusetzen.

Die für diesen Volumenstrom erforderliche Druckdifferenz richtet sich nach der Art, wie die Rauchgase aus dem Brandraum ins Freie abgeführt werden. Werden die Rauchgase durch z.B. waagerechte Kanäle aus dem Brandraum gedrückt, so muss der Druck in der Schleuse entsprechend dem Strömungswiderstand erhöht werden, sind Schächte angeordnet oder Abzugsventilatoren, die im Brandraum einen Unterdruck erzeugen, so kann bei fensterlosen Räumen der Druck in der Schleuse um den Betrag des erzeugten Unterdrucks im Brandraum verringert werden. Bei Räumen mit Fenstern ist die Lüftungsanlage für einen Druck in der Schleuse von mindestens 10 Pa auszulegen. Auf keine Tür darf ein höherer Druck als 50 Pa auftreten. Dies muss durch selbsttätig wirkende Vorrichtungen (z.B. Druckentlastungsklappen zum Freien oder zum Vorraum oder Flur mit Abluftöffnung zum Freien, Regelung des Zuluftstromes) sichergestellt sein.

Das Druckbelüftungssystem muss in jedem Geschoss durch Rauchschalter selbsttätig in Betrieb gesetzt werden können. Es muss im Erdgeschoss auch von Hand eingeschaltet werden können. Die Rauchabzugsklappen in den Schächten oder Kanälen müssen in Brandgeschoss vom Rauchschalter geöffnet werden können. Die Schächte müssen feuerbeständig sein. Die Klappen müssen ausreichend widerstandsfähig gegen Feuer sein.

Die Funktions- und Leistungsfähigkeit des Druckbelüftungssystems ist durch ein Gutachten einer sachverständigen Stelle nachzuweisen. Die Lüftungsanlagen sind an die Ersatzstromversorgungsanlage anzuschließen.

Die vorgenannte Muster-Richtlinie wurde in den einzelnen Bundesländern unterschiedlich umgesetzt.

Auf Druckbelüftungsanlagen und die Bewertung der hierzu bestehenden bauaufsichtlichen Regelungen wird im Band B dieses Forschungsberichtes ausführlich eingegangen.

3 Bemessungsgrundlagen für Entrauchungsanlagen

3.1 Modellierung der Bemessungsschritte

3.1.1 Allgemeines

Kaum ein reales Brandszenario glich bisher einem anderen. Kernstück ingenieurmäßiger Modellierung von Brandszenarien muss deshalb die Wahl möglichst weniger nutzungsbezogener Bemessungsbrände sein. Diese sind auf die Erfüllung der verschiedenen Schutzziele hin zu untersuchen und zu beurteilen. Dabei wird man in jedem Einzelfall Brandszenarien mit geringer Auswirkung auf die brandschutztechnische Sicherheit einer baulichen Anlage ausschließen können.

Wesentliche Einflussgrößen auf ein Brandszenario sind zum Beispiel die

- Menge, Art, Verteilung und Oberflächenbeschaffenheit von brennbaren Stoffen
- Art, Größe und Lage möglicher Zündquellen
- Zuverlässigkeit von Brandmeldeeinrichtungen
- Art des Brandes, beeinflusst
 - durch die Lüftungsbedingungen innerhalb des Brandraumes und
 - durch Umwelteinflüsse wie Wind und Thermik insbesondere abhängig von der Stellung von Türen und dem Bruch oder dem Offenstehen von Fenstern
- Feuerlöscheinrichtungen.

Für den Personenschutz müssen für jedes Brandszenario ausreichend lange Zeit erträgliche Bedingungen herrschen. Der Faktor Zeit wird erheblich beeinflusst durch

- die Nutzung des Gebäudes (Ortskundige oder –unkundige, Gesunde oder Kranke, Behinderte, Fertigung, Veranstaltungen mit großen Personendichten, gesicherte Einrichtungen wie Banken und Museen)
- die Komplexität des Gebäudes
- die Leistungsfähigkeit der Feuerwehr und der Rettungsdienste.

Gemäß der Aufgabenstellung waren Grundlagen zur Entrauchung für bauaufsichtliche Belange bereit zu stellen. Dies begrenzt die Brandszenarien im Wesentlichen auf Entstehungsbrände (begrenzte Brände; Brände in der Pre-flash-over-Phase). Voll entwickelte Brände (das sind Brände in der Post-flash-over-Phase) werden nur insoweit betrachtet, als ihre Brandgase mittelbar über angrenzende Bereiche abzuführen sind. Dieser Fall liegt z.B. bei einem Vollbrand in einem Raum mit Fenster zu einem überdachten Atrium vor. Die Aufgabenstellung wird zurückgeführt auf einen begrenzten Brand an einer Wandöffnung des Atriums.

Den Veröffentlichungen des BRE [16] und von THOMAS [119] ist zu entnehmen, dass seit Beginn der Erforschung von Brandgeschehen die Modellierung von Bränden eine große Rolle spielt. Es werden sowohl experimentelle Modelle als auch mathematische Modelle angewendet.

1 : 1-Raumbrände und Feuerwiderstandsprüfungen an Bauteilen sind vertraute Beispiele für experimentelle Brandmodelle. YAMANA und TANAKA berichteten 1985 über 1 : 1-Versuche an einem Modell-Atrium [130]. Es werden auch experimentelle Brandmodelle (engl.: physical fire models) in verkleinertem Maßstab angewendet. Modellgesetzmäßigkeiten sind z.B. bei GERHARDT [48], WILK und KOTHOFF [129] oder in den US-amerikanischen Richtlinien bzw. Normen NFPA 92B [90] und NFPA 204 [91] nachzulesen. Die genannten NFPA-Dokumente sehen auch die Abbildung des thermischen Verhaltens der baulichen Anlagen im Modell vor. Die in Großbritannien und in Deutschland angewendete Methode, an Stelle von heißen Brandgasen im Modell Helium zu verwenden, lässt das thermische Verhalten der Bauteile völlig außer Acht.

Die mathematische Behandlung von Brandereignissen unterscheidet Zonenmodelle, die eine lange Tradition haben, und Feldmodelle, die erst durch leistungsfähige Computer möglich wurden.

Der BRE Digest 367 [16] zeigt auf, dass die Ergebnisse aus Zonenmodellen zu den gleichen Aussagen führen können wie die von Feldmodellen. Der Einsatz von Feldmodellen für sehr hohe und weit verzweigte bauliche Anlagen wird aber für sinnvoll angesehen. GERHARDT [45] weist darauf hin, dass die Untersuchung des Windeinflusses nötig sei und stellt in [46] die Eignung rechnerischer Verfahren in Frage; hierzu erfolgte von DOBBBERNACK eine Erwiderung [39]. Erprobungstests am nahezu fertig gestellten Objekt werden zur Bestätigung der richtigen Bemessung gefordert und durchgeführt, wie dies z.B. von Morgan et. al.1994 über den Flughafen in Brüssel [87] oder von BLUME und HOSSER 2001 über die Köln-Arena [14] berichtet wird. Die Forderung nach Rauchversuchen am Objekt führte in Deutschland bereits zu einer Richtlinie des VFDB [127]. "Bei Gebäudeentrauchung muss jedes Wetter passen" wurde in [122] zutreffend ausgesagt. Die Frage, ob eine bei jedem Wetter funktionierende Entrauchung durch einen Entrauchungsversuch mit den zufälligen Randbedingungen der Außentemperatur X und der Windverhältnisse Y mit "Ja" bestätigt werden kann, bleibt aber unbeantwortet.

Eine Entscheidung darüber, inwieweit Windeinflüsse experimentell oder mathematisch berücksichtigt werden müssen oder können, wird im Einzelfall zu klären bleiben. Hilfreich für eine Entscheidung ist die Ermittlung der Antriebskräfte aller Rauchgasbewegungen in Gebäuden, nämlich Schornsteineffekt, Winddruck, Auftriebsdruck der Brandgase und Druck von maschinell betriebenen Lüftungs- und Entrauchungsanlagen. In hohen Atrien wird der schwindende Auftriebsdruck vielfach zu maschinellen Anlagen zwingen und damit sicher in vielen Fällen die Untersuchung des Windeinflusses erübrigen. JOHN und SEEGER [68] und [69] forderten 1991 und 1992 nach einer Bewertung der verfügbaren Drücke wenigstens in der Frühphase eines Brandes einen maschinellen Rauchabzug zu verwenden. Für die heißere Phase eines Brandes bevorzugten sie – wie damals in Deutschland üblich – einen natürlichen Abzug (ohne Ventilatoren).

Der vorliegende Bericht konzentriert sich auf mathematisch formulierbare Grundlagen für die Entrauchung. Für den "täglichen" Gebrauch können – zumindest bisher – nur Zonenmodelle empfohlen werden. Fertig als Computer-Code (Rechenprogramme) bereit gestellte Feldmodelle verlangen große Erfahrung im Umgang damit und in der Beurteilung der erzielten Ergebnisse; vergleiche hierzu Abschnitt 17.4 "Mis-use of computer models" in [88]. Gleichzeitig mit der Entwicklung der Feldmodelle wurden die Zonenmodelle weiter verfeinert und abgesichert und genießen hohes Vertrauen, solange sie innerhalb ihrer Gültigkeitsgrenzen angewendet werden; vergl. hierzu z.B. SCHNEIDER [102] und [103] oder BRE DD 240 Part 1 [18] und Part 2 [19]. Feldmodelle sollten zumindest derzeit noch speziellen Anwendungen vorbehalten bleiben. Sie sind auch bei der Ermittlung von Algorithmen für Zonenmodelle einsetzbar; z.B. spricht THOMAS 1998 [120] von einer CFD-Hilfestellung für den Überlaufplume an Balkonen.

Im Folgenden werden deshalb einfach handhabbare Algorithmen für Einraum-Zonenmodelle nach Absatz 3.1.2 und für Mehrraum-Zonenmodelle nach Absatz 3.1.3 zusammengestellt.

3.1.2 Einraum-Zonenmodell

Das einfachste Zonenmodell unterscheidet eine kalte Zone über dem Fußboden eines Raumes und eine heiße Zone unter der Decke bzw. unter dem Dach eines Raumes. Die kalte Zone ist die rauchfreie bzw. die raucharme Schicht mit der Dicke *d*, für die näherungsweise eine einheitliche Temperatur (Raumtemperatur; Zulufttemperatur) angesetzt wird. Die heiße Zone ist die unter der Decke bzw. unter dem Dach angesammelte Rauchschicht. Für sie wird ebenfalls näherungsweise eine einheitliche Temperatur angesetzt, obwohl sich eine Deckenströmung mit höherer Temperatur einstellt. Diese beiden idealisierten Zonen werden durch eine horizontale Trennebene mit einem Temperatursprung voneinander getrennt. In der kalten Zone befindet sich die Brandstelle – das Feuer – mit dem aufwärts strömenden Rauchgas-Plume. Das Feuer und der Plume ziehen Luft aus dem Raum an. Dies führt zur weitgehend vollständigen Verbrennung und der deutlichen Zunahme des Rauchgasstromes bis zum Eintritt in die Rauchschicht (heiße Zone). Mit der Zunahme des Rauchgasstromes im Plume mit zunehmender Höhe über der Brandstelle nimmt die Temperatur im Plume und damit seine Auftriebskraft ab.

Bild 3.1-1 (nach COOPER [20]) zeigt die Ausbildung einer Deckenströmung über der Rauchschicht. Die Rauchschicht selbst ist praktisch nicht in Bewegung, so dass Massen-, Energie- und Impulsaustausch mit der darunter liegenden kalten Zone vernachlässigbar gering sind. Die ganze Dynamik eines Brandes beschränkt sich auf das Feuer und den Plume. Dies sind die wesentlichen Voraussetzungen für die Anwendbarkeit von Zonenmodellen.

COOPER [20] nutzte die Ausbildung einer Deckenströmung in der Rauchschicht dazu aus, für die US-Regierung einen Computer-Code mit der Bezeichnung LAVENT für die Berechnung des Auslöseverhaltens von Sprinklern und Auslöseelementen für Rauch- und Wärmeabzüge zu entwickeln. Das Programm wurde in den US-Standard NFPA 204 [91] aufgenommen. Es ist kostenlos aus dem Internet unter der Adresse

http://www.bfrl.nist.gov/866/fmabbs.html

herunter zu laden; die Beschreibung von LAVENT im Internet ist in der Fußnote⁶ wiedergegeben. Im vorliegenden Bericht wird auf das Programm nicht weiter eingegangen⁷.



Bild 3.1-1: Ausbildung einer Deckenströmung über der "ruhenden" Rauchschicht (nach Cooper [20])

⁶ <u>LAVENT</u> is a program developed to simulate the environment and the response of sprinkler links in compartment fires with draft curtains and fusible link operated ceiling vents. The model, used to calculate the heating of the fusible links, includes the effects of the ceiling jet and the upper layer of hot gases beneath the ceiling. The required program inputs are the geometrical data describing the compartment, the thermo-physical properties of the ceiling, the fire elevation, the time dependent energy release rate of the fire, the fire diameter or energy release rate per area of the fire, the ceiling vent area, the fusible link response-time-index (RTI) and fuse temperature, the fusible link positions along the ceiling, the link assignment to each ceiling vent, and the ambient temperature. A maximum of five ceiling vents and ten fusible links are permitted in the compartment. The program outputs are the temperature, mass and height of the hot upper layer, the temperature of each link, the ceiling j et temperature and velocity at each link, the radial temperature distribution along the interior surface of the ceiling, the radial distribution of the heat flux to the interior and exterior surfaces of the ceiling, the fuse time of each link, and the vent area that has been opened. LAVENT is supported by two-part documentation which includes: Part I- Theory, L.Y. Cooper; and Part II - User Guide, W. D. Davis and L.Y. Cooper. LAVENT was written in FORTRAN by W. D. Davis and L.Y. Cooper.

⁷ ALPERT [1] gab Formeln für die Deckenströmung zur Berechnung des Auslöseverhaltens von Sprinklern mit einfachen Tabellenkalkulationen an. HOSSER und DEHNE geben diese Formeln auch in ihrem vereinfachten brandschutztechnischen Nachweis ... an [63].

Bild 3.1-2 zeigt den einfachsten Fall eines Zonenmodelles; die Erläuterungen finden sich in Tabelle 3.1-1.



Bild 3.1-2: Einraum-Zonenmodell (links MRA, rechts NRA)

Nr. im Bild (zugleich Absatz)	Bezeichnung (zugleich Absatz-Überschrift)
3.2.4	Größe und Intensität von Bemessungsbränden
3.3.1	Plume direkt über dem Feuer
3.3.2	Rauchgasströmung aus einer Öffnung des Raumes heraus – Fenster-Plume
3.3.3	Rauchgasströmung unter Vorsprüngen und Balkonen – Balkon-Plume
3.3.4	Überström-Plume oder Spill-Plume
3.4.2	Rauchschicht
3.4.3	Rauchschürzen
3.4.4	Abzugseinrichtungen
3.4.5	Zulufteinrichtungen
3.4.6	Äußere Einflüsse

3.1.3 Mehrraum-Zonenmodelle

Bild 3.1-3 zeigt ein Mehrraum-Zonenmodell mit zwei Rauchabschnitten, die durch eine Rauchschürze voneinander getrennt sind.



Bild 3.1-3: Mehrraum-Zonenmodell mit zwei Rauchabschnitten (oben links MRA, oben rechts NRA)

Bild 3.1-4 zeigt ein Atrium als Mehrraum-Zonenmodell mit Raumbrand in der Pre-flashover-Phase. Das gleiche Atrium ist in Bild 3.1-5 mit einem Vollbrand in einem oberen Geschoss dargestellt. die Erläuterungen zu beiden Bildern finden sich in der Tabelle 3.1-1.



Bild 3.1-4: Atrium als Mehrraum-Zonenmodell mit Raumbrand in der Pre-flash-over-Phase



Bild 3.1-5: Atrium als Mehrraum-Zonenmodell mit Raum in der Vollbrandphase

3.1.4 Erhaltungssätze für Masse, Energie und Impuls

Die Erhaltungssätze für Masse einschließlich aller ihrer Einzelkomponenten und für Energie gelten für jeden frei wählbaren Bilanzierungsbereich. Für hinreichend stationäre Verhältnisse sind dann die Summen der in einen Bilanzierungsbereich einströmenden und ausströmenden Massen und Energiemengen gleich Null. Für die rechnerische Behandlung von Raumbränden mit Zonenmodellen werden zweckmäßiger Weise drei Bilanzierungsbereiche angewendet; diese sind in Bild 3.1-6 für die Massenströme \dot{m}_i und in Bild 3.1-7 für die Energieströme \dot{Q}_i eingetragen.



Bild 3.1-6: Massenbilanz im Zonenmodell



Bild 3.1-7: Energiebilanz im Zonenmodell

Bereich I kennzeichnet die raucharme Schicht, Bereich II das Feuer und den aufsteigenden Plume und Bereich III die Rauchschicht. Wie im Absatz 3.1.2 begründet, erfolgt zwischen dem Bereich I und dem Bereich III kein Massen- und Energieaustausch. An den gemeinsamen Grenzen dieser beiden Bereiche sind deshalb in den beiden Bildern durchgezogene Linien eingetragen.

Die Bilanzen lauten nach Bild 3.1-6 und Bild 3.1-7 für den gesamten Raum:

$$\dot{m}_{z} + \dot{m}_{f} - \dot{m}_{A} = 0$$
 (3.1-1),

$$\dot{Q}_{\rm Z} + \dot{Q}_{\rm f} - \dot{Q}_{\rm A} - \dot{Q}_{\rm P,Vr} - \dot{Q}_{\rm S,Vr} - \dot{Q}_{\rm S,Va} = 0$$
 (3.1-2),

für die raucharme Schicht (Bereich I) mit der Temperatur ϑ_z und der Dichte ρ_z :

$$\dot{m}_{\rm Z} - \dot{m}_{\rm E} = 0$$
 (3.1-3),

$$\dot{Q}_{\rm Z} - \dot{Q}_{\rm E} = 0$$
 (3.1-4),

für das Feuer mit dem aufsteigenden Plume (**Bereich II**) mit einer mit der Höhe z abnehmenden Temperatur ϑ_p und zunehmenden Dichte ρ_p :

$$\dot{m}_{\rm E} + \dot{m}_{\rm f} - \dot{m}_{\rm P} = 0 \tag{3.1-5},$$

$$\dot{Q}_{\rm E} + \dot{Q}_{\rm f} - \dot{Q}_{\rm P,Vr} - \dot{Q}_{\rm P} = 0$$
 (3.1-6),

für die Rauchschicht (**Bereich III**) mit der Temperatur ϑ_s und der Dichte ρ_s :

$$\dot{m}_{\rm p} - \dot{m}_{\rm A} = 0$$
 (3.1-7),
 $\dot{Q}_{\rm p} - \dot{Q}_{\rm S,Vr} - \dot{Q}_{\rm S,Va} - \dot{Q}_{\rm A} = 0$ (3.1-8).

Die Indizes in den vorgenannten Gleichungen bedeuten:

А	Abzug	P,Vr	Plume, Strahlungsverluste
c,0	konvektiver Anteil am Austritt		(Bereich I passierend)
	aus dem Brandraum	S	Rauchschicht
Е	Einmischung (engl.: entrainment)	S,Vr	Rauchschicht, Strahlungsverluste
f	freigesetzt durch das Feuer		(auch Bereich I passierend)
Р	Plume	S,Vα	Rauchschicht, konvektive Wärme-
Р	ohne Zusatz: Plume, konvektiver Anteil		verluste an Bauteile
		Z	Zuluft

Bild 3.1-6 und Bild 3.1-7 enthalten zusätzlich den Differenzdruck zwischen dem Brandraum und der Umgebung. An der rechten Seite ist dieser für natürlichen Rauchabzug dargestellt. Der Auftriebsdruck der Rauchschicht $\Delta p_{Auftrieb}$ dient als Antrieb für den Rauchabzug mit dem Druckverlust Δp_z an den Zuluftöffnungen und dem Druckverlust Δp_A an den Abzugsöffnungen; dabei wird vorausgesetzt, dass sich weder Wind noch Temperaturunterschiede zwischen innen und außen auswirken. An der linken Seite der Bilder zeigt die Druckdifferenz Δp_{MRA} qualitativ die mögliche Verschiebung der Druckverlaufslinie im Brandraum hin zu Unterdruck über die ganze Höhe *H* des Brandraumes.

Der Erhaltungssatz für den **Impuls** braucht in Zonenmodellen nicht formuliert zu werden, da die Auswirkungen des Impulses in den anzuwendenden Plume-Gleichungen nach Absatz 3.3 berücksichtigt sind bzw. durch Anforderungen, wie z.B. bei der Zuluft nach Absatz 0, begrenzt werden.

3.2 Der Brand als Bemessungsgrundlage

3.2.1 Stoffeigenschaften – Brandlast

3.2.1.1 Dichte von Luft und Brandgasen

Bei der ingenieurmäßigen Behandlung von brandschutztechnischen Fragestellungen bleiben im Allgemeinen Schwankungen der Luftfeuchte und des Luftdruckes außer Acht. Auch die Lage über dem Meeresspiegel wird nicht berücksichtigt⁸. Die Zusammensetzung der Brandgase kann unmittelbar über der Brandstelle sehr unterschiedlich sein. Mit zunehmendem Abstand von der Brandstelle beeinflussen die Verbrennungsprodukte infolge Lufteinmischung die Dichte des Brandgases aber nur noch unwesentlich.

Sowohl für ingenieurmäßige Bemessungen als auch für mehrere Prüfverfahren für im Brandschutz eingesetzte Bauprodukte (wie Rauchschutztüren und Entrauchungsleitungen) wird deshalb als Dichte für Luft und für Brandgase die Dichte ρ_0 trockener Luft im Normzustand (0°C und 1013,25 hPa)

$$\rho_0 = 1,293 \quad [kg/m^3]$$
 (3.2-1)

verwendet. Die Umrechnung auf andere Drücke und Temperaturen erfolgt nach dem Gesetz für ideale Gase nach der Beziehung

$$\rho = \left(\frac{\rho T}{p}\right)_{o} \cdot \frac{p}{T}$$
(3.2-2)

oder direkt aus

$$\rho = \frac{p}{RT} \tag{3.2-3}$$

⁸ Bei der Eignungsprüfung von Entrauchungsventilatoren kann die Lage über dem Meeresspiegel nicht vernachlässigt werden, da sie die elektrische Leistungsaufnahme der Antriebsmotoren spürbar beeinflusst.

mit der Gaskonstanten für Luft R = 287,0 J/kg,K. Werden Berechnungen für atmosphärischen Normaldruck von 1013,25 hPa durchgeführt, vereinfacht sich die Dichtebestimmung in Abhängigkeit von der absoluten Temperatur *T* der Luft oder des Brandgases auf ⁹

$$\rho = \frac{353}{T} \ [kg/m^3]$$
(3.2-4)

3.2.1.2 Spezifische Wärmekapazität und Energieinhalt von Luft und Brandgasen

Die spezifische Wärmekapazität c_p von Luft und von Brandgasen ist eine Stoffeigenschaft, die zur Berechnung der Temperatur der Brandgase bekannt sein muss. Für Brandgase wird die spezifische Wärmekapazität von Luft verwendet; dies wurde im vorigen Abschnitt begründet. Sie ist kein konstanter Wert sondern von der Temperatur 9 abhängig; bei 0°C beträgt sie 1,006 [kJ/kg, K] und steigt bis 1000°C auf 1,185 [kJ/kg, K] an. Diese Werte entsprechen der für Energiebilanzen notwendigen Definition einer mittleren spezifischen Wärmekapazität zwischen 0°C und der jeweiligen Temperatur 9. Aus Angaben im VDI-Wärmeatlas [123] wurde die folgende Approximationsgleichung mit 1‰ Fehlergrenze entwickelt [50] (Argumente in der cos-Funktion im Bogenmaß):

$$c_{p}(\vartheta) = 1,109 - 0,0924 \cdot \cos(0,15 \,\vartheta\pi \,/180) - 0,0066 \cdot \cos(0,3 \,\vartheta\pi \,/180) - 0,0035 \cdot \cos(0,45 \,\vartheta\pi \,/180) \, [kJ/kg, K]$$
(3.2-5).

Diese Gleichung ist in Computerprogrammen bequem zu verwenden, weil die meist erforderlichen iterativen Rechenschleifen kein Hindernis sind.

Für "Handrechnungen", die vielfach als Tabellenkalkulation durchgeführt werden, bevorzugt man einen festen Wert für die spezifische Wärmekapazität. U. SCHNEIDER [104] nennt einen konstanten Wert von $c_p = 1,05$ [kJ/kg, K], da die c_p -Werte "geringfügig" von der Temperatur abhängen und näherungsweise als konstant angenommen werden könnten. Im Folgenden wird begründet, weshalb der genannte Wert von $c_p = 1,05$ [kJ/kg, K] nicht für alle Aufgabenstellungen geeignet ist.

Der Energieinhalt von Luft oder Brandgas beträgt

$$q_{\rm vol} = Q/V = \rho \cdot c_{\rm p} \cdot \vartheta \quad [\rm MJ/m^3]$$
(3.2-6).

Bild 3.2-1 zeigt den Energieinhalt von Brandgasen in Abhängigkeit von der Temperatur. Die Kurve 1 entspricht dem realen Verhalten mit der von der Temperatur abhängigen spezifischen Wärmekapazität nach Kurve 3. Für die Kurve 2 wurde nach [104] eine konstante spezifische Wärmekapazität von 1,05 [kJ/kg, K]¹⁰ angesetzt.

⁹ Tanaka und Yamana haben die Anwendung dieses einfachen Ausdruckes bereits 1985 empfohlen [114].

¹⁰ Die gleiche spezifische Wärmekapazität erhält man aus (3.2-5) für eine Temperatur von 317°C.



Bild 3.2-1: Zum Einfluss des Wertes der spezifischen Wärmekapazität



Bild 3.2-2: Zum Einfluss des Wertes der spezifischen Wärmekapazität auf die Flash-over-Beurteilung

Bis 350°C treten Abweichungen in vernachlässigbarer Größenordnung auf. Bei Temperaturen im Bereich des Flash-over-Kriteriums von 550°C wachsen die Abweichungen zwischen den beiden Kurven vor allem in waagrechter Richtung stark an. Zur Verdeutlichung dieses Sachverhaltes zeigt Bild 3.2-2 einen Ausschnitt aus Bild 3.2-1. Für ein Brandgas mit einem Energieinhalt von 248 MJ je m³ erhält man mit einer spezifischen Wärmekapazität von 1,05 [kJ/m³,K] eine Temperatur von 550°C, also jene Temperatur, die üblicherweise als Flash-over-Kriterium verwendet wird. Mit der realen spezifischen Wärmekapazität (nach Kurve 3 in Bild 3.2-1) beträgt die Temperatur jedoch nur 492°C. Sie liegt also noch deutlich unterhalb des Flash-over-Kriteriums. Für die Auslegung einer maschinellen Entrauchungsanlage (mit nahezu konstantem Volumenstrom bei allen Temperaturen) ergibt sich mit $c_p = 1,05$ [kJ/m³,K] ein ca. 5% höherer notwendiger Volumenstrom als mit realer spezifischer Wärmekapazität, wenn gleiche Energiemengen bei 550°C abgeführt werden sollen.

Um diesen Nachteilen vorzubeugen, ohne die Gleichung (3.2-5) anwenden zu müssen, wird empfohlen, für Temperaturen im Bereich des Flash-over-Kriteriums eine spezifische Wärmekapazität $c_p = 1,10 \text{ [kJ/m}^3\text{,K]}^{11}$ anzusetzen. Die Kurve 4 in Bild 3.2-2 zeigt den Verlauf des Energieinhaltes der Brandgase in Abhängigkeit von der Temperatur unter Anwendung von $c_p = 1,10 \text{ [kJ/m}^3\text{,K]}$.

Für Luft ist $c_p = 1,00$ [kJ/m³,K] geeignet, da die dritte Kommastelle bei den geringen Temperaturen über oder unter 0°C ohnehin keinen Einfluss auf den Energieinhalt hat.

Somit ergeben sich folgende konstante Werte für c_p , die den Genauigkeitsansprüchen von Tabellenkalkulationen genügen¹²:

Luft	$c_{\rm p} = 1,00 [\rm kJ/m^3, K]$
Brandgas	$c_{\rm p} = 1,05 [\rm kJ/m^3, K]$
Brandgas, nahe der Flash-over-Temperatur	$c_{\rm p} = 1,10 [\rm kJ/m^3, K]$

3.2.1.3 Unterer Heizwert

Brennbare Stoffe, Leitungsanlagen, Wand-, Boden- und Deckenbeläge, Vorhänge, Mobiliar, technische Einrichtungen (Computer, Telekommunikationsmittel), Lagergüter etc. tragen entsprechend ihrem Heizwert, der Oberflächenbeschaffenheit, evtl. vorhandener Brandschutzausrüstungen und den Lüftungsbedingungen aktiv zum Brandgeschehen bei. Das Maß der maximalen Energiefreisetzung (das Energiepotential) brennbarer Stoffe ist der untere Heizwert H_u . Er wird sowohl in MJ/kg als auch in kWh/kg angegeben. Es besteht der Zusammenhang: 1 kWh = 3,6 MJ.

¹¹ Die gleiche spezifische Wärmekapazität erhält man aus (3.2-5) für eine Temperatur von 530°C.

¹² Es sei angemerkt, dass in NFPA 92B [90] einheitlich $c_p = 1,00$ [kJ/m³,K] angewendet wird. NFPA 204 [91] enthält trotz seines erheblichen Umfanges überhaupt keinen Zahlenwert zu c_p .

Die SI-Einheit MJ/kg wird in internationalen Normen (vergleiche z.B. EUROCODE 1 ([36]) und in der neuesten angelsächsischen Literatur angewendet. In Deutschland wird im Umfeld bauaufsichtsicher Belange meist die abgeleitete Sondereinheit kWh/kg der Vorzug gegeben, seit sich nach Aufgabe der "alten" Energieeinheit kcal eine gefühlsmäßige Vorstellung zu Gunsten von kWh entwickelte¹³.

Im Folgenden werden deshalb Werte des unteren Heizwertes¹⁴ auch in kWh pro Bezugseinheit angegeben. Die Bezugseinheit ist in den meisten Fällen ein kg Masse eines brennbaren Stoffes. Die unteren Heizwerte einiger fester, flüssiger und gasförmiger Stoffe wurden aus dem EUROCODE 1 entnommen und zusammen mit gerundeten Werten in kWh/kg in der Tabelle 3.2-1 wiedergegeben.

Bei Leitungsanlagen (elektrischen Leitungen und Rohrleitungen aus Kunststoffen) wird die mögliche Energiefreisetzung zweckmäßigerweise auf ein Meter Länge der Leitung bezogen. Hierzu liegen umfangreiche Tabellen in der Anlage zu einer Musterrichtlinie vor [22].

Angaben zum unteren Heizwert findet man an zahlreichen Stellen in der Literatur. Die Angaben streuen jedoch zum Teil beträchtlich. Nachdem viele Brandgeschehen auf den gleichwertigen Holzabbrand bezogen werden, wird die Streubreite der Angaben über den unteren Heizwert am Beispiel Holz aufgezeigt; vergleiche Tabelle 3.2-2. Für den Brennstoff "lufttrockenes Holz (mit 15% Feuchtegehalt)" ist ein unterer Heizwert von ca. 15 MJ/kg nach den Zeilen 7 und 8 dieser Tabelle zu gewährleisten. Setzt man diese Werte in die Formel über den Feuchteeinfluss auf den unteren Heizwert H_u

$$H_{\rm u} = H_{\rm u, \, trocken} \, (1 - 0.01 \cdot w) - 0.025 \cdot w \quad [\rm MJ/kg]$$
 (3.2-7)

nach Eurocode 1 [36] ein, so erhält man (mit w = Feuchtegehalt in Massen-%) für den unteren Heizwert von trockenem Holz den Wert

 $H_{u, \text{trocken}} = 18,1 \text{ [MJ/kg]}.$

Unveränderliche Holzbrandlasten in Gebäuden, wie permanente Einrichtungen aus Holz oder Holzwerkstoffen sowie Holz in Bauteilen werden deutlich geringere Mengen Feuchte enthalten. Bei den beweglichen Brandlasten ist ein hoher Feuchtegehalt (vergleichbar mit "lufttrockenem Holz" mit 15% und mehr Feuchte) nur für untergeordnete Brandlasten wie z.B. Transportpaletten vorstellbar.

¹³ Es mag daran liegen, dass wir den elektrischen Energieverbrauch immer schon in kWh bezahlen und neuerdings auch Erdgas nicht mehr in m³ oder Heizöl in Litern sondern ebenfalls in kWh für den unteren Heizwert in Rechnung gestellt wird.

¹⁴ Der obere Heizwert wird auch Brennwert genannt. Er ist um die latente Wärme des durch Wasserstoffverbrennung entstandenen Wasserdampfes höher als der untere Heizwert. Er hat Bedeutung bei Wärmeerzeugern (Heizkesseln), die nach der Brennwerttechnik arbeiten.

Für die Berechnung des gleichwertigen Holzabbrandes in verschiedenen Brandszenarien wird im vorliegenden Bericht deshalb nach Eurocode 1 ein unterer Heizwert von 19 [MJ/kg] entsprechend Zeile 4 der Tabelle 3.2-2 verwendet.

Feste Stoffe	[MJ/kg]	[kWh/kg]	Flüssigkeiten	[MJ/kg]	[kWh/kg]
Anthrazit	34	9,4	Benzin	44	12,2
Asphalt	41	11,4	Dieselöl	41	11,4
Bitumen	42	11,7	Leinöl	39	10,8
Zellulose	17	4,7	Methanol	20	5,6
Holzkohle	35	9,7	Paraffinöl	41	11,4
Kohle, Koks	31	8,6	Teer	38	10,6
Kork	29	8,1	Benzol	40	11,1
Baumwolle	18	5,0	Benzylalkohol	33	9,2
Getreide	17	4,7	Äthanol	27	7,5
Fett	41	11,4	Isopropanol	31	8,6
Küchenabfälle	18	5,0	Petroleum	41	11,4
Leder	19	5,3			
Papier, Pappe	17	4,7			
Paraffin	47	13,1			
Schaumgummi	37	10,3			
Isoprenkautschuk	45	12,5			
Gummireifen	32	8,9	-		
Seide	19	5,3			
Stroh	16	4,4			
Holz	19	5,3			
Wolle	23	6,4			
Holzfaserplatte	18	5,0			
Kunststoffe	[MJ/kg]	[kWh/kg]	Gase	[MJ/kg]	[kWh/kg]
Kunststoffe ABS	[MJ/kg] 36	[kWh/kg] 10,0	Gase Wasserstoff H ₂	[MJ/kg] 120	[kWh/kg] 33,3
Kunststoffe ABS Acryl	[MJ/kg] 36 28	[kWh/kg] 10,0 7,8	Gase Wasserstoff H₂ Kohlenmonoxid CO	[MJ/kg] 120 10	[kWh/kg] 33,3 2,8
Kunststoffe ABS Acryl Zelluloid	[MJ/kg] 36 28 19	[kWh/kg] 10,0 7,8 5,3	Gase Wasserstoff H ₂ Kohlenmonoxid CO Azetylen C ₂ H ₂	[MJ/kg] 120 10 48	[kWh/kg] 33,3 2,8 13,3
Kunststoffe ABS Acryl Zelluloid Epoxidharz	[MJ/kg] 36 28 19 34	[kWh/kg] 10,0 7,8 5,3 9,4	GaseWasserstoff H_2 Kohlenmonoxid COAzetylen C_2H_2 Methan CH_4	[MJ/kg] 120 10 48 50	[kWh/kg] 33,3 2,8 13,3 13,9
Kunststoffe ABS Acryl Zelluloid Epoxidharz Melaminharz	[MJ/kg] 36 28 19 34 18	[kWh/kg] 10,0 7,8 5,3 9,4 5,0	GaseWasserstoff H_2 Kohlenmonoxid COAzetylen C_2H_2 Methan CH_4 Propan C_3H_8	[MJ/kg] 120 10 48 50 46	[kWh/kg] 33,3 2,8 13,3 13,9 12,8
Kunststoffe ABS Acryl Zelluloid Epoxidharz Melaminharz Phenolformaldehyd	[MJ/kg] 36 28 19 34 18 29	[kWh/kg] 10,0 7,8 5,3 9,4 5,0 8,1	GaseWasserstoff H_2 Kohlenmonoxid COAzetylen C_2H_2 Methan CH_4 Propan C_3H_8 Butan C_4H_{10}	[MJ/kg] 120 10 48 50 46 46 46	[kWh/kg] 33,3 2,8 13,3 13,9 12,8 12,8
Kunststoffe ABS Acryl Zelluloid Epoxidharz Melaminharz Phenolformaldehyd Polyester	[MJ/kg] 36 28 19 34 18 29 31	[kWh/kg] 10,0 7,8 5,3 9,4 5,0 8,1 8,6	GaseWasserstoff H_2 Kohlenmonoxid COAzetylen C_2H_2 Methan CH_4 Propan C_3H_8 Butan C_4H_{10}	[MJ/kg] 120 10 48 50 46 46 46	[kWh/kg] 33,3 2,8 13,3 13,9 12,8 12,8
Kunststoffe ABS Acryl Zelluloid Epoxidharz Melaminharz Phenolformaldehyd Polyester faserverstärkter Polyester	[MJ/kg] 36 28 19 34 18 29 31 21	[kWh/kg] 10,0 7,8 5,3 9,4 5,0 8,1 8,6 5,8	GaseWasserstoff H_2 Kohlenmonoxid COAzetylen C_2H_2 Methan CH_4 Propan C_3H_8 Butan C_4H_{10}	[MJ/kg] 120 10 48 50 46 46 46	[kWh/kg] 33,3 2,8 13,3 13,9 12,8 12,8
Kunststoffe ABS Acryl Zelluloid Epoxidharz Melaminharz Phenolformaldehyd Polyester faserverstärkter Polyester Polyester Polyester	[MJ/kg] 36 28 19 34 18 29 31 21 44	[kWh/kg] 10,0 7,8 5,3 9,4 5,0 8,1 8,6 5,8 12,2	GaseWasserstoff H_2 Kohlenmonoxid COAzetylen C_2H_2 Methan CH_4 Propan C_3H_8 Butan C_4H_{10}	[MJ/kg] 120 10 48 50 46 46 46	[kWh/kg] 33,3 2,8 13,3 13,9 12,8 12,8
Kunststoffe ABS Acryl Zelluloid Epoxidharz Melaminharz Phenolformaldehyd Polyester faserverstärkter Polyester Polyester Polyester	[MJ/kg] 36 28 19 34 18 29 31 21 44 40	[kWh/kg] 10,0 7,8 5,3 9,4 5,0 8,1 8,6 5,8 12,2 11 1	Gase Wasserstoff H_2 Kohlenmonoxid CO Azetylen C_2H_2 Methan CH_4 Propan C_3H_8 Butan C_4H_{10}	[MJ/kg] 120 10 48 50 46 46 46	[kWh/kg] 33,3 2,8 13,3 13,9 12,8 12,8
Kunststoffe ABS Acryl Zelluloid Epoxidharz Melaminharz Phenolformaldehyd Polyester faserverstärkter Polyester Polyester Polyethylen (PE) Polystryrol Polyisozyapurat	[MJ/kg] 36 28 19 34 18 29 31 21 44 40	[kWh/kg] 10,0 7,8 5,3 9,4 5,0 8,1 8,6 5,8 12,2 11,1	Gase Wasserstoff H_2 Kohlenmonoxid CO Azetylen C_2H_2 Methan CH_4 Propan C_3H_8 Butan C_4H_{10}	[MJ/kg] 120 10 48 50 46 46 46	[kWh/kg] 33,3 2,8 13,3 13,9 12,8 12,8 12,8
Kunststoffe ABS Acryl Zelluloid Epoxidharz Melaminharz Phenolformaldehyd Polyester faserverstärkter Polyester Polyester Polyester Polyester Polyestyrol Polystryrol Polyisozyanurat- Schaumstoff	[MJ/kg] 36 28 19 34 18 29 31 21 44 40 24	[kWh/kg] 10,0 7,8 5,3 9,4 5,0 8,1 8,6 5,8 12,2 11,1 6,7	GaseWasserstoff H_2 Kohlenmonoxid COAzetylen C_2H_2 Methan CH_4 Propan C_3H_8 Butan C_4H_{10}	[MJ/kg] 120 10 48 50 46 46 46	[kWh/kg] 33,3 2,8 13,3 13,9 12,8 12,8
Kunststoffe ABS Acryl Zelluloid Epoxidharz Melaminharz Phenolformaldehyd Polyester faserverstärkter Polyester Polyester Polyethylen (PE) Polystryrol Polyisozyanurat- Schaumstoff Polykarbonat	[MJ/kg] 36 28 19 34 18 29 31 21 44 40 24 29	[kWh/kg] 10,0 7,8 5,3 9,4 5,0 8,1 8,6 5,8 12,2 11,1 6,7 8,1	Gase Wasserstoff H_2 Kohlenmonoxid CO Azetylen C_2H_2 Methan CH_4 Propan C_3H_8 Butan C_4H_{10}	[MJ/kg] 120 10 48 50 46 46 46	[kWh/kg] 33,3 2,8 13,3 13,9 12,8 12,8
Kunststoffe ABS Acryl Zelluloid Epoxidharz Melaminharz Phenolformaldehyd Polyester faserverstärkter Polyester Polyester Polyethylen (PE) Polystryrol Polyisozyanurat- Schaumstoff Polykarbonat Polypropylen (PP)	[MJ/kg] 36 28 19 34 18 29 31 21 44 40 24 29 43	[kWh/kg] 10,0 7,8 5,3 9,4 5,0 8,1 8,6 5,8 12,2 11,1 6,7 8,1 11,9	GaseWasserstoff H_2 Kohlenmonoxid COAzetylen C_2H_2 Methan CH_4 Propan C_3H_8 Butan C_4H_{10}	[MJ/kg] 120 10 48 50 46 46 46	[kWh/kg] 33,3 2,8 13,3 13,9 12,8 12,8
Kunststoffe ABS Acryl Zelluloid Epoxidharz Melaminharz Phenolformaldehyd Polyester faserverstärkter Polyester Polyester Polyethylen (PE) Polystryrol Polyisozyanurat- Schaumstoff Polykarbonat Polypropylen (PP) Polyurethan	[MJ/kg] 36 28 19 34 18 29 31 21 44 40 24 29 43 23	[kWh/kg] 10,0 7,8 5,3 9,4 5,0 8,1 8,6 5,8 12,2 11,1 6,7 8,1 11,9 6,4	Gase Wasserstoff H_2 Kohlenmonoxid CO Azetylen C_2H_2 Methan CH ₄ Propan C_3H_8 Butan C ₄ H ₁₀	[MJ/kg] 120 10 48 50 46 46 46	[kWh/kg] 33,3 2,8 13,3 13,9 12,8 12,8
Kunststoffe ABS Acryl Zelluloid Epoxidharz Melaminharz Phenolformaldehyd Polyester faserverstärkter Polyester Polyethylen (PE) Polystryrol Polyisozyanurat- Schaumstoff Polykarbonat Polypropylen (PP) Polyurethan Polyurethan-Schaum	[MJ/kg] 36 28 19 34 18 29 31 21 44 40 24 29 43 23 26	[kWh/kg] 10,0 7,8 5,3 9,4 5,0 8,1 8,6 5,8 12,2 11,1 6,7 8,1 11,9 6,4 7,2	Gase Wasserstoff H_2 Kohlenmonoxid CO Azetylen C_2H_2 Methan CH ₄ Propan C_3H_8 Butan C ₄ H ₁₀	[MJ/kg] 120 10 48 50 46 46 46	[kWh/kg] 33,3 2,8 13,3 13,9 12,8 12,8
Kunststoffe ABS Acryl Zelluloid Epoxidharz Melaminharz Phenolformaldehyd Polyester faserverstärkter Polyester Polyester Polyethylen (PE) Polystryrol Polyisozyanurat- Schaumstoff Polykarbonat Polypropylen (PP) Polyurethan Polyurethan-Schaum PVC	[MJ/kg] 36 28 19 34 18 29 31 21 44 40 24 29 43 23 26 17	[kWh/kg] 10,0 7,8 5,3 9,4 5,0 8,1 8,6 5,8 12,2 11,1 6,7 8,1 11,9 6,4 7,2 4,7	Gase Wasserstoff H_2 Kohlenmonoxid CO Azetylen C_2H_2 Methan CH ₄ Propan C_3H_8 Butan C ₄ H ₁₀	[MJ/kg] 120 10 48 50 46 46 46	[kWh/kg] 33,3 2,8 13,3 13,9 12,8 12,8
Kunststoffe ABS Acryl Zelluloid Epoxidharz Melaminharz Phenolformaldehyd Polyester faserverstärkter Polyester Polyeropylen Polyerethan Polyurethan PVC Harnstoff-Formaldehyd	[MJ/kg] 36 28 19 34 18 29 31 21 44 40 24 29 43 23 26 17 15	[kWh/kg] 10,0 7,8 5,3 9,4 5,0 8,1 8,6 5,8 12,2 11,1 6,7 8,1 11,9 6,4 7,2 4,7 4,2	Gase Wasserstoff H_2 Kohlenmonoxid CO Azetylen C_2H_2 Methan CH ₄ Propan C_3H_8 Butan C ₄ H ₁₀	[MJ/kg] 120 10 48 50 46 46 46	[kWh/kg] 33,3 2,8 13,3 13,9 12,8 12,8 12,8

Tabelle 3.2-1: Unterer Heizwert H_u brennbarer Stoffe nach EUROCODE 1¹⁵

¹⁵ Angaben in kWh/kg sind gerundete Werte.

1	Verwendet /	Unterer H	Literatur-	
I	veröffentlicht von	[MJ/kg]	[kWh/kg]	verzeichnis
2	U. SCHNEIDER (seit Jahren)	17,28	4,8	[104]
3	U. SCHNEIDER und MAX in DIN 18232-2, Vorlage 2002	15	4,167	[32]
4	Eurocode 1 1995/1997	19	5,278	[36]
5	BSI DD 240 : Part 1 : 1997	18	5,0	[18]
6	HANSELL und MORGAN 1985	18,6	5,167	[52]
7	RECKNAGEL/SPRENGER 59. Jahrgang 1975/76 ¹⁷ S.140	14,65	4,069	[97]

Tabelle 3.2-2: Streubreite der Literaturangaben für den unteren Heizwert von Holz¹⁶

3.2.1.4 Brandlast und Brandbelastung

Unter der Brandlast Q in einem Raum oder Gebäude versteht man das Potential an Wärmeenergie in allen vorhandenen Stoffen. Die Brandlast ist somit (in der Definition nach EUROCODE 1 die Summe aller Wärmeenergien, die bei der Verbrennung aller brennbaren Stoffe (Innenausstattung und Einrichtungsgegenstände sowie Bauteile) in einem Gebäudebereich frei werden können. Die Ermittlung der Brandlast erfolgt zweckmäßigerweise in tabellarischer Form für jeden brennbaren Stoff, einschließlich dessen Lage und Konzentration im Raum oder Gebäude.

Die Brandlast erhält man aus der Summe der Menge aller brennbaren Stoffe multipliziert mit deren Heizwert H_u^{18} :

$$Q = \sum_{i} m_{i} \cdot H_{u,i} \text{ [MJ]}$$
(3.2-8)

Die flächenbezogene Brandlast wird nach EUROCODE 1 als Brandbelastung¹⁹

$$q = Q/A \, [MJ/m^2]$$
 (3.2-9)

definiert. Die Brandbelastung bezogen auf eine Raumgrundfläche wird q_f und die Brandbelastung bezogen auf die totale Raumhüllfläche (einschließlich Öffnungen) wird q_t bezeichnet. Der Quotient von Brandbelastung und unterem Heizwert für Holz ist der Holzgleichwert der Brandbelastung; dieser ist im Folgenden mehrmals mit angegeben.

¹⁶ Originalangaben in Fettdruck.

¹⁷ Die Angaben gelten für lufttrockenes Holz (mit 15 % Feuchtegehalt) und sollen einen Mindest-Heizwert für Holz als Brennstoff gewährleisten.

¹⁸ Der EUROCODE 1 gestattet die Anwendung von Abminderungsfaktoren zur Berücksichtigung des Abbrandverhaltens und zur Bewertung geschützter Brandlasten. In Deutschland wird die eindeutige Angabe der Brandlast als Energiepotential bevorzugt und "abmindernde" Einflüsse bei der weiteren brandschutztechnischen Untersuchung berücksichtigt.

¹⁹ Der Begriff Brandbelastung wird in Deutschland seit geraumer Zeit verwendet; vergl. SEEGER 1977 [108]

Die Höhe der Brandlast gibt einen Hinweis auf das Brandrisiko und beeinflusst sehr wesentlich die Dauer eines Brandes (siehe 3.2.5).

In Deutschland gilt eine auf die Grundfläche bezogene Brandlast (Brandbelastung) bis zu 50 [kWh/m²] bzw. 180 [MJ/m²] als geringe Brandlast. Dieser Wert liegt unterhalb der Brandlastklasse I nach EUROCODE 1 [36] (vergl. Tabelle 3.2-3; die hinzugefügten Angaben in kWh/m² sind gerundet).

Klasse	q [MJ/m²]	q [kWh/m²]	Holzgleichwert [kg/m ²] mit H_u = 19 MJ/kg ²¹ berechnet
Ι	250	70	13,2
II	500	140	26,3
III	1000	280	52,6
IV	1500	420	78,9
V	2000	560	M St. Br. 29 (105,3 M) (M) (M) (M) (M)

Tabelle 3.2-3: Brandlastklassen und Holzgleichwert nach EUROCODE 1²⁰

Eine Brandlast bis zu 7 kWh/m² (entsprechend einem Holzgleichwert von ca. 1,3 kg/m²) gilt in Deutschland energetisch gesehen als vernachlässigbar gering; in Unterdecken zur Verbesserung der Feuerwiderstandsfähigkeit von Decken (Stahlträgerdecken, Holzbalkendecken) dürfen deshalb brennbare Kabelisolierungen oder freiliegende Baustoffe der Klasse B1-DIN 4102 (schwerentflammbar) mit einer Brandlast bis zu 7 kWh/m² "in möglichst gleichmäßig verteilter Form" vorhanden sein [26]. Die Erleichterungen nach [22] für brennbare Installationen mit einer Brandlast bis zu 7 kWh/m² in Deckenhohlräumen unterhalb von feuerwiderstandsfähigen Geschossdecken wurden wegen des Missbrauchs in der Praxis wieder aufgegeben [23].

Beispiele für spezifische Brandlasten (Brandbelastungen) nach einem britischen Normentwurf [18] enthält Tabelle 3.2-4. In [18] wird darauf hingewiesen, dass die angegebenen Brandbelastungen eine vollständige Verbrennung voraussetzen und in realen Bränden die Verbrennungswärme meist beträchtlich geringer sei. Außerdem handle es sich nur um die beweglichen Brandbelastungen. Enthält die Gebäudekonstruktion erhebliche Mengen brennbarer Baustoffe, müssten diese hinzu gerechnet werden.

Die Tabelle 3.2-4 ist aufgrund von Bestandsaufnahmen entstanden, die im CIB W14 Workshop Report, 1983, mit dem Titel "A conceptual Approach towards a Probability

²⁰ Originalangaben in Fettdruck.

²¹ Der Holzgleichwert wurde für den unteren Heizwert von Holz nach EUROCODE 1 angegeben. Aufgrund der großen Streubreite der Angaben zum unteren Heizwert von Holz kann der Holzgleichwert bis zu 30% größer sein.

Based Design Guide on Structural Fire Safety" dokumentiert sind. Die Tabelle enthält zusätzlich zu jeder Angabe den Holzgleichwert und die Brandlastklasse nach EUROCODE 1.

	Zeile 1) Brandbelastung [MJ/m ²] Zeile 2) (Holzgleichwert ²¹ [kg/m ²])					
	Zeile 3) Brandlastklassen					
	Mittelwert	Mittelwert Fraktile ²²				
Nutzung		80 %	90 %	95 %		
Wohnung	780	870	920	970		
	(41)	(46)	(48)	(51)		
	III	III	111	III		
Krankenhaus	230	350	440	520		
	(12)	(18)	(23)	(27)		
	I	II	II	≈ 11		
Lagerraum in Kranken- haus	2000 (105) V 105	3000 (158) > V +	3700 (195) > V	4400 (232) > V		
Hotelzimmer	310	400	460	510		
	(16)	(21)	(24)	(27)		
	II	II	II	≈ II		
Büro	420	570	670	760		
	(22)	(30)	(35)	(40)		
	II	III	111	111		
Geschäfte	600	900	1100	1300		
	(32)	(47)	(58)	(68)		
	III	III	IV	IV		
Fertigung	300	470	590	720		
	(16)	(25)	(31)	(38)		
	II	II	III	III		
Fertigung und Lager ²³	1180	1800	2240	2690		
	(62)	(95)	(118)	(142)		
	IV	V	> V	> V		
Bibliotheken	1500 (79) IV	2250 (118) > V	2550 (134) > V	in in ar in		
Schulen	285	360	410	450		
	(15)	(19)	(22)	(24)		
	II	II	II	II		

Tabelle 3.2-4: Spezifische Brandlasten (Brandbelastungen) für verschiedene Nutzungen (nach BSI DD 240 : Part 1 : 1997 [18]), Holzgleichwerte und Brandlastklassen (nach EUROCODE 1)

²² Die 80%-Fraktile ist der Wert, der in 80% der Räume oder Nutzungen nicht überschritten wird.

 $^{^{23}\,}$ Lagerung von brennbaren Stoffen von weniger als 150 kg/m².

UNIV.-PROF. DR.-ING. D. OSTERTAG

3.2.2 Stöchiometrische Verbrennung

3.2.2.1 Verbrennungsrechnung

Unter stöchiometrischer Verbrennung versteht man die Verbrennung mit dem Mindestsauerstoffbedarf entsprechend den chemischen Reaktionsgleichung. Die brennbaren Bestandteile in brennbaren Stoffen sind im Wesentlichen Kohlenstoff und Wasserstoff. In Brennstoffen kommt zusätzlich in geringen Mengen Schwefel vor. In Kunststoffen wie PVC und PVDF und in Holzschutzmitteln liegen unterschiedliche Konzentrationen Fluor, Chlor und Brom vor. Die Reaktionsgleichungen lauten mit den chemischen Zeichen C für Kohlenstoff, H₂ für Wasserstoff und S für Schwefel

$$C + 0.5 \times O_2 \longrightarrow CO$$
 (3.2-10)

$$C + O_2 \rightarrow CO_2$$
 (3.2-11)

$$H_2 + 0.5 \times O_2 \rightarrow H_2O$$
 (3.2-12)

$$S + O_2 \longrightarrow SO_2$$
 (3.2-13).

Diese Gleichungen gelten für Mole des jeweiligen Stoffes. O_2 ist der zur Verbrennung erforderliche Sauerstoff. Als Verbrennungsprodukte fallen folgende Gase an:

- das hochgiftige Kohlenmonoxid CO bei unvollständiger Verbrennung in gewissen Mengen,
- das stabile Kohlendioxid CO₂, das auch Kohlensäuregas genannt wird,
- der Wasserdampf H₂O und
- das Schwefeldioxidgas SO₂.

Ein Mol eines Stoffes entspricht seinem Molekulargewicht in kg. Ein Mol eines Gases mit Idealverhalten nimmt bei Normbedingungen (0°C und 1013,25 hPa) ein Volumen von 22,413 m³ (Molvolumen) ein.

Mit einem Molekulargewicht von 2 für H_2 und von 32 für H_2O folgt aus Gleichung (3.2-12), dass 2 kg Wasserstoff mit 16 kg Sauerstoff zu 18 kg Wasserdampf verbrennen. Außerdem folgt, dass diese 2 kg Brennstoff H_2 mit 11,2 m³_n Sauerstoff zu 22,4 m³_n Wasserdampf verbrennen. Bei der Verbrennung von Wasserstoffbestandteilen aus dem Brennstoff erfolgt also eine Volumenzunahme vom eingesetzten Sauerstoff zum Verbrennungsprodukt Wasserdampf. Sauerstoffgehalt und Feuchtegehalt des Brennstoffes bzw. im brennbaren Stoff führen ebenfalls zu einer Volumenzunahme von der eingesetzten Verbrennungsluft zu den Verbrennungsprodukten.

Ausgangs-	Formel-	Sauersto	offbedarf	Luftb	edarf	Verbrennung	gsgasmenge	Verbren-	Bemerkungen
stoff	zeichen	V _n [m³ _n /kg _B]	m [kg/kg _B]	V _n [m³ _n /kg _B]	m [kg/kg _B]	V _n [m³ _n /kg _B]	m [kg/kg _B]	produkt	Demenkungen
Kohlenstoff	c×a	_	-	-	-	-	-	Ruß, Asche	a = Anteil von c, der nicht verbrennt
	c × b	$0,932 \times c \times b$	1,332 × c × b	4,438 × c × b	5,7415 × c × b	1,865 × c × b	2,332 × c × b	со	b = Anteil von c, der zu CO oxidiert
	c (1-a-b)	1,864 × <i>c</i> × (1 <i>– a - b</i>)	2,664 × c × (1 <i>− a - b</i>)	8,877 × c × (1 − a - b)	11,483 × c × (1 <i>− a - b</i>)	1,853 × <i>c</i> × (1 <i>– a - b</i>)	3,664 × <i>c</i> × (1 <i>− a</i> - <i>b</i>)	CO2	c [kg/kg₅] Kohlen- stoffgehalt des Brennstoffes
Wasserstoff	h	5,553 × h	7,938 × h	26,44 × <i>h</i>	34,209 × h	11,11 × <i>h</i>	8,936 × h	H₂O	h [kg/kg _B] verbrenn- barer H ₂ -Gehalt des Brennstoffes
H₂O aus VerbrLuft	-	_	-	_	-	$\lambda imes L_{\min, tr} imes W_{L}$	$\lambda \times L'_{\min,tr} \times x_L$	H₂O	w _L [m³/m³ _L] * ⁾ bzw. <i>x</i> _L [kg/kg _L] Luftfeuchte
H₂O aus Brennstoff	-	-	-	-	-	1,243 × <i>w</i> _B	1,0 × <i>w</i> _B	H₂O	<pre>w_B [kg/kg_B] Wasser- gehalt des Brenn- stoffes</pre>
Schwefel	s	0,6982 × s	0,998 × s	3,325 × s	4,302 × s	0,6827 × <i>s</i>	1,998 × s	SO ₂	s [kg/kg _B] Schwefel- gehalt des Brenn- stoffes
O₂ aus VerbrLuft	-	-	-	-	-	$(\lambda - 1) \times L_{\min} \times 0,21$	$(\lambda - 1) \times L'_{min} \times 0,232$	O ₂	
O ₂ aus Brennstoff	O	-0,6997 × 0	-1,0 × 0	-3,332 × 0	-4,31 × 0	-	-	-	o [kg/kg _B] Sauerstoff- geh. des Brennstof- fes=negativer Bedarf
N ₂ aus VerbrLuft	-	-		-	-	$0,79 \times \lambda \\ \times L_{min}$	$0,768 \times \lambda \\ \times L'_{min}$	N ₂	-
		N =0	$\Sigma = O'$	$\Sigma = L_{\min, tr}$	$\Sigma = L'_{\min, tr}$	$\lambda = 1: \Sigma = V_{tr,n}$	hin bzw. $\Sigma = V_{f,min}$		*) w _L =
		$\Sigma = O_{min}$	$\Delta = O_{min}$	= O _{min} /0,21	$= O'_{min}/0,232$	$\lambda \neq 1: \Sigma = V$	$V_{\rm tr}$ bzw. $\Sigma = V_{\rm f}$		$\varphi \times p' / (p_o - \varphi \times p')$

Das Realverhalten der o.g. an der Verbrennung beteiligten Gase weicht nur geringfügig vom Idealverhalten der Gase ab. Tabelle 3.2-5 enthält die Auswertung der Verbrennungsgleichungen mit den genauen Werten für das Realverhalten. Der Sauerstoffbedarf, der Luftbedarf²⁴ und die Verbrennungsgasmenge sind für jeden Bestandteil in m³_n und in kg je kg Brennstoff angegeben. Der minimale Luftbedarf $L_{min,tr}$ (trockene Luft)

$$L_{\min,tr} = 8,88 \times c \ (1-a) + 26,44 \times h + 3,325 \times s - 3,33 \times o \ [m_n^3/kg_B] \qquad (3.2-14)$$

bzw.

$$L'_{\min,tr} = 11,48 \times c (1-a) + 34,21 \times h + 4,30 \times s - 4,31 \times o [kg/kg_B]$$
 (3.2-15)

liefert gerade den stöchiometrischen, also nach den Reaktionsgleichungen erforderlichen, Sauerstoffbedarf für die Verbrennung. Da es real keine vollständige Verbrennung mit dieser Luftmenge gibt, dient diese Luftmenge lediglich als Bezugsgröße. Man definierte eine Luftverhältniszahl²⁵ λ als Verhältnis der verfügbaren (trockenen) Luftmenge L_{tr} zur mindestens erforderlichen (trockenen) Luftmenge $L_{min,tr}$:

$$\lambda = L_{\rm tr} / L_{\rm min,tr} [./.]$$
 (3.2-16).

Man spricht von Luftüberschuss, wenn $\lambda > 1$ ist und von Luftmangel, wenn $\lambda < 1$ ist.

Die stöchiometrische Verbrennungsgasmenge bzw. Rauchgasmenge $m_{RG,min}$

$$m_{\rm RG,min} = L'_{\rm min,tr} (1 + x_{\rm L}) + 1 - a [kg/kg_{\rm B}]$$
 (3.2-17)

dient als Bezugsgröße für die Verdünnung von Rauchgasen auf ihrem Weg von der Brandstelle bis zur Abführung aus dem Gebäude. Die Maß der Verdünnung erlaubt eine Beurteilung der Gefährlichkeit der Rauchgase für Personen.

3.2.2.2 Luftbedarf und Verbrennungsgasmengen

In vielen brandschutztechnischen Aufgabenstellungen darf auf eine detaillierte Ermittlung des Luftbedarfes und der Verbrennungsgasmengen verzichtet werden, da die meisten brennbaren Stoffe nahezu gleich viel Luft zur Verbrennung benötigen, wenn der Luftbedarf auf die Energiefreisetzung bezogen wird. Das gleiche gilt für die entstehende Brandgasmenge.

Bezüglich der entstehenden Brandgasmenge empfiehlt JOHN [67] ein mittleres stöchiometrisches Rauchgasvolumen von 0,285 m³ pro MJ freigesetzter Energie anzuset-

²⁴ Der Sauerstoffgehalt der Luft beträgt sehr genau 21 <u>Volumen-%</u>, und zwar unabhängig von der Höhe über dem Meer (innerhalb der Troposphäre bis mindestens 10 km Höhe). Wegen der unterschiedlichen Dichte von Sauerstoff und den anderen Bestandteilen der Luft (überwiegend Stickstoff) ergibt sich ein Wert von 23,2 <u>Massen-%</u> für den Sauerstoffgehalt der Luft. Die Behauptung von FRIEDRICH [44], der Sauerstoffgehalt in Volumen-% würde mit der Höhe abnehmen, ist rundweg falsch. Der Autor verfiel diesem Trugschluss, weil er die Abnahme des Sauerstoff-Partialdruckes mit der Höhe gleichsetzte mit der Abnahme in Volumen-%.

²⁵ Die alte – unzutreffende – Bezeichnung Luftüberschusszahl wird teilweise heute noch verwendet.

zen. Für seine Empfehlung diente ein oberer Grenzwert von 0,306 m³ für Holz und ein unterer Grenzwert von 0,266 m³ für Heizöl (die m³-Angaben gelten für Normzustand mit 0°C und 1013,25 hPa). Mit der im Brandschutz üblichen Anwendung der Dichte trockener Luft mit 1,293 kg/m³ (im Normzustand) für die Brandgase ergibt sich eine mittlere stöchiometrische Verbrennungsgasmenge (Brandgasmasse) von

$$m_{\rm RG,min}/Q = 0.368 \, [\rm kg/MJ]$$
 (3.2-18)

oder ein auf die Brandleistung bezogener mittlerer stöchiometrischer Brandgasmassenstrom von

$$\dot{m}_{\rm RG,min}$$
 / \dot{Q} = 0,368 [kg s⁻¹ MW⁻¹] (3.2-19).

Tabellen über Verbrennungswärmen von brennbaren Gasen und Flüssigkeiten und von Kunststoffen ist zu entnehmen, dass die Verbrennungswärmen in der Größenordnung 1:20 schwanken, wenn sie auf Mole der Substanzen bezogen werden. Bei Bezug auf die Masse in kg der Substanzen schwanken die Werte nur noch bis 1:5 und bei Bezug auf den zur Verbrennung erforderlichen Sauerstoff schwanken die Werte – von Holz und wenigen anderen Ausnahmen abgesehen – nur noch etwa 5% um einen Mittelwert von 13,1 MJ je kg Sauerstoff. Für verbrennungstechnische Berechnungen ist deshalb der auf den Sauerstoffbedarf oder den Luftbedarf bezogene Heizwert eine ideale Rechengröße (vergl. DRYSDALE [40]):

$$H_{\rm u} / O'_{\rm min} = 13,1 [\rm MJ/kg_{O_2}]$$
 (3.2-20)

und

$$H_{\rm u} / L'_{\rm min, tr} = 3,04 [\rm MJ/kg_{\rm Luft}]$$
 (3.2-21).

Für Holz gibt U. SCHNEIDER [104] an:

$$H_{\rm u} / L'_{\rm min,tr} = 0.930 [\rm kWh/kg_{\rm Luft}]$$
 (3.2-22)

Dieser Wert²⁶ entspricht

$$H_{\rm u} / L'_{\rm min,tr} = 3,348 [\rm MJ/kg_{\rm Luft}]$$
 (3.2-23).

Folgt man dem o.g. Vorschlag von JOHN zur Mittelwertbildung für Holz und andere Stoffe, so erhält man aus (3.2-21) und (3.2-23) den durchschnittlichen Mindestluftbedarf zur Freisetzung von einem MJ Wärmeenergie:

$$L'_{\min, tr} / Q = 0.313 [kg_{Luff} / MJ]$$
 (3.2-24)

²⁶ Der Wert kann ähnlich wie der untere Heizwert (vergl. Tabelle 3.2-2) erheblich streuen (etwa zwischen 2,8 und 3,6 MJ pro kg trockener Luft).

3.2.3 Brandlast- und ventilationsgesteuerte Brände

In der Wärmeerzeugungswirtschaft erzielt man trotz großem technischem Aufwand zur Feinverteilung eines flüssigen oder gasförmigen Brennstoffes oder einer Kohlenstaubfeuerung mit einer Vormischung mit der Verbrennungsluft eine vollständige Verbrennung nur dann, wenn ein Luftüberschuss von wenigstens einigen Prozent bereit gestellt wird. Ein Luftüberschuss von mehreren 10% ist bei festen Brennstoffen in Feuerungsanlagen für eine "vollständige" Verbrennung erforderlich. Für handbeschickte Kohlefeurungen ist im Allgemeinen ein Luftüberschuss von 50% bis 100% erforderlich (1,5 < λ < 2); vergl. [97].

Definitionsgemäß läuft in der Feuerungstechnik eine Verbrennung unabhängig von ihrem Erfolg

- bei einer Luftverhältniszahl $\lambda > 1$ mit Luftüberschuss ab und
- bei einer Luftverhältniszahl $\lambda < 1$ mit Luftmangel ab.

Ein noch höherer Luftüberschuss wird bei Bränden wegen des "ungeordneten" Brandgutes und der "ungeordneten" Zuströmung der Verbrennungsluft erforderlich sein, um einen hinreichend vollständigen Abbrand zu erzielen; z.B. entsteht bei unvollständiger Verbrennung das hochgiftige Kohlenmonoxid CO auch noch dann, wenn die theoretisch notwendige Luftmenge für die vollständige Verbrennung um 50% oder mehr überschritten wird.

Bei Bränden unterscheidet man

- gut ventilierte bzw. brandlastgesteuerte²⁷ Brände und
- ventilationsgesteuerte Brände.

In ventilationsgesteuerten Bränden läuft die Verbrennung unvollständig ab. Im Rauchgas sind unvollständige Verbrennungsprodukte wie Ruß, CO und Kohlenwasserstoffe enthalten. Dadurch nimmt die Brandleistung (Energiefreisetzung) ab. TEWARSON [115] gibt an, dass als Kriterium für ventilationsgesteuerte Brände ein Äquivalenz-Verhältnis

$$\Phi = \frac{S \dot{m}'' A}{\dot{m}_{air}}$$
(3.2-25)

gebräuchlich ist. In dieser Gleichung bedeuten

S stöchiometrisches Massenverhältnis, gleichbedeutend mit
 L'min,tr [kgLuft/kgB]
 m'' spezifischer Massenverlust [kgB/m²,s]

²⁷ Der Begriff Brandlast wird in Deutschland und Europa (EUROCODE 1) für die potentielle Energiefreisetzung verwendet; in Deutschland sogar ausdrücklich unabhängig von Verteilung und Oberflächenbeschaffenheit. Insofern ist "brandlastgesteuerter Brand" kein treffender Begriff: Die englische Bezeichnung "fuel bed controlled fire" trifft, was gesagt werden will. Eine geeignete Übersetzung liegt nicht vor.

A vom Brand erfasste Materialoberfläche [m²]

 $\dot{m}'' \cdot A$ gleichbedeutend mit einer Abbrandrate \dot{R} [kg_B/s]

 \dot{m}_{air} Luftmassenstrom (trocken) [kg/s].

Ein Vergleich mit der Verbrennungsrechnung im Abschnitt 3.2.2.1 zeigt, dass das Äquivalenz-Verhältnis identisch ist mit dem Kehrwert der in Deutschland benutzten Luftzahl der Verbrennungsrechnung:

$$\Phi = 1/\lambda \tag{3.2-26}$$

Aus umfangreichen Untersuchungen über die Energiefreisetzung in Abhängigkeit vom Äquivalenzverhältnis Φ bzw. von der Luftzahl λ hat TEWARSON [115] einen Zusammenhang mit dem Grad der Verbrennung hergestellt. Nach seiner Definition liegt eine vollständige Verbrennung dann vor, wenn das Verhältnis ζ der bei ventilationsgesteuertem Brand freigesetzten Energie zur maximal möglichen bei gut ventiliertem Brand freigesetzten Energie gleich eins ist. TEWARSON unterscheidet chemische Energien, die bei gut ventiliertem Brand gleichbedeutend sind mit "unserem" unteren Heizwert H_u , und konvektive Energien, die von der speziellen Prüfeinrichtung beeinflusst werden. Für das Verhältnis der chemischen Energien ζ_{chem} ist nach TEWARSON

$$\zeta_{\rm chem} = \frac{\dot{Q}_{\rm f} / \dot{m}_{\rm f}}{H_{\rm u}} \tag{3.2-27}$$

In dieser Gleichung stellt der Quotient $\dot{Q}_{\rm f}$ / $\dot{m}_{\rm f}$ die tatsächliche Brandleistung pro kg Massenverlust infolge des Brandes dar.

Eine Auswertung der Messergebnisse für die chemischen Energien gibt Aufschluss über die Vollständigkeit der Verbrennung in Abhängigkeit vom Luftangebot entsprechend der Funktion

$$\zeta_{\rm chem} = 1 - 0.97 / \exp(2.5 \, \Phi^{-1.2}) \tag{3.2-28}.$$

Diese Funktion ist in Bild 3.2-3 grafisch dargestellt. Es ist zu entnehmen, dass die Verhältniszahl ζ_{chem} den Wert eins unterschreitet, sobald das Äquivalenz-Verhältnis Φ des Luftangebotes über 0,5 ansteigt; dies entspricht der Luftzahl $\lambda = 2$, d.h. eine vollständige Verbrennung ist erst zu erwarten, wenn ein Luftüberschuss von 100% vorhanden ist. Dieser Wert stimmt mit den aus der Feuerungstechnik für Kohlefeuerungen bekannten Grenzwerten überein; vergl. [97]. Sobald $\Phi > 4$ bzw. $\lambda < 0,25$ werden, stehen der Verbrennung nur noch ¹/₄ der stöchiometrischen Mindestluftmenge zur Verfügung. Damit findet keine Entflammung mehr statt; dieser Bereich ist in Bild 3.2-3 grau hinterlegt.



Bild 3.2-3: Verhältniszahl ζ_{chem} der freigesetzten Energie zur maximal möglichen Energiefreisetzung in Abhängigkeit vom Luftangebot Φ nach Gl. (3.2-28)

Es wird deshalb angeregt, das Kriterium für den Übergang vom ventilationsgesteuerten Brand zum brandlastgesteuerten (gut ventilierten) Brand nicht an der stöchiometrischen Luftmenge sondern an der für eine vollständige Verbrennung durchschnittlich wirklich notwendigen Luftmenge zu messen. Damit sollte sein:

ventilationsgesteuerte Brände:	$\Phi > 0,5$ bzw. $\lambda < 2$	(2 2 2 20)
gut ventilierte (brandlastgesteuerte) Brände:	$\Phi \leq 0,5$ bzw. $\lambda \geq 2$	(3.2-29)

Dieser Vorschlag träfe auch die Definition "brandlastgesteuerter" Brand als Brand, der nicht durch Ventilationsbedingungen beeinflusst wird.

3.2.4 Größe und Intensität von Bemessungsbränden

Naturgemäß müssen Entrauchungseinrichtungen umso größer sein je größer Brände sind, die mit ihnen beherrscht werden sollen. Es ist aber nicht möglich, diese Einrichtungen für den größtmöglichen Brand zu bemessen, da es für die Größe eines Brandes keine Grenze gibt. Es werden deshalb Bemessungsbrände festgelegt, die unter bestimmten Bedingungen die größten wahrscheinlichen Brände darstellen.

3.2.4.1 Bemessungsbrände nach DIN 18232

Bemessungsbrände nach DIN 18232 betreffen das Brandgeschehen in der Pre-flash-over-Phase. Voll entwickelte Brände sind Gegenstand von DIN 18230 (Industriebaunorm).

Bemessungsbrände nach DIN 18232, ohne Löschanlagen

Nach DIN 18232-2 erfolgte die Bemessung der Entrauchung lange Zeit – wie für die Belichtung und die Belüftung von Industriehallen sinnvoll – ebenfalls bezogen auf eine Hallengrundfläche. Mit dieser Festlegung konnte aber in kleinen Rauchabschnitten keine zufriedenstellende Entrauchung erwartet werden.

Bei der Entwicklung einer Bemessungsnorm für maschinelle Rauchabzüge löste man sich von der Bindung an den Industriebau und den Bezug auf eine Hallengrundfläche; man wählte den physikalisch sinnvollen Bezug auf die Grundfläche eines Brandes. Die der Bemessung von DIN 18232-2 (z.B. Ausgabe 1989 [30]) eigentlich zugrunde liegenden aber nie veröffentlichten Brandszenarien konnten aus den Archiven des VdS "ausgegraben" werden. Diese betragen 5 m² Brandfläche für das geringste Brandrisiko mit einer Verdoppelung der Brandfläche für jedes nächst höhere Brandrisiko bis zu 320 m² Brandfläche.

Nach dem Willen des Normenausschusses hatte die Bemessung von maschinellen Abzügen mit den gleichen Brandflächen zu erfolgen. Für maschinelle Abzüge sind die beiden höchsten Risiken nicht mehr praktikabel, sodass Brandflächen von 5 m² bis 80 m² in den Bemessungsregeln zu berücksichtigen waren²⁸. Um eine konservative (auf der sicheren Seite liegende) Bemessung maschineller Rauchabzugsanlagen (MRA) zu ermöglichen, wurden Tabellen für eine spezifische Brandleistung von 600 kW/m² in die Norm aufgenommen [34], weil damit das von festen brennbaren Stoffen bis etwa 1,5 m Lagerhöhe ausgehende Risiko weitgehend abgedeckt ist (vergl. [50]). Diese Festlegung traf der Normenausschuss aufgrund der Angaben von THEOBALD [116]. Der normative Anhang enthält zusätzlich Bemessungstabellen für eine spezifische Brandleistung von 300 kW/m².

Im Dezember 2001 wurde der Entwurf einer Überarbeitung für die natürlichen Rauchabzüge vorgelegt [31]. In diesem Entwurf sind nun ebenfalls die auf den Industriebau beschränkte Anwendbarkeit fallen gelassen worden und die Bemessungstabellen auf die Grundfläche eines Brandes und nicht auf die Rauchabschnittsgröße abgestellt worden.

U. SCHNEIDER [101] (selbst Mitglied im zuständigen Normenausschuss) kritisiert nach Auswertung europäischer und internationaler Literatur vor allem die Größe der Brandleistung im Vorschlag zu DIN V 18232-5 für maschinelle Rauchabzugsanlagen. Die sich aus der maximalen Brandfläche und der spezifischen Brandleistung ergebende größte Brandleistung von fast 50 MW bei MRA entspreche einem kleinen Großbrand. Diese Kritik wäre für den Vorschlag zur DIN 18232-2 für natürliche Rauchabzüge ebenfalls angezeigt gewesen. Unabhängig davon erschien der Entwurf DIN 18232-2 [31] mit einer Brandleistung von fast 100 MW, obwohl nur die halbe spezifische Brandleistung angesetzt wurde. Inzwischen kritisiert U. SCHNEIDER auch die hohe Brandleistung in DIN 18232-2; vergl. Abschnitt 5.4.3.4 in [104]. Wenige Jahre vorher unterbreitete er selbst einen Bemessungsvorschlag für maschinelle Rauchabzüge, in dem Brandleistungen bis über 90 MW beherrscht werden sollten; vergl. [99] und [100]. HEGGER [54] berichtet, dass die Einspruchsberatun-

²⁸ Zwischenzeitlich wurden auch bei den natürlichen Abzügen die Brandflächen auf 80 m² begrenzt [32].

gen zum vorgenannten Entwurf nunmehr eine Begrenzung der Brandflächen auf 80 m² ergaben. Zwischenzeitlich wurde dieser Beschluss umgesetzt [32].

Die o.g. Vorgänge dokumentieren einen Wandel der Erkenntnisse:

ein Brand mit einer Fläche über 80 m² ist kein Entstehungsbrand mehr!

HEGGER berichtet weiter, dass als konservative Bemessung für natürliche Rauchabzüge eine spezifische Brandleistung von 300 kW/m² verwendet wurde, weil ein geringerer Energieinhalt in den Brandgasen einer natürlichen Rauchabzugsanlage eine geringere Abzugsleistung bewirken kann.

U. SCHNEIDER teilt mit, dass in Österreich (wie dies in Deutschland auch der Fall ist) für maschinelle Abzüge doppelt so hohe spezifische Brandleistungen wie für natürliche Rauchabzüge angewendet werden; vergl. Tabelle 5.4.3 in [104], "Bemessungsbrände nach der (österreichischen) Richtlinie TRVB S 125".

Die Bemessungsnormen DIN 18232-2 für natürliche Rauchabzugsanlagen (NRA) und DIN 18232-5 für maschinelle Rauchabzugsanlagen (MRA) werden somit künftig einheitlich fünf verschiedene Brandflächen in Abhängigkeit von der Brandentwicklungsdauer und der Brandausbreitungsgeschwindigkeit festlegen. Die beiden Normen verwenden den Begriff "Bemessungsgruppe" und ordnen diesem Brandentwicklungsdauern und Brandausbreitungsgeschwindigkeiten entsprechend Tabelle 3.2-6 zu. Erstmals in der neuen Ausgabe von DIN 18232-2 [31] werden die Begriffe "besonders geringe" und "besonders große" Brandausbreitungsgeschwindigkeit erläutert. Besonders geringe Brandausbreitungsgeschwindigkeit darf z.B. bei brennbaren Stoffen in nichtbrennbarer Verpackung angewendet werden. Besonders große Brandausbreitungsgeschwindigkeit liegt z.B. bei leichtentflammbaren Stoffen mit brennbarer Verpackung vor. In der Regel ist ohne besonderen Nachweis eine mittlere Brandausbreitungsgeschwindigkeit zu unterstellen.

Die Tabelle 3.2-7 enthält die Zuordnung von Brandkenngrößen zu den Bemessungsgruppen nach DIN 18232.

Anzusetzende Brandentwicklungs- dauer	Bemessungsgi tui	ruppe bei einer ngsgeschwindig	Brandausbrei- keit
[min]	besonders gering	mittel	besonders groß
≤ 5	1	2	3
≤ 10	2	3	4
≤ 15	3	4	5
≤ 20	4	5	_29)
> 20	5	_29)	29)

Tabelle 3.2-6: Bemessungsgruppen nach D	DIN 18232-2 bzw	^{<i>i</i>} . DIN 18232-5
---	-----------------	-----------------------------------

Tabelle 3.2-7: Zuordnung von Brandkenngrößen zu den Bemessungsgruppen nach DIN 18232

Kenngrößen der Bemessungsbrände	Bemessungsgruppe nach DIN 18232				
	1	2	3	4	5
Brandfläche A _f [m²]	5	10	20	40	80
Umfang des Brandes (Perimeter) P [m]	7,93	11,21	15,85	22,42	31,71
spezifische Brandleistung <i>q</i> _f [kW/m ²] konservativ für NRA konservativ für MRA	300 600				
Brandleistung Q _f [MW] konservativ für NRA konservativ für MRA	1,5 3	3 6	6 12	12 24	24 48
konvektiver Energiestrom \dot{Q}_{c} [MW]					
konservativ für NRA konservativ für MRA	1,2 2,4	2,4 4,8	4,8 9,6	9,6 19,2	19,2 38,4

Zu Beginn des Brandes wird entsprechend Archivunterlagen eine Brandfläche $A_{f,0}$ von 1 m² angenommen und lineares Wachstum während der ersten fünf Minuten unterstellt; je nach Brandausbreitungsgeschwindigkeit ist das Feuer nach fünf Minuten dann auf 5 m², 10 m² bzw. 20 m² angewachsen. Die zugehörigen Bemessungsgruppen lauten 1, 2, bzw. 3.

Das Wachstum der Brände kann aufgrund der Archivauswertungen somit wie folgt formelmäßig beschrieben werden [50]:

- bis 5 min Branddauer ($t \le 5$ min)

$$A_{\rm f}(t) = 1 + (A_{\rm f,5} - 1) \cdot t / 5 \ [{\rm m}^2]$$

(3.2-30)

UNIV.-PROF. DR.-ING. D. OSTERTAG

²⁹ Die Schutzziele der Norm sind durch Rauchabzüge allein nicht erreichbar.

über 5 min Branddauer (t > 5 min)

$$A_{\rm f}(t) = 2^{(t-5)/5} \cdot A_{\rm f5} \ [\rm{m}^2] \tag{3.2-31}$$

- nach Ablauf der erwarteten Brandentwicklungsdauer ($t > t_{erwartet}$)

$$A_{\rm f}(t) = A_{\rm f}(t_{\rm erwartet}) = {\rm const} ~ [{\rm m}^2]$$
 (3.2-32)

mit $A_{f,5} = 5[m^2]$ für besonders geringe Brandausbreitungsgeschwindigkeit,mit $A_{f,5} = 10[m^2]$ für mittlere Brandausbreitungsgeschwindigkeit undmit $A_{f,5} = 20[m^2]$ für besonders große Brandausbreitungsgeschwindigkeit.

In der Tabelle 3.2-8 sind die sich ergebenden radialen Brandausbreitungsgeschwindigkeiten zusammen gestellt.

anzusetzende Brandentwick- lungsdauer	radiale Brandausbreitungsgeschwindigkeit v _r [m/min]		
[min]	besonders gering	mittel	besonders groß
≤ 5 ≤ 10 ≤ 15 ≤ 20	0,252 0,178 0,168 0,178	0,357 0,252 0,238 0,252	0,505 0,357 0,336
geometrischer Mittelwert für $\leq 5, \leq 10, \leq 15, \leq 20$ (Flächengewichtung)	0,18	0,26	0,37
arithmetisches Mittel bis ≤ 20 bzw. ≤ 15	0,19	0,27	0,40
Mittelwerte nach Anhang B zu DIN 18232-2 [32]	0,15	0,25	0,45

Tabelle 3.2-8: Radiale Brandausbreitungsgeschwindigkeiten bei einer Bemessung
nach DIN 18232-2 und DIN 18232-5

Bemessungsbrände nach DIN 18232

١

Berücksichtigung von automatischen Löschanlagen

Mit automatischen Löschanlagen war lange Zeit eine gegenseitige Beeinträchtigung der Funktion von Rauchabzügen und Löschanlagen befürchtet worden. Ergebnisse intensiver Untersuchungen im In- und Ausland räumten diese Befürchtungen aus; vergl. Merkblatt des VdS [125].

Sprinkleranlagen werden naturgemäß nicht vor ihrer Auslösung wirksam. Ein Brand entwickelt sich deshalb zunächst, als wäre keine Sprinkleranlage vorhanden. Erst nach Auslösung wird unterstellt, dass die Brandfläche nicht mehr wächst. Ist eine flächendeckende automatische Sprinkleranlage installiert, kann deshalb nach DIN 18232-2 [32] bei einer nach Tabelle 3.2-6 ermittelten Bemessungsgruppe > 3 ohne Nachweis die Bemessungsgruppe 3 angesetzt werden.

3.2.4.2 Bemessungsbrände nach prEN 12101-5

Die prEN 12101-5 enthält Bemessungshinweise für Entstehungsbrände (Pre-flash-over-Brände) und für voll entwickelte Brände. Der nicht veröffentlichte Vorschlag (proposal) zu der nicht mehr weiter bearbeiteten europäischen Norm EN 12101-5 [43] enthält für Nutzungen, die bevorzugt in Verbindung mit Atrien und überdachten Einkaufsstraßen vorkommen, Empfehlungen für Bemessungsbrände. Der Vorschlag enthält im Wesentlichen Inhalte älterer englischer Veröffentlichungen; vergl. [15], [52], [53], [81] und [86]. Als der politisch gewollte Abbruch dieser Normungsarbeit erkennbar wurde, haben MORGAN et. al. den Inhalt des Normungsvorschlages erweitert, illustriert und als Buch veröffentlicht [88].

		A _f	Р	ġ _f	
Nutz	ung und Ausstattung	Brandherdfläche [m²]	Umfang der Brandherdfläche [m]	spezifische Brandleistung [kW/m²]	
1 Eir	nzelhandel				
1.1	normal ansprechende Sprinkler	10	12	625	
1.2	schnell ansprechende Sprinkler	5	9	625	
1.3	keine Sprinkler (Vollbrand)	gesamter Raum	Breite der Öff- nung	1200	
2 Gr	oßraumbüros	•			
2.1	normal ansprechende Sprinkler	16	14	225 ³¹	
2.2	keine Sprinkler	47	24	255	
2.3	keine Sprinkler (Vollbrand)	gesamter Raum	Breite der Öff- nung	255	
3 Hotelzimmer					
3.1	normal ansprechende Sprinkler	2 ³²	6	250	
3.2	keine Sprinkler	gesamter Raum (typisch sind 20 m²)	Breite der Öff- nung	100	
4 Großgarage (ein brennender PKW)					
		10	12	400	

Tabelle 3.2-9	: Bemessungsbrände	e nach prEN	12101-5	$[43]^{30}$
---------------	--------------------	-------------	---------	-------------

Der Normungsvorschlag enthält keine wachsenden Brände, sondern Bemessungsbrände, die der voraussichtlich größten Größe, die ein Brand in der jeweiligen Situation erreichen wird, entsprechen. Die Angaben sind in der Tabelle 3.2-9 zusammengestellt. Für den

³⁰ Umfangreichere Informationen enthält die Tabelle 3.2-16

³¹ In [88] haben die Urheber dieser Tabelle diesen Wert von 225 auf 255 heraufgesetzt; vergl. Tabelle 3.2-16.

³² Nach [88] typisch für ein brennendes Einzelbett.

konvektiven Energiestrom innerhalb des Brandraumes wird grundsätzlich 80%³³ der Brandleistung angesetzt. Der Normungsvorschlag empfiehlt, bei allen Nutzungen, die nicht in der Tabelle 3.2-9 enthalten sind, den konvektiven Energiestrom an den Öffnungen

- von nicht gesprinklerten Räumen mit 50% der Bemessungs-Brandleistung und
- von gesprinklerten Räumen mit 25% der Bemessungs-Brandleistung

anzusetzen.

Soweit die Berechnung zu Rauchschichttemperaturen über 550°C führt, ist der Vollbrand zu unterstellen. Ein Teil der Energie wird dann erst außerhalb des Brandraumes in den herausschlagenden Flammen erzeugt. Die Temperatur der Flammen wird selten 1000°C überschreiten.

3.2.4.3 Bemessungsbrände nach ISO/PDTR 13387-2

Der Vorschlag zu der nordamerikanisch geprägten internationalen Norm ISO 13387-2 [64] enthält Entstehungsbrände (Pre-flash-over-Brände) und voll entwickelte Brände. Bemessungshinweise finden sich dort jedoch nur für Brände in der Wachstumsphase (Entstehungsbrände).

Für Entstehungsbrände wird eine mit der Zeit t quadratisch anwachsende Brandleistung \dot{Q}_{f} nach der Formel

$$\dot{Q}_{\rm f} = \dot{Q}_{\rm o} \left(\frac{t}{t_{\rm o}}\right)^2 \tag{3.2-33}$$

angegeben; \dot{Q}_{o} ist eine Referenz-Brandleistung, die üblicherweise mit 1 MW angesetzt wird und to ist die Referenzzeit, in der der Brand bis zum Erreichen der Referenz-Brandleistung anwächst. Es wird postuliert, dass es sich bei diesem t^2 -Brand um die im Allgemeinen meist verwendete Beziehung handle.

Vier verschiedene Brandausbreitungsgeschwindigkeiten werden dem Normungsvorschlag zufolge üblicherweise bei ingenieurmäßigem Brandschutz unterschieden; vergl. Tabelle 3.2-10.

In der Tabelle 3.2-11 wurden den Brandausbreitungsgeschwindigkeiten nach [64] einige Bemessungs-Brandszenarien zugeordnet. (Weitere Zuordnungen zu den gleichen Bemessungsbränden sind dem BSI DD 240 Part 1 [18] zu entnehmen.)

Die Brandleistungen $\dot{Q}_{\rm f}$ sind in Tabelle 3.2-12 für 5, 10, 15 und 20 Minuten Branddauer angegeben; ihr Verlauf ist in Bild 3.2-4 dargestellt.

³³ In [88] haben die Urheber dieser Tabelle die konvektiven Energieanteile überwiegend reduziert; vergl. Tabelle 3.2-16.

Tabelle	3.2-10:	Parameter	von	t ² -Bränden
---------	---------	-----------	-----	-------------------------

Bezeichnung der Brandaus- breitungsgeschwindigkeit	Referenzzeit t _o [s]	
langsam	600	
mittel	300	
schnell	150	
besonders schnell	75	

Tabelle 3.2-11: Zuordnung einiger Brandszenarien zu den Brandausbreitungsgeschwindigkeiten

Bezeichnung der Brandaus- breitungsgeschwindigkeit	Bemessungs-Brandszenarien		
langsam	Fußbodenbeläge		
mittel	Büromöbel, horizontal verteilt		
schnell	Bettzeug		
besonders schnell	Polstermöbel und gestapelte Möbel in der Nähe brennbarer Bekleidungen leichtes Mobiliar Verpackungsmaterial im Abfallhaufen Papp- oder Plastikkästen in senkrechter Anordnung		

Tabelle 3.2-12: Brandleistungen $\dot{Q}_{\rm f}$ bei quadratisch wachsenden Bränden

Brandentwicklungsdauer	$\dot{\mathcal{Q}}_{ m f}$ [MW] bei Brandausbreitungsgeschwindigkeit				
[min]	langsam	mittel	schnell	besonders schnell	
5	0,25	1	4	16	
10	1	4	16	64	
15	2,25	9	36		
20	9	36			


Bild 3.2-4: Verlauf der Brandleistung Q_f bei quadratisch wachsenden Bränden

Brandflächen, spezifische Brandleistungen oder radiale Brandausbreitungsgeschwindigkeiten werden im genannten Normungsvorschlag nicht angegeben. Um einen Vergleich mit den Angaben im Abschnitt 3.2.4.1 über die Bemessungsbrände nach DIN 18232 zu ermöglichen, werden deren spezifische Brandleistungen $\dot{q}_{\rm f} = 300$ kW/m² und $\dot{q}_{\rm f} = 600$ kW/m² verwendet. Die Brandflächen zum Zeitpunkt *t* erhält man aus

$$A_{\rm f}(t) = \dot{Q}_{\rm f}(t)/\dot{q}_{\rm f}$$
 (3.2-34).

Die radialen Brandausbreitungsgeschwindigkeiten berechnen sich zu

$$v_{\rm r}(t) = \frac{\sqrt{A_{\rm f}(t)/\pi}}{t}$$
 [m/s] (3.2-35).

Mit den Gleichungen (3.2-33), (3.2-34) und (3.2-35) erhält man die radiale Brandausbreitungsgeschwindigkeit zu

$$v_{\rm r} = \frac{60}{t_{\rm g}} \sqrt{\frac{\dot{Q}_{\rm o}}{\dot{q}_{\rm f}}} = {\rm const} ~ [{\rm m/min}]$$
 (3.2-36).

Zugehörige Brandflächen wurden für eine spezifische Brandleistung von $\dot{q}_{\rm f} = 300 \text{ kW/m^2}$ und $\dot{q}_{\rm f} = 600 \text{ kW/m^2}$ berechnet und in Tabelle 3.2-13 und Tabelle 3.2-14 zusammenge-70stellt. Die Tabelle 3.2-15 enthält Brandausbreitungsgeschwindigkeiten für quadratisch wachsende Brände.

Brandentwicklungsdauer	A _f [m ²] bei Brandausbreitungsgeschwindigkeit						
[min]	langsam	langsam mittel		besonders schnell			
5	0,83	3,33	13,3	53,3			
10	3,33	13,3	53,3				
15	7,5	30					
20	30						

Tabelle 3.2-13: Brandflächen A_f bei einer spezifischen Brandleistung von $\dot{q}_f = 300 \text{ kW/m}^2$ bei quadratisch wachsenden Bränden

Tabelle 3.2-14: Brandflächen A_f bei einer spezifischen Brandleistung von $\dot{q}_f = 600 \text{ kW/m}^2$ bei quadratisch wachsenden Bränden

Brandentwicklungsdauer	$A_{\rm f}$ [m ²] bei Brandausbreitungsgeschwindigkeit					
[min]	langsam	ngsam mittel schnell		besonders schnell		
5	0,42	1,67	6,67	26,7		
10	1,67	6,67	26,7			
15	3,75	15	60			
20	15	60				

Tabelle 3.2-15: Brandausbreitungsgeschwindigkeiten vrbei quadratisch wachsenden Bränden

Bezeichnung der Brand- ausbreitungsgeschwin- digkeit	Brandausbreitungsgeschwindigkeit v_r [m/min] bei einer spezifischen Brandleistung \dot{q}_f von			
	300 [kW/m ²]	600 [kW/m ²]		
langsam	0,103	0,073		
mittel	0,206	0,146		
schnell	0,412	0,291		
besonders schnell	0,824	0,583		

3.2.4.4 Bemessungsbrände nach US-amerikanischen Richtlinien und Normen

Als amerikanische nationale Normen wurden für Rauch und Wärmeabzüge veröffentlicht:

- NFPA 92B [90] (2000) f
 ür Smoke management systems in malls (Einkaufsstraßen), Atria (Atrien), and large areas (großflächige Bereiche) und
- NFPA 204 [91] (2002) für Smoke and heat venting in eingeschossigen Gebäuden sowohl ohne als auch mit Sprinklerung, überwiegend mit natürlichen Abzügen.

NFPA 204 ist in der Ausgabe 2002 erstmals als "Standard" (Norm) anstelle als "Guide" (Richtlinie) im Titel bezeichnet; außerdem wurde die Ausgabe 2002 auf das internationale Einheitensystem (SI-Einheiten) umgestellt.

Aus dem Anwendungsbereich beider Normen ist zu entnehmen, dass sie nur für die Preflash-over-Phase gültig sind; ausdrücklich ist NFPA 204 nur für Rauchschichten anzuwenden, die keine Erhöhung der Brandleistung verursachen. Die Rauchschichttemperatur wird deshalb auf 600°C begrenzt. Um dies sicherzustellen darf die Brandleistung während der Beurteilungszeit in Abhängigkeit von der Höhe der raucharmen Schicht den Wert nach Gleichung (1.1) in [91]³⁴

$$\dot{Q}_{\rm f,max} = 1.200 \cdot d^{5/2} \, [\rm kW]$$
 (3.2-37)

nicht überschreiten (*d* ist die Höhe der raucharmen Schicht). Dieser Wert gilt als Machbarkeitsgrenze ("feasible"); für 3 m raucharme Schicht dürfte nach dieser Gleichung 18,7 MW und für 2 m raucharme Schicht immerhin noch 6,8 MW Brandleistung vorliegen.

Bemessungsbrände nach US-amerikanischen Richtlinien und Normen, Bemessungsbrände ohne Löschanlagen

Es werden Brände mit konstanter Brandleistung und Brände mit kontinuierlichem Wachstum beschrieben.

Das kontinuierliche Wachstum erfolgt wie im vorigen Abschnitt (nach ISO) für Entstehungsbrände mit einer mit der Zeit *t* quadratisch anwachsenden Brandleistung \dot{Q}_{f} nach der Formel

$$\dot{Q}_{\rm f} = 1000 \left(\frac{t}{t_{\rm o}}\right)^2 [\rm kW]$$
 (3.2-38);

 $t_{\rm o}$ ist auch hier die charakteristische Zeit, in der der Brand bis zum Erreichen einer Brandleistung von 1000 kW anwächst. Das Prinzip des kontinuierlich wachsenden Brandes mit

³⁴ In NFPA 204 (Ausgabe 2000) ist der Faktor mit 12.000 angegeben; er muss wie hier genannt 1.200 lauten. Dies ergibt sich durch Vergleich mit der gleichen Formel in einer älteren Ausgabe von NFPA 204, in der noch nicht auf SI-Einheiten umgestellt war (umfangreiche Tabellen zur Einheitenumrechnung sind in [73] enthalten).

der vorausgehenden Schwelbrandphase ist in Bild 3.2-5 eingetragen. Anstelle Gleichung (3.2-38) mit der Referenzzeit t_0 wird auch

$$\dot{Q}_{\rm f} = \alpha_{\rm o} t^2 \tag{3.2-39}$$

geschrieben mit

= Brandwachstumsgeschwindigkeit [kW/s²] und α_{0}

= Zeit seit dem effektiven Zündzeitpunkt [s]. t

Zwischen der Referenzzeit t_0 in (3.2-38) und der Brandwachstumsgeschwindigkeit in (3.2-39) besteht der Zusammenhang

$$\alpha_{o} = \frac{1000}{t_{o}^{2}}$$
(3.2-40)

3000

2000

Bei der Umstellung vom angelsächsischen Maßeinheitensystem zu den SI-Einheiten wurden die Zahlenwerte der Referenzzeit to beibehalten, da eine 1:1-Umstellung anstelle einer exakten Umrechnung mit 1 BTU = 1,05506 kJ erfolgte (die gleichen Referenzzeiten sind in NFPA 92B Ausgabe 2000 bis zum Erreichen einer Brandleistung von 1000 BTU/s und in NFPA 204 Ausgabe 2002 bis zum Erreichen einer Brandleistung von 1000 kW angegeben). Wie bei ISO werden die vier verschiedenen Brandausbreitungsgeschwindigkeiten nach Tabelle 3.2-10 unterschieden.

Brandleistung [kW]



Bild 3.2-5: Prinzip des kontinuierlich wachsenden Feuers nach NFPA 204

Bemessungsbrände nach US-amerikanischen Richtlinien und Normen, Berücksichtigung von automatischen Löschanlagen

Auf der Grundlage neuerer 1:1-Versuche für Großraumbüros (Literatur [64] von 1992 und [65] von 1997 in NFPA 92B [90]) wird für die Zeit nach Auslösung von Sprinkleranlagen der konservative Ansatz

$$\dot{Q}_{\rm f}(t) = \dot{Q}_{\rm act} \, {\rm e}^{-kt}$$
 (3.2-41)

für das Abklingen der Brandleistung angegeben. Es wird also kein Löschen aber auch kein konstantes Weiterbrennen unterstellt.

kontinuierlich vachsendes Feuer Es bedeuten:

t

- $\dot{Q}_{f}(t)$ = Brandleistung zum Zeitpunkt *t* nach Sprinklerauslösung [kW]
- \dot{Q}_{act} = Brandleistung zum Zeitpunkt der Sprinklerauslösung [kW]

= Zeit nach Sprinklerauslösung [s]

k = Abklingkonstante [s⁻¹]

 \dot{Q}_{act} erhält man aus dem Ansatz des t^2 -Brandes und dem auf geeignete Weise ermittelten Auslösezeitpunkt. Die Abklingkonstante k hängt von der Wasserbeaufschlagung und der Art der Brandlast ab und beträgt zwischen 0,0023 s⁻¹ bei geringen Brandlasten in geschützten Bereichen und 0,00155 s⁻¹ bei großen Brandlasten. Die Werte wurden bei einer Wasserbeaufschlagung von 0,1 gpm/ft² (US gallons per minute per square foot) entsprechend 4 mm/min (genau: 4,0747) gewonnen. Bild 3.2-6 zeigt das Abklingverhalten für beide Abklingkonstanten.



Bild 3.2-6: Abklingen der Brandleistung nach Auslösung der Sprinkler (nach Gleichung (3.2-41))

Die in Deutschland bisher angewendeten VdS-Sprinklerrichtlinien [124] fordern für Büros und ähnliche Nutzungen eine Wasserbeaufschlagung von nur mindestens 2,5 mm/min (Brandgefahrengruppe BG 1). Die Gleichung (3.2-41) ist in Deutschland deshalb erst bei den nächst höheren Brandgefahrengruppen BG 2.1 bis BG 2.3 mit einer Wasserbeaufschlagung von mindesten 5,0 mm/min anwendbar (z.B. Bücherei oder Kaufhaus); für die Abklingkonstante sollte dann der Wert 0,00155 s⁻¹ verwendet werden.

3.2.4.5 Bemessungsbrände nach britischer Literatur

		A _f	P		, Q _f	, Ż	Q _{c,o}
Nutzu	ng und Ausstattung	Brandherdfläche [m²]	Umfang der Brandherdfläche [m]	spezifische Brandleistung [kW/m²]	Brandleistung [MW]	konvektiver Energie- strom in der Nähe des Brandherdes [MW]	konvektiver Energie- strom an der Raum- öffnung [MW]
1 Einz	elhandel		······································				
1.1	normal ansprechende Sprinkler	10	12	625	6,25	5,0 MW = 0,8 Q́ _f	5,0 MW = 0,8 Q _f
1.2	schnell ansprechende Sprinkler	5	9	625	3,125	2,5 MW = 0,8 Q _f	2,5 MW = 0,8 Q _r
1.3	keine Sprinkler (Vollbrand)	gesamter Raum	Breite der Öffnung	1200	?	?	?
2 Grof	B raumbüros (auch fi	ir Einzelbüro	s anwendbar)			
2.1	normal ansprechende Sprinkler	16	14	255	4,08	2,7 MW ≈ ⅔ Q _r	1,0 MW ≈ ¼ Q _r
2.2	keine Sprinkler	47	24	255	≈12,0	8,0 MW = ⅔ Q _f	6,0 MW = ½ Q॑₁
2.3	keine Sprinkler (Vollbrand)	gesamter Raum	Breite der Öffnung	255	?	?	½ Q́₁
3 Hote	Izimmer (typisch sin	d 20 m²)					
3.1	normal ansprechende Sprinkler	2	6	250	0,5	0,4 MW = 0,8 ⋅ Q _f	0,3 MW = 0,6 · Q _f
3.2	keine Sprinkler	gesamter Raum	Breite der Öffnung	100	2,0	1,6 MW = 0,8 · Q _f	1,0 MW = ½ Q _f
4 Groß	garage (ein brenner	ider PKW)					
		10	12	400	4	3 MW = ¾ Q _f	2,0 MW = ½ Q _f

Tabelle 3.2-16: Bemessungsbrände nach MORGAN et. al. [88]

Die aus neuerer britischer Literatur stammenden Bemessungsbrände wurden in prEN 12101-5 aufgenommen. Fast zeitgleich veröffentlichten die Initiatoren der prEN 12101-5 ihre "**Design methodologies for smoke and heat exhaust ventilation"** (MORGAN et.al. [88]). Die gegenüber prEN 12101-5 überarbeiteten Bemessungsbrände sind in der Tabelle 3.2-16 wiedergegeben. Sie enthalten teilweise geringere Anteile konvektiver Wärme als in prEN 12101-5 vorgesehen ist. Damit tragen die Autoren offenbar den Angaben im BSI DD

240 [18] und in den US-amerikanischen Richtlinien und Normen Rechnung; dort ist für Bemessungszwecke ein konvektiver Wärmeinhalt im Plume von ²/₃ der Brandleistung vorgesehen.

3.2.4.6 Berücksichtigung von Sprinkleranlagen nach deutscher Literatur

HOSSER, DOBBERNACK und SIEGFRIED [62] sowie HOSSER und DEHNE [63] verwenden einen Mittelweg bei der Berücksichtigung der Sprinklerwirkung. Während prEN 12101-5 [43] nach der Sprinklerauslösung eine konstant bleibende Energiefreisetzung vorsieht und die amerikanische Literatur sofort nach Auslösung einen exponentiellen Abfall der Energiefreisetzung ansetzt, schlagen HOSSER et. al. vor, nach Auslösung die Energiefreisetzung für eine Dauer von 5 min konstant anzunehmen und anschließend während 20 min linear auf Null abzufallen zu lassen.

3.2.4.7 Bemessungsbrände für Atrien

In Deutschland werden unter dem Einfluss britischer Erfahrungen (vergl. Auswertungen von 1994 für große Atrien von HANSELL und MORGAN [53]) für Atrien Brandherde am Fußboden mit 1 MW **und** 5 MW oder 6 MW konvektiver Wärmeleistung angesetzt. Der niedrige Wert dient dabei oftmals der Untersuchung der Verdünnung der Rauchgase, da eine Entrauchung bei geringen Wärmeleistungen – zumindest mit natürlicher Entrauchung – in Frage gestellt werden muss. Mit dem zwischenzeitlich zu beobachtenden Nutzungswandel bei Atrien von der überdachten Verkehrsfläche hin zum Aufenthaltsbereich mit höchstem Komfort müssen die Bemessungsbrände "angepasst" werden. MORGAN et. al. [88] veröffentlichten deshalb 1999 eine

Aufstellung detaillierter Brandszenarien nach MORGAN et. al.

(auf dem Fußboden von Atrien)

- eine Gruppe von vier leichten Stühlen, die so angeordnet ist, dass mit einem Brandherdumfang von 6 m und einer konvektiven Wärmeleistung von 2,0 MW gerechnet werden kann,
- eine gesprinklerte Büroanordnung, unter der Voraussetzung, dass die Sprinkler auch über der Brandfläche wirken, mit einer spezifischen konvektiven Wärmeleistung von 115 kW/m²,
- eine ungesprinklerte B
 üroanordnung mit einer spezifischen konvektiven W
 ärmeleistung von 250 kW/m²,
- ein PKW mit einem Brandherdumfang von 12 m und einer konvektiven Wärmeleistung von 3,0 MW,

 für Brandlasten mit unbekannter spezifischer Brandleistung wird als pessimistischer Daumenwert ein spezifischer konvektiver Wärmestrom von 500 kW/m² empfohlen (dieser Wert übersteigt noch den spezifischen konvektiven Wärmestrom, der sich aus einer spezifischen Brandleistung von 600 kW/m² ergibt, wie sie in DIN 18232-5 angewendet wurde).

KLOTE und MILKE geben 2002 ein Möblierungsbeispiel für ein Atrium an [73], bei dem durch Einhaltung ausreichender Abstände "nur" zwei Poltersofas und ein Polstersessel in Brand geraten. Die einzelnen aus Laborversuchen gewonnenen Brandleistungsverläufe fügen sie entsprechend den durch Strahlungswärme erfolgenden Entzündungen zeitlich versetzt zusammen und kommen zu einer Brandleistung, die unter 4 MW bleibt und bereits nach 10 Minuten abklingt (Example 2.2 base fuel package).

3.2.5 Dauer von Bränden

Brände dauern so lange bis sie entweder erfolgreich gelöscht werden oder die Brandlast weitgehend verbrannt bzw. verbraucht ist; für Bemessungszwecke empfiehlt DD 240 Part 1 [18], eine konstante spezifische Brandleistung zu unterstellen, bis 80% der Brandlast verbraucht sind. Es folgt dann die Phase des Abklingens (Abkühlphase). Für die Dauer eines Brandes erhält man somit

$$\tau_{\text{Brand}} \approx 0.8 \cdot q / (60 \cdot \dot{q}) \quad [\min]$$
(3.2-42)

mit q [kJ/m²] für die spezifische Brandlast und mit \dot{q} [kW/m²] für die spezifische Brandleistung.

Danach führt eine als gering anzusehende spezifische Brandbelastung von 180 MJ/m² bei einer spezifischen Brandleistung von $\dot{q} = 300$ [kW/m²] zu einem Brand von knapp 10 min Dauer. Für einen durchschnittlichen Bürobrand ergibt sich mit den Werten aus Tabelle 3.2-4 und Tabelle 3.2-9 eine Branddauer von ca. 22 min. Für einen durchschnittlichen Hotelzimmerbrand ergibt sich auf gleiche Weise eine Branddauer von ca. 41 min.

3.3 Anwachsen des Brandgasstromes innerhalb von Gebäuden

In der Flammenzone (Bereich I) um im Bereich der intermittierenden Flamme Bereich (II) strömt dem Brandherd die zur Verbrennung notwendige Luft zu. Bei großen Bränden bzw. niedrigen Räumen werden die Flammen bis zur Decke schlagen und dort umgelenkt werden. Aus Öffnungen in der Decke oder aus offenen oder geborstenen Fenstern können die Flammen herausschlagen und die Verbrennung wird erst außerhalb des vom Brand betroffenen Raumes beendet werden. Bei kleinen Bränden bzw. bei großen Deckenhöhen wird bei ausreichender Luftzuströmung eine nahezu vollständige Verbrennung im vom Brand betroffenen Bereich stattfinden. Auch nach der vollständigen Verbrennung mischt sich Luft in die aufsteigenden Rauchgase (den Auftriebs-Plume, Bereich III) ein. Dieser Einmischvorgang (engl.: entrainment) ist in Bereichen hoher Turbulenzen wie bei Windeinfluss an Auftrieb-Plumes stärker ausgeprägt. Beim Strömen unterhalb von glatten Decken ist der Einmischvorgang vernachlässigbar gering; dies wurde bereits im Abschnitt 3.1.2 anhand von Bild 3.1-1: Ausbildung einer Deckenströmung über der "ruhenden" Rauchschict (nach Cooper [20]) erläutert.

Auf dem Weg bis zum Austritt aus dem Gebäude wächst der Brandgasstrom an jeder Umlenkung – wie Unterzügen, Fensterstürzen, Deckenkanten, Balkonen und Galerien – sowie an weiteren Auftriebsstrecken weiter an. Häufig liegen deshalb die mittels Entrauchungsanlagen zu beherrschenden Rauchgasmengen zwischen dem fünffachen und dem 100-fachen der stöchiometrischen Rauchgasmengen (siehe Abschnitt 3.2.2).

Die Einmischvorgänge sind nur experimentell zu quantifizieren und die Ergebnisse in mehr oder weniger empirischen Formeln auszudrücken. Angaben über das Anwachsen des Brandgasstromes innerhalb von Gebäuden in Folge der Einmischvorgänge findet man in der umfangreichen Literatur in Form von Plume-Formeln (z.B. BEYLER [13], BREIN [17], BSI DD 240 [18] und [19], COOPER [20], MORGAN et. al. [88], THOMAS [117], ZUKOSKY [138]).

In der grundlegenden Arbeit von THOMAS [117] (dort Seite 37) finden wir die bis heute unbestrittenen Kernaussagen über kleine und große Feuer:

"RELATION BETWEEN THEORIES FOR LARGE AND SMALL FIRES

This report has presented methods of calculating vent areas suitable for the two extreme situations

- (i) A small fire which may be treated as a point source of heat below the actual fire
- (ii) A large fire with linear dimensions at least half the distance between the floor and the bottom of the hot layer.

It is only possible to discuss intermediate situations approximately, thus the theory of small fires will be applied to those of any size and the theory of large fires to those of any size and the results compared." THOMAS bezeichnete ein Feuer als groß, wenn dessen lineare Brandherdabmessung mindestens halb so groß war wie der Abstand vom Brandherd zur Unterkante Rauchschicht (in unserem Sprachgebrauch die Dicke d der raucharmen Schicht). HINKLEY [57] begnügte sich 1986 mit nur noch einem Zehntel dieses Abstandes, um immer noch von großem Feuer zu sprechen.

BREIN [17] untersuchte in seiner Arbeit "Anwendungsbereiche und -grenzen für praxisrelevante Modellansätze zur Bewertung der Rauchgasableitung in Gebäuden (Plume-Formeln)" eine Vielzahl der in der Literatur angegebenen Plume-Formeln (aus Großbritannien, USA und Japan stammend) auf ihre Anwendbarkeit in der Praxis. HINKLEY [57] behauptete 1986, ganz Europa wende den eigentlich für relativ große Feuer entwickelten THOMAS-Plume (praktisch ohne Alternative oder Einschränkung) an. Spätestens seit der Veröffentlichung von 1:1-Versuchsergebnissen aus Japan im Jahre 1985 [114] und [130] wird ein als TANAKA-Plume bekannt gewordener Plume über relativ kleinem Feuer für Atrienbauten in Deutschland benutzt. Die Plumes weisen einen Schönheitsfehler insofern auf, dass sie nicht nahtlos ineinander übergehen. Im NFPA 92B [90] der USA gibt es Anpassungen der Art, dass die Plumes für alle Anwendungen nahtlos ineinander übergehen. Der Atlantik muss Wohl oder Übel als Grenze zwischen zwei verschiedenen Plume-Vorstellungen hingenommen werden. HINKLEY (Großbritannien) hat noch in der zweiten Auflage des 1995 in den USA erschienen SFPA Handbuches [109] das Kapitel 3-9 "Smoke and heat venting" [59] verfasst und sich breit über die britischen Plume-Formeln ausgelassen. In der dritten Auflage des gleichen Handbuches [110] wurde das gleiche Kapitel 2002 von COOPER [20] verfasst. COOPER nahm zwar den THOMAS-Plume in sein Kapitel auf, grenzte seine Anwendung ähnlich wie in der Originalarbeit von THOMAS [117] auf nahe über dem Feuer liegende und sehr heiße Rauchschichten ein.

Für die Überarbeitung der DIN 18232-2 haben sich MAX und BREIN [77] auf einen gut begründeten Kompromiss eingelassen, bei dem für viele Fälle nach wie vor die THOMAS-Formel Anwendung findet, für andere Fälle aber ein Plume von ZUKOSKY und in einem Übergangsbereich beide Plumes gewichtete Anwendung finden. Als Entscheidungskriterium verwendeten MAX und BREIN die Höhe der Flammen. Damit sind sie wieder sehr nahe an der ursprünglichen Definition von Thomas.

Im Folgenden wird einer ähnlichen Vorgehensweise gefolgt, weil die in Europa häufig verwendete THOMAS-Formel weiterhin für viele Anwendungen nicht in Frage gestellt werden kann, und nur für die übrigen Anwendungen werden der ZUKOSKY-Plume und der davon abgeleitete TANAKA-Plume genannt.

Zur Behandlung von komplexen Plumes (Fenster-, Balkon-, Überström-Plumes, anliegende und freie linienförmige Plumes) existiert zwar eine Fülle von Literatur. Außer dem bei Vollbrand aus einem Fenster oder einer anderen senkrechten Raumöffnung austretenden Plume bezieht sich die Literatur zu den komplexen Plumes fast ausschließlich auf englische Arbeiten von HANSELL, MARSHALL, MORGAN, THOMAS u.a. Wir werden uns bei den komplexen Plumes deshalb auch intensiver mit der englischen (Original-) Literatur auseinandersetzen.

Fenster-Plumes für Vollbrand wurden schon früh untersucht (Forschungsergebnisse wurden z.B. veröffentlicht: 1978 von BERCHTOLD, EHLERT und WESCHE [12] und 1982 von JANSSON und ONNERMARK [65]). Dies führte zur Normungsreife, wie aus der brandschutztechnischen Bemessung von Bauteilen im Einwirkungsbereich von möglichen Fenster-Plumes nach den EUROCODES 1 und 3 [36] und [37] hervorgeht.

3.3.1 Plume direkt über dem Feuer

3.3.1.1 Flammenhöhe

Für jedes Bemessungsfeuer bestimmt die Flammenhöhe und die geforderte oder angestrebte raucharme Schichthöhe, ob es sich um ein *relativ kleines* oder um ein *relativ großes Feuer* handelt. Ein Feuer wird als kleines Feuer definiert, wenn seine Flammen nicht bis in die Rauchschicht unter der Decke hineinreichen, sei es weil das Feuer klein genug oder der Raum hoch genug ist. Das kleine Feuer geht von einem punktförmigen Ursprung aus, der zunächst in der Ebene des Brandherdes liegt. Bei flächigen Brandherden mit endlichen Abmessungen geht das Feuer von einer virtuellen Punktquelle aus, die meist unterhalb des Brandherdes liegt. Ein Feuer wird als großes Feuer definiert, wenn die Flammen bis in die Rauchschicht hinein reichen. Die Begriffe großes und kleines Feuer charakterisieren also die geometrischen Verhältnisse von Feuer und raucharmer Schichthöhe. Diese Begriffe dürfen nicht mit den für das Schadensausmaß charakteristischen Begriffen kleiner Brand oder Großbrand verwechselt werden.

Aus der Vielzahl der in der Literatur genannten Berechnungsformeln für die Höhe der Flammen eines Feuers als Unterscheidungsmerkmal für relativ kleine oder relativ große Feuer wird zunächst ein bereits 1963 von THOMAS [118]³⁵ mitgeteilter Zusammenhang untersucht, den auch MAX und BREIN [77] für die Neufassung von DIN 18232-2 verwendeten. Er hat den Vorteil, ohne Anwendungsbedingungen oder Geltungsbereiche auszukommen.

Der Zusammenhang nach THOMAS ist in Bild 3.3-1 wiedergegeben. Zusätzlich ist in dem Bild die Linie mit der Neigung 0,61 eingetragen, die den Zusammenhang nach THOMAS gemäß seiner Gleichung (12ii)

$$h_{\rm fl} / D = 42 \cdot \{m'' / \rho_{\infty} (g \cdot D)^{1/2}\}^{0.61}$$
(3.3-1)

³⁵ THOMAS (GB) hat bereits Anfang der 60-er Jahre bei Arbeiten für internationale Symposien auf das angelsächsische Maßsystem verzichtet und an seiner Stelle das weltweit von Physikern bevorzugte cgs-System (cm, Gramm, Sekunde einschließlich Kelvin-Temperaturgraden) verwendet. Dies erleichtert uns die Anwendung solcher Veröffentlichungen erheblich, da nur Dezimalstellen zu beachten sind.

zeigt. Die in dem Bild hinterlegten Flächen kennzeichnen den sich ergebenden Anwendungsbereich für Brandflächen nach DIN 18232 von 5 m² bis 80 m² und für spezifische Brandleistungen zwischen 200 kW/m² und 750 kW/m² (Geltungsbereich des THOMAS-Plumes). Die auf den Brandherddurchmesser *D* bezogene Flammenhöhe $h_{\rm fl}$ (bei THOMAS mit L bezeichnet) liegt hierfür im Bereich $0,6 < h_{\rm fl}/D < 2,0$, wobei die untere Grenze bei 80 m² großen Brandherden mit "nur" 200 kW/m² spezifischer Brandleistung und die obere Grenze bei 5 m² "kleinen" Brandherden mit 750 kW/m² spezifischer Brandleistung erreicht wird.



Bild 3.3-1: Flammenhöhe als Funktion des Abbrandes nach THOMAS [118]

MAX und BREIN wiesen darauf hin, dass der geschweifte Klammerausdruck in Gleichung (3.3-1) einer modifizierten FROUDE-Zahl Fr^*

$$Fr^* = \sqrt{Fr} = \frac{u}{\sqrt{g \cdot l}}$$
(3.3-2)

entspricht. Sie haben den spezifischen Abbrand m'' der Gleichung (3.3-1) wie folgt durch die Brandleistung ausgedrückt

$$m'' = \frac{\chi \cdot \dot{Q}_{\rm f}}{H_{\rm u,eff} \cdot \pi \cdot D^2 / 4} \ [\rm kg/s,m^2]$$
(3.3-3)

und erhielten für die bezogene Flammenhöhe den Ausdruck

$$h_{\rm fl} / D = 42 \left(\frac{\chi \dot{Q}_{\rm f}}{H_{\rm u,eff} \rho_{\infty} (gD)^{1/2}} \right)^{0.61}$$
(3.3-4).

Mit den von ihnen verwendeten Zahlenwerten für

$H_{\rm u,eff}$	= 15.000 kJ/kg Holz	effektiver unterer Heizwert für Holz,
χ	= 0,8	Faktor "Chi" für den konvektiven Energieanteil
$ ho_{\infty}$	= 1,2045 kg/m ³	Dichte von Luft bei 20°C und 1013,25 hPa
g	= 9,80665 m/s ²	Erdbeschleunigung

erhält man die anwenderfreundliche und identische Ergebnisse liefernde Gleichung zur Berechnung der Flammenhöhe:

$$h_{\rm fl} = 0,0536 D \left(\frac{\dot{Q}_{\rm f}}{D^{5/2}}\right)^{0,61}$$
 [m] nach THOMAS 1963 [118] (3.3-5).

Hier ist der Brandherddurchmesser D in [m] und die Brandleistung $\dot{Q}_{\rm f}$ in [kW] einzusetzen.

MAX und BREIN [77] gaben auch die folgenden Gleichungen für die Flammenhöhe an:

$$h_{\rm fl} = 0.23 \cdot \dot{Q}_{\rm f}^{2/5}$$
 nach ZUKOSKY [138],
siehe auch in [77] (3.3-6)

mit dem Geltungsbereich $h_{\rm fl}$ / D < 6 und $\dot{Q}_{\rm f}^{2/5}$ / D < 26 und

$$h_{\rm fl} = 0.23 \cdot \dot{Q}_{\rm f}^{2/5} - 1.02D$$
 nach HESKESTAD, siehe in [77] (3.3-7)

mit dem Geltungsbereich $7 < \dot{Q}_{\rm f}^{2/5} / D < 700$.

Für einen Geltungsbereich $h_{\rm fl}/D > 3$ wird nach COX und CHITTY

$$h_{\rm fl} = 0, 2 \cdot \dot{Q}_{\rm f}^{2/5}$$
 siehe in [18] (3.3-8)

angegeben.

Ohne Einschränkung des Geltungsbereiches wird in den USA für Handrechnungen (hand calculations) die Gleichung

$$h_{\rm fl} = 0,235 \cdot \dot{Q}_{\rm f}^{2/5} - 1,02D$$
 nach NFPA 204 Standard
von 2002 [91] (3.3-9)

vorgeschrieben (The mean flame height shall be calculated ...).

Benutzt man frei gewählt z.B. die kleinste Brandfläche nach DIN 18232 mit $A_f = 5 \text{ m}^2$ und die größte spezifische Brandleistung im Geltungsbereich der THOMAS-Formel mit $\dot{q}_f = 750 \text{ kW/m}^2$ in den drei vorgenannten Gleichungen für die Flammenhöhe, so erhält man folgendes Ergebnis:

Flammenhöhe nach THOMAS $h_{\rm fl} = 4,99$ m, Flammenhöhe nach ZUKOSKY $h_{\rm fl} = 6,19$ m, Flammenhöhe nach HESKESTAD $h_{\rm fl} = 3,61$ m.

In Anbetracht dieser großen Streubreite und des ohnehin bereits durch THOMAS willkürlich aus Bild 3.3-1 "herausgeschnittenen" Zusammenhanges können die Verfasser dieses Berichtes ohne eine kaum erzielbare Abstimmung mit den Verfechtern der THOMAS- Plume-Formel nicht empfehlen, die Schnittstelle zwischen kleinem und großem Feuer in jedem Einzelfall durch die neu zu berechnende Flammenhöhe zu fixieren.

Es wird bevorzugt, die Anwendungsgrenzen der Literaturangaben nicht völlig in Frage zu stellen, zudem der THOMAS-Plume-Formel höchstes Vertrauen unter allen beurteilten Plume-Formeln durch eine an der UNIVERSITÄT LUND durchgeführte Beurteilung zuteil wurde; vergl. hierzu die Ausführungen des Abschnittes 1.1.1 in diesem Bericht.

3.3.1.2 Plume über "großem" Feuer



Bild 3.3-2: Zur Definition eines großen Feuers

Der Massenstrom eines Plumes über einem "großen" Feuer, per Definition einem Feuer, dessen Flammen bis in die Rauchschicht hineinreichen (vergl. Bild 3.3-2), berechnet sich nach THOMAS [117] und HINKLEY [57] aus der nur vom Umfang P [m] des Brandherdes und von der Steighöhe z [m] des Plumes abhängigen Gleichung

$$\dot{m}_{\rm P} = C_{\rm E} \cdot P \cdot z^{3/2}$$
 [kg/s] (3.3-10).

Die Gleichung ist nach HINKLEY für spezifische Brandleistungen $\dot{q}_{\rm f}$

$$200 \text{ kW/m}^2 < \dot{q}_{\mathrm{f}} < 750 \text{ kW/m}^2$$

anwendbar. Die gleichen Grenzen wurden z.B. auch in DD 240 [18] und prEN 12101-5 [43] aufgenommen. Bei MORGAN et.al. [88] wurde die obere Grenze mit 1800 kW/m² angegeben; dies erfolgte auf der Grundlage einzelner Versuchsergebnisse, die von HINKLEY [57] ausgewertet worden waren.

Der Faktor C_E ist die Einmischkonstante mit der Einheit [kg s⁻¹ m^{-5/2}]. In der Tabelle 3.3-1 sind die verschiedenen Angaben für die Einmischkonstante zusammengestellt; in der Ta-

belle bezeichnen d die raucharme Schichthöhe, D den Durchmesser oder die Seitenlänge eines quadratischen Brandherdes, P den Umfang des Brandherdes und A_f die Fläche des Brandherdes. Der Faktor C_E unterscheidet sich sehr erheblich für großflächige und für zellenartige Räume.

Zu den Begriffen großflächige und zellenartige Räume:

Nach [43] und [88] liegen keine großflächigen Räume vor, wenn die größere Raumseite die fünffache Brandherdabmessung $(5 \times D)$ unterschreitet. In diesen Fällen ist der hohe Wert der Einmischkonstanten (0,337 bzw. 0,34) zu verwenden. Danach erfolgt bei nur einseitiger Zuströmung eine höhere Einmischung als bei freier Zuströmung von allen Seiten. Erklärbar ist dieses Phänomen dadurch, dass bei einseitiger Zuströmung höhere Turbulenzen den Einmischvorgang verstärken.

 Tabelle 3.3-1:
 Zahlenwerte und Anwendung der Einmischkonstanten C_E nach verschiedenen Literaturangaben

CE	Anwendungsgrenzen	Anwendungsbeispiele	Quelle
0,188	kreisförmige und quadratische Brandherde mit der linearen Abmessung <i>D</i> d < 10 D bzw. $d < 2,5 P$	achssymmetrischer Plume für groß- flächige Brandherde	[18]
0,19	großflächige Räume $d \leq 10 \sqrt{A_{\rm f}}$	Zuschauerräume, Stadien, Großraum- büros, Atrien usw. mit der Decke weit oberhalb des Brandherdes	[43] [88]
0,21	großflächige Räume $d < 3 \sqrt{A_{\rm f}}$	Großraumbüros mit der Decke nahe über dem Brandherd	[88]
0,337	zellenartige Räume	Geschäftseinheiten, Einzelbüros, Ho-	[43]
0,34	$d \leq 10 \ \sqrt{A_{\mathrm{f}}}$	tel-Bettenzimmer usw. mit Lüftungs- öffnungen, die im Wesentlichen an ei- ner Seite des Brandherdes liegen (z.B. ein Bürofenster in nur einer Wand) (die meisten kleinen Räume werden mit diesem Wert zu rechnen sein)	[88]

Für DIN 18232 wurde die Tabelle 3.3-2 mit Mindestraumabmessungen entwickelt [135], für die die verwendete Einmischkonstante $C_{\rm E} = 0,188$ bzw. 0,19 für großflächige Räume noch gelten soll. Man wollte kleinstmögliche Räume in den Geltungsbereich der für großflächige Räume geschaffenen Norm einbeziehen und mit der Begrenzung des Seitenverhältnisses bis 1 : 2 die Anwendung auf Flure und Tunnels ausschließen.

BMG [./.] (Brandherdfläche A _f [m²])	1 (5)	2 (10)	3 (20)	4 (40)	5 (80)
<i>L</i> [m]	≥12,5	≥18	≥25	≥36	≥50
$A_{\text{Raum}} [\text{m}^2]^{-36}$	≥80	≥160	≥320	≥640	≥1280

Tabelle 3.3-2:	Mindestraumgrößen	nach DIN	18232 in	Abhängigkeit	von der	Brand-
	herdfläche					

Zur Geometrie des Brandherdes:

Die Definition der Anwendungsgrenzen nach [43] und [88] schließt eine Anwendung auf langgezogene Brandherde nicht aus. Vergleicht man die Angaben nach [43] zur Brandherdfläche A_f und zum Brandherdumfang P in der Tabelle 3.2-9 mit dem jeweils möglichen Brandherdumfang bei kreisförmigem und bei quadratischem Brandherd, so ist festzustellen, dass neben einer großzügigen Rundung **nur runde oder quadratische Brandherd**herde angenommen wurden.

In der Tabelle 3.3-3 wird ein Kompromissvorschlag zur Anwendung der Plume-Formel nach THOMAS für Plumes über "großem" Feuer unterbreitet. Dieser Vorschlag erlaubt es, für alle Bemessungsbrände nach prEN 12101-5 [43] (vergl. Tabelle 3.2-9 in diesem Bericht) den THOMAS-Plume anzuwenden. Für alle anderen Anwendungen wird der Plume über "kleinem" Feuer anzuwenden sein.

Tabelle 3.3-3:Kompromissvorschlag zur Anwendung des
Plume über "großem" Feuer

CE	Anwendungsgrenzen	Anwendungsbeispiele
0,188	großflächige Räume mit den Seiten- längen <i>a</i> und <i>b</i> $a > 5 \sqrt{A_f}$ und $b > \sqrt{A_f} d < 3 \sqrt{A_f}$	Großraumbüros mit der Decke nahe über dem Brandherd
0,337	zellenartige Räume $d \le 3 \sqrt{A_{\rm f}}$	Geschäftseinheiten, Einzelbüros, Hotel- zimmer

3.3.1.3 Plume über "kleinem" Feuer

Plume über "kleinem" Feuer, kreisförmige Brandherde

Für die Berechnung des Massenstromes eines Plumes über einem "kleinen" Feuer, per Definition einem Feuer, dessen Flammen deutlich unterhalb der Rauchschicht enden (vergl. Bild 3.3-3), liegen mehrere Berechnungsformeln vor.

³⁶ Seitenverhältnis 1:1 bis 1:2.

UNIV.-PROF. DR.-ING. D. OSTERTAG



Bild 3.3-3: Zur Definition eines kleinen Feuers

Gemeinsam ist den Formeln für "kleine" Feuer, dass der Massenstrom zwar in ähnlicher Weise wie bei "großen" Feuern von der Höhe über dem Brandherd abhängt, als zweiter Abhängigkeitsparameter tritt aber der konvektive Energiestrom im Plume und nicht der Umfang des Brandherdes in Erscheinung. Diese Plume-Formeln entsprechen der Form:

$$\dot{m}_{\rm P} = \text{fkt}(Z^{5/3}\dot{Q}^{1/3})$$
 (3.3-11).

Sie enthalten den konvektiven Energiestrom in der Potenz "1/3" und die Höhe in der Potenz "5/3"; bei Plumes dieser Form für komplexe Verhältnisse – wie Überström-Plumes von einem brennenden Bereich in einen großen Bereich – werden zwei verschiedene Längen, eine waagrechte Länge mit der Potenz "2/3" und die Höhe mit der "Potenz "3/3" benutzt.

Der Plume nach ZUKOSKY mit einer Punktquelle mit der Brandleistung $\dot{Q}_{\rm f}$ in der Ebene des Brandherdes lautet [138]³⁷:

³⁷ HESKESTAD [56] erinnert daran, dass der Faktor 0,21 in der Gleichung (3.3-12) in der Originalarbeit für die Brandleistung $\dot{Q}_{\rm f}$ angesetzt worden war. Es müsse ein Faktor 0,24 verwendet werden, wenn anstelle $\dot{Q}_{\rm f}$ der konvektive Energiestrom $\dot{Q}_{\rm p}$ eingesetzt werden soll (dabei wird im Plume ein konvektiver Energieanteil von 70% angenommen).

Anmerkung der Verfasser: Der ZUKOSKY-Plume wurde mit nur gering strahlenden Feuern experimentell nachgewiesen; möglicherweise erklärt sich damit eine gewisse "Unschärfe" in der Definition des Energiestromes, die auch bei Yamana und Tanaka [130] zu erkennen ist.

$$\dot{m}_{\rm p} = 0.21 \left(\frac{\rho_{\infty}^2 g}{c_{\rm p} T_{\infty}} \right)^{1/3} z^{5/3} \dot{Q}_{\rm f}^{1/3} \quad [\rm kg/s]$$
(3.3-12).

Setzt man $g = 9,80665 \text{ m s}^{-1}$ und im Übrigen die Werte für 20°C ein, so erhält man

$$\dot{m}_{\rm P} = 0,076 \ z^{5/3} \ \dot{Q}_{\rm f}^{1/3} \ [\rm kg/s]$$
 (3.3-13).

TANAKA und YAMANA bereiteten mit ihrer theoretischen Arbeit [114] unter Verwendung der ZUKOSKY-Formel (3.3-12) Experimente vor und bestätigten mit den in [130] beschriebenen 1:1-Versuchen deren Eignung für Atrien; diese Formel ist deshalb auch als TANAKA-Plume bekannt geworden.

MAX und BREIN verwendeten für die Normungsarbeit zu DIN 18232-2 für "kleine" Feuer die ZUKOSKY-Formel mit einer virtuellen Punktquelle im Abstand z_0 vom Brandherd (siehe in [77]) in der Form

$$\dot{m}_{\rm P} = 0,076 \left(z - z_{\rm o}\right)^{5/3} \dot{Q}_{\rm P}^{1/3} \quad [\rm kg/s]$$
 (3.3-14)

mit der Höhe z_0 der virtuellen Quelle über dem Brandherd (negativ mit der Quelle unterhalb)

$$z_{\rm o} = h_{\rm fl} - 0.175 \, \dot{Q}_{\rm P}^{2/5}$$
 [m] (3.3-15),

wobei die Flammenhöhe h_{fl} nach Gleichung (3.3-5) berechnet wurde.

HESKESTAD [56] erweiterte die Theorie von ZUKOSKY, indem er u.a. die Übertemperatur im Plume berücksichtigte. Dies führte zu der Gleichung:

$$\dot{m}_{\rm p} = E \left(\frac{\rho_{\infty}^2 g}{c_{\rm p} T_{\infty}} \right)^{1/3} \times \dot{Q}_{\rm f}^{1/3} (z - z_{\rm o})^{5/3} \times \left[1 + \frac{G \dot{Q}_{\rm P}^{2/3}}{(g^{1/2} c_{\rm p} \rho_{\infty} T_{\infty})^{2/3} (z - z_{\rm o})^{5/3}} \right] \quad [\rm kg/s] \quad (3.3-16)$$

Er empfiehlt E = 0,196 und G = 2,9 für übliche Brandlasten anzusetzen. Setzt man diese Werte und die Zahlenwerte für g und im Übrigen für 20°C ein, so erhält man die aus unterschiedlicher Literatur bekannte Form des HESKESTAD-Plumes (z.B. NFPA 204 von 2002 [91]):

$$\dot{m}_{\rm P} = 0,071 \left(z - z_{\rm o}\right)^{5/3} \dot{Q}_{\rm P}^{1/3} \times \{1 + 0,027 \dot{Q}_{\rm P} \left(z - z_{\rm o}\right)^{-5/3}\}$$
 [kg/s] (3.3-17)

Algebraisch umgeformt lautet diese Gleichung:

$$\dot{m}_{\rm P} = 0.071 (z - z_{\rm o})^{5/3} \dot{Q}_{\rm P}^{1/3} + 0.00192 \dot{Q}_{\rm P}$$
 [kg/s] (3.3-18).

Die Gleichung darf nach [91] für alle Höhen oberhalb der Flammenhöhe ($z > h_{fl}$) angewendet werden; die Höhe z_0 der virtuellen Quelle ist mit

$$z_{0} = 0,083 \dot{Q}_{P}^{2/5} - 1,02D \quad [m]$$
 (3.3-19)

zu berechnen und die Flammenhöhe nach Gleichung (3.3-9) zu bestimmen.

Die beiden genannten Gleichungen für z_0 führen zu unterschiedlichen Zahlenwerten und in der Folge auch zu unterschiedlichen Massenströmen. BSI DD 240 [18] enthält die aus einem älteren NFPA-Guide stammende gekürzte Form der Gleichung (3.3-18):

$$\dot{m}_{\rm P} = 0.071 (z - z_{\rm o})^{5/3} \dot{Q}_{\rm P}^{1/3} \, [{\rm kg/s}]$$
 (3.3-20)-

Eine Angabe zur Bestimmung von z_0 unterbleibt mit der Argumentation, dass die Bestimmung von z_0 bisher nur für Lachenbrände (pool fires) gesichert sei und der Wert für die in Gebäuden vorliegenden Stoffe ohnehin nahezu Null sei. Für Bemessungszwecke wird deshalb die weiter verkürzte Gleichung angegeben, die mit Ausnahname des Faktors *C* mit der Gleichung (3.3-13) nach ZUKOSKY identisch ist:

 $\dot{m}_{\rm P} = C \ z^{5/3} \dot{Q}_{\rm P}^{1/3} \ [\text{kg/s}]$ (3.3-21).

Diese Gleichung führt mit dem Faktor C = 0,071 zu geringeren Massenströmen als die nach ZUKOSKY (Verhältnis 0,931 : 1). BSI DD 240 [18] sieht die Anwendung dieser Gleichung erst für raucharme Schichthöhen $d \ge 10 D$ vor, weil in Großbritannien der THOMAS-Plume für große Feuer eingesetzt werden soll solange d < 10 D erfüllt ist.

Bei den Bemühungen um eine harmonisierte **europäische Normung** wurden für **"kleine" Feuer** die beiden HESKESTAD-Gleichungen (3.3-17) und (3.3-19) in [43] und [88] aufgenommen. Auf die "zugehörige" Gleichung (3.3-9) für die Flammenhöhe wurde dort verzichtet, weil die **Anwendung erst für relativ große Höhen** (d > 10 D) – zuverlässig über der Flammenhöhe – vorgesehen war.

Plume über "kleinem" Feuer, Einfluss von Bauteilen in der Nähe des Brandherdes

Für den Einfluss von nahen Bauteilen bei der Anwendung der Gleichung (3.3-21) nennt BREIN [17] aufgrund einer älteren Ausgabe von NFPA 92B einen Korrekturfaktor (in der Ausgabe 2000 nicht mehr enthalten); siehe Tabelle 3.3-4.

Lage des Brandherdes	Zustrom von Luft über Winkelgrade	k	Korrektur- faktor k ^{2/3}	Faktor <i>C</i> in (3.3-21)
frei im Raum	360°	1	1	0,071
an einer Außenecke	270°	0,75	0,825	0,058
an einer Wand	180°	0,5	0,63	0,044
an einer Innenecke	90°	0,25	0,4	0,028

Tabelle 3.3-4: Einfluss der Lage des Brandherdes auf den Plume-Massenstrom

Mit Rücksicht auf die Begrenzung von Fehlerquellen und zu Gunsten einer leichten Nachprüfbarkeit ist aufgrund obiger Ausführungen die Gleichung nach ZUKOSKY, jedoch mit dem konvektiven Wärmestrom $\dot{Q}_{\rm P}$ und ohne virtuelle Quelle z_0 für Berechnungen des Plumes über einem "kleinen" Feuer (z.B. für $d > 5 \sqrt{A_f}$; vergl. Abschnitt 3.3.1.4 Übergangsbereich …) zweckmäßig:

$$\dot{m}_{\rm p} = 0,076 \ z^{5/3} \ \dot{Q}_{\rm p}^{1/3} \ [\rm kg/s]$$
 (3.3-13).

Diese Gleichung führt zu konservativen (auf der sicheren Seite liegenden) Ergebnissen.

Plume über "kleinem" Feuer, rechteckige und linienförmige Brandherde

Die Gleichung (3.3-21) darf mit dem Faktor C = 0,071 nach [18] auch für rechteckige Brandherde mit einem Seitenverhältnis bis 1:3 angewendet werden. Die charakteristische Brandherdabmessung D entspricht dem Durchmesser eines Kreises gleicher Fläche.

Bei langgezogenen Anordnungen von Brandgut oder Lageranordnungen entsteht ein langer schmaler Plume, der jedoch mit zunehmender Steighöhe in einen kreisförmigen Plume übergeht. Nach NFPA 204 [91] darf deshalb die Plumeformel (3.3-17) bzw. (3.3-18) für eine Steighöhe z bis zur Unterkante der Rauchschicht von mindesten dem Fünffachen³⁸ der größten horizontalen Abmessung des Brandherdes W_s angewendet werden. Unterhalb dieser Höhe $z = 5 W_s$ aber oberhalb der Flammen $z > h_{fl}$ ist der Massenstrom wie folgt zu bestimmen:

$$\dot{m}_{\text{line}} = (5 W_{\text{s}} / z)^{2/3} \times \{ \dot{m}_{\text{p}} \text{ nach } (3.3-18) \}$$
 (3.3-22).

BSI DD240 Part 1 [18] gibt für $h_{fl} < z < 5W_s$ und ein Seitenverhältnis des rechteckigen Brandherdes > 1 : 3 folgende Formel an:

$$\dot{m}_{\text{line}} = 0.21 \, \dot{Q}_{\text{P}}^{1/3} \, W_{\text{s}}^{2/3} \, z \quad [\text{kg/s}]$$
 (3.3-23).

BSI DD240 Part 2 [19] grenzt die Anwendung auf $2W_s < z < 5W_s$ ein. Der Faktor 0,21 führt allerdings zu geringfügig höheren Massenströmen als (3.3-22).

In hohen Atrien wird demnach die Geometrie eines Brandherdes am Boden nahezu ohne Einfluss auf den Massenstrom des Plumes beim Eindringen in eine hoch liegende Rauchschicht sein.

3.3.1.4 Übergangsbereich zwischen "großem" und "kleinem" Feuer

Die Berechnungsformeln für den Massenstrom im Plume über kleinen und großen Feuern gehen nicht stetig ineinander über. Es können sprungartige Änderungen der Massenströme bei geringen Änderungen der Steighöhen auftreten. Um dies zu vermeiden, müssen die Anwendungsgrenzen definiert und Lösungen für den Übergangsbereich gefunden werden.

³⁸ Im angegeben NFPA 204 wird an zwei Stellen das Fünffache und an einer Stelle das Vierfache der größten horizontalen Abmessung als Grenze angegeben.

MAX und BREIN [77] haben bei der Neubearbeitung der DIN 18232-2 Anwendungsgrenzen und einen Übergangsbereich entsprechend Tabelle 3.3-5 definiert. Dies ermöglicht einen gleitenden Übergang der Bemessungswerte vom Geltungsbereich des Plume über großem Feuer zum Plume über kleinem Feuer.

Tabelle 3.3-5:	Anwendungsgrenzen	von	Plume-Formeln	und	Übergangsbereich	nach
	MAX und BREIN [77]					

Anwendungsgrenzen	Berechnung	
rauchfreie Schichthöhen bis zur Flammenhöhe	$d \le h_{\mathrm{fl}}$	Plume-Formel (3.3-10) nach THOMAS-HINKLEY für "großes" Feuer
rauchfreie Schichthöhen zwischen der Flammenhöhe und der zweifachen Flammenhöhe	$h_{ m fl} < d < 2h_{ m fl}$	lineare Interpolation zwischen den Werten beider Plume-Formeln
rauchfreie Schichthöhen mindestens der zweifachen Flammenhöhe	$d \ge 2h_{\mathrm{fl}}$	Plume-Formel (3.3-14) nach ZUKOSKY für "kleines" Feuer

Interpolationsregeln lassen sich allgemeingültig angeben. Mit dem Interpolationsfaktor f^*

$$f^* = \frac{d - z_1}{z_2 - z_1} \tag{3.3-24}$$

erhält man für den Übergangsbereich den aus zwei Plume-Formeln gewichteten Plume-Massenstrom $\dot{m}_{P,1-2}$ zu

$$\dot{m}_{\rm P,1-2} = (1 - f^*) \dot{m}_{\rm P,1} + f^* \cdot \dot{m}_{\rm P,2}$$
(3.3-25),

mit

d Höhe der rauchfreien Schicht,

- $\dot{m}_{\rm P,1}$ Massenstrom nach Plume-Formel "1",
- $\dot{m}_{\rm P,2}$ Massenstrom nach Plume-Formel "2",
- z_1 obere Anwendungsgrenze für Plume-Formel "1",
- z_2 untere Anwendungsgrenze für Plume-Formel "2".
- <u>Beispiel:</u> Für einen kreisrunden Brandherd mit einer spezifischen Brandleistung im Geltungsbereich des Plumes für "großes" Feuer ist der Plume-Massenstrom bis 20 m Steighöhe zu bestimmen.
- <u>Lösung:</u> Für den Plume $m_{P,1}$ über "großem" Feuer wird Gleichung (3.3-10) mit $C_E = 0,188$ bis zur Höhe $z_1 = 3 \times \sqrt{A_f} = 9,5$ m und für den Plume $m_{P,2}$ über "kleinem" Feuer wird Gleichung (3.3-13) ab der Höhe $z_2 = 5 \times \sqrt{A_f} = 15,8$ m angewendet. Die spezifische Brandleistung für den Plume $m_{P,1}$ über "großem" Feuer liegt in den Grenzen 200 kW/m² < \dot{q}_f < 750 kW/m² (s. S. 72). Der Umfang *P* des 10 m² großen Brandherdes beträgt 11,21 m. Für die Interpolation im Übergangsbereich werden

die Gleichungen (3.3-24) und (3.3-25) verwendet. Der konvektive Energieanteil im Plume wird mit $\chi = 0.8$ angesetzt. Das Ergebnis ist in Bild 3.3-4 graphisch wiedergegeben.

Aus den Ergebnissen ist zu folgern, dass die Anwendung unterschiedlicher Plume-Formeln mit einer gemeinsamen oberen bzw. unteren Anwendungsgrenze zu unvertretbaren Unstetigkeiten in der Bemessung führt. Die Verfasser schlagen einen

Übergangsbereich von $z_1 = 3 \times \sqrt{A_f}$ bis $z_2 = 5 \times \sqrt{A_f}$

vor. Er führt zu einem hinreichend stetigen Anstieg des Plume-Massenstromes beim Übergang vom einen Anwendungsbereich zum anderen. Im Bereich sehr hoher spezifischer Brandleistungen gleichen sich die Ergebnisse der beiden Plume-Formeln einander an.

Zur weiteren Veranschaulichung der Anwendung unterschiedlicher Plume-Formeln mit Übergangsbereich zwischen den Anwendungsbereichen beider Formeln dienen die folgenden Bilder.

Bild 3.3-5 zeigt die gleichen Verhältnisse wie das Bild 3.3-4, jedoch für einen Brandherd mit 40 m². Auch hier fächert sich der Plume-Massenstrom beim Verlassen des Anwendungsbereiches der THOMAS-Formel ($m_{P,1}$) entsprechend den verschiedenen spezifischen Brandleistungen auf. Der Übergangsbereich liegt auch hier zwischen $z_1 = 3 \times \sqrt{A_f}$ und $z_2 = 5 \times \sqrt{A_f}$.



Bild 3.3-4: Beispiel für den Plume-Massenstrom über einem runden Brandherd mit 10 m² Fläche im Anwendungsbereich zweier Plume-Formeln



Bild 3.3-5: Beispiel für den Plume-Massenstrom über einem runden Brandherd mit 40 m² Fläche im Anwendungsbereich zweier Plume-Formeln (Übergangsbereich: $z_1 = 3 \times \sqrt{A_f}$ und $z_2 = 5 \times \sqrt{A_f}$)



Bild 3.3-6: Beispiel für den Plume-Massenstrom über einem runden Brandherd mit einer Brandleistung von 12 MW Anwendungsbereich zweier Plume-Formeln (Übergangsbereich: $z_1 = 3 \times \sqrt{A_f}$ und $z_2 = 5 \times \sqrt{A_f}$)

Bild 3.3-6 zeigt den Anstieg des Plume-Massenstromes bei verschiedenen spezifischen Brandleistungen für einen Brandherd mit einer Brandleistung von 12 MW. Im Anwendungsbereich der THOMAS-Formel $(m_{P,1})$ ergibt sich für jede spezifische Brandleistung die zugehörige Brandfläche und damit der eigene Verlauf der Massenstromzunahme mit der Höhe. Im Anwendungsbereich des Plumes über "kleinem" Feuer nach ZUKOSKY $(m_{P,2})$ ergibt sich für alle spezifischen Brandleistungen ein gemeinsamer Verlauf der Massenstromzunahme. Der Übergangsbereich liegt auch hier zwischen $z_1 = 3 \times \sqrt{A_f}$ und $z_2 = 5 \times \sqrt{A_f}$.

Das Bild 3.3-7 unterscheidet sich von Bild 3.3-5 dadurch, dass der Übergangsbereich von der THOMAS-Plume-Formel $(m_{P,1})$ zur ZUKOSKY-Plume-Formel $(m_{P,2})$ in der Höhe der Flammenspitzen (berechnet nach Gleichung (3.3-5)) beginnt und in der doppelten Flammenhöhe endet; dieses Kriterium haben MAX und BREIN bei der Überarbeitung der DIN 18232-2 zugrunde gelegt [77].

Bild 3.3-8 zeigt für ein 40 m² großes Feuer mit einer Brandleistung von 12 MW den Verlauf des Massenstromes nach prEN 12101-5 [43], und zwar mit **mP1** nach Gl. (3.3-10) für den THOMAS-Plume, z_0 nach (3.3-19), **mP2kurz** nach Gl. (3.3-20) für den gekürzten und **mP2lgHesk** nach Gl. (3.3-17) für den vollständigen HESKESTAD-Plume. Ergänzend wurde der in Deutschland gerne benutzte ZUKOSKY-Plume **mP2Zuk** nach Gl. (3.3-13) eingetragen.



Bild 3.3-7: Beispiel für den Plume-Massenstrom über einem runden Brandherd mit 40 m² Fläche im Anwendungsbereich zweier Plume-Formeln (Übergangsbereich: $z_1 = h_{fl}$ und $z_2 = 2 \times h_{fl}$)



Bild 3.3-8: Beispiel für den Plume-Massenstrom nach prEN 12101-5 ohne Übergangsbereich (Erläuterung im Text)

3.3.1.5 Plume-Eigenschaften

Plume-Eigenschaften, zur Massenbilanz des Plume

In der Gleichung (3.1-5) wurde die Massenbilanz des Plume aufgestellt und in Bild 3.1-6 dargestellt:

$$\dot{m}_{\rm E} + \dot{m}_{\rm f} - \dot{m}_{\rm P} = 0 \tag{3.1-5}.$$

In der englischsprachigen Literatur wird dabei die dem Plume zugeführte Masse des Abbrandes als vernachlässigbar bezeichnet³⁹. Was hat es damit auf sich?

Betrachten wir hierzu die durchschnittliche stöchiometrische und auf die Energiefreisetzung bezogene Brandgasmasse nach Gleichung (3.2-18)

$$m_{\rm RG}/Q = 0.368 \, [\rm kg/MJ]$$
 (3.2-18)

und den durchschnittlichen stöchiometrischen und auf die Energiefreisetzung bezogenen Luftbedarf nach Gleichung (3.2-24)

$$L'_{\rm min,tr} / Q = 0.313 \, [\rm kg_{\rm Luft} / MJ]$$
 (3.2-24).

³⁹ Bei HESKESTAD [56] wird der Plume-Massenstrom als Einmisch-Massenstrom bezeichnet während dieser in der Erläuterung als Massenstrom des Plume beschrieben wird, weil der Massenstrom des Abbrandes als vernachlässigbar vorausgesetzt worden war.

Die Differenz $\Delta m/Q = 0,055$ [kg/MJ] muss dem Abbrand entsprechen. Bestimmen wir – wie gebräuchlich – den Abbrand über den Holzgleichwert, so erhalten wir mit H_u nach EUROCODE 1 fast exakt diesen Differenzbetrag zu

$$m_{\rm f} / Q = 1/H_{\rm u} = 0,053$$
 [kg/MJ].

Diese gute Übereinstimmung bekräftigt einerseits die Zulässigkeit, mit den Durchschnittswerten für Brandgas und Luftbedarf zu rechnen und andererseits den Abbrand als Holzgleichwert zu bestimmen. Betrachten wir nun ein Holzfeuer mit einer Brandleistung von z.B. 5 MW, so errechnet sich mit

$$\dot{R} = \dot{m}_{\rm f} = \dot{Q}_{\rm f} / H_{\rm u}$$
 (3.3-26)

(mit H_u für Holz nach EUROCODE 1) ein Abbrand von R = 0,263 [kg/s]. Berechnen wir den Massenstrom des Plumes über diesem Feuer, so beträgt der Massenanteil des Abbrandes in 3 m Höhe über dem Brandherd höchstens 2,5 % und weniger als 1 % in 6 m Höhe. Wir folgen deshalb der Empfehlung in der englischsprachigen Literatur und vernachlässigen den Massenanteil des Abbrandes:

$$\dot{m}_{\rm f} / \dot{m}_{\rm P} \approx 0 \tag{3.3-27}$$

Zu der Frage, ob der Massenstrom des Abbrandes vernachlässigt werden könne, äußerten sich MORGAN und HANSELL [83] aufgrund einer Leserzuschrift von Frau LAW. Die Vernachlässigbarkeit wurde praktisch für alle Brandlast gesteuerten Brände – Brände in der Pre-flash-over-Phase – bestätigt (in Übereinstimmung mit der oben getroffenen Aussage).

Plume-Eigenschaften, zur Energiebilanz des Plume

In der Gleichung (3.1-6) wurde die Energiebilanz des Plume aufgestellt und in Bild 3.1-7 dargestellt:

$$\dot{Q}_{\rm E} + \dot{Q}_{\rm f} - \dot{Q}_{\rm P,Vr} - \dot{Q}_{\rm P} = 0$$
 (3.1-6)

Die mit der eingemischten Luft eingebrachte Energie $\dot{Q}_{\rm E}$ ist wegen des für 0°C festgelegten Energie-Nullpunktes im Allgemeinen vernachlässigbar. Die Brandleistung $\dot{Q}_{\rm f}$ wird dem Plume zugeführt. Durch Abstrahlungsverluste $\dot{Q}_{\rm P,Vr}$, die im Wesentlichen im Flammenbereich des Plumes auftreten, wird der Energieinhalt des Plumes reduziert auf den konvektiven Anteil $\dot{Q}_{\rm P}$, der in die Rauchschicht eindringt. Nach NFPA 204 [91] geben "flammende" Feuer zwischen 0 und 60 % der freigesetzten Energie in Form von Strahlung an die Umgebung ab. Kleinste Werte treten bei kleinen Methanflammen und größte Werte bei großen Polystyrene-Bränden auf. Für einen weiten Bereich von Schadensfeuern mit üblichen Anteilen brennbarer Stoffe ist nach NFPA 204 für die Flammenstrahlung mit 35 % zu rechnen (konvektiver Anteil $\chi = 0,65$); an anderer Stelle in der gleichen Unterlage werden 30 % für Strahlung angegeben. Im BSI DD 240 [18] wird die Energie im Plume zu $\frac{2}{3}$ der im Brandherd freigesetzten Energie angesetzt (konvektiver Anteil $\chi = 0,67$). Der prEN 12101-5 [43] gibt für "kleine" und für "große" Feuer einheitlich einen konvektiven Anteil $\chi = 0.8$ an. Dieser Anteil ist auch bei der Erarbeitung der DIN 18232-2 und DIN 18232-5 angesetzt worden.

Wir verwenden für den konvektiven Energiestrom im Plume

$$\dot{Q}_{\rm P} = \chi \cdot \dot{Q}_{\rm f} \tag{3.3-28}$$

und geben χ in den Grenzen von 0,65 bis 0,8 in jedem Anwendungsfall an.

Plume-Eigenschaften, Temperaturen im Plume

Die Temperaturen im Plume sind sehr inhomogen. Von der umgebenden Luft wachsen die Temperaturen bis zur Plume-Achse an. Die höchsten Werte treten dort am Oberrand der ständigen Flammen auf und nehmen bis zum Eindringen in die Rauchschicht ab. (Auf die Veränderung der Plume-Temperatur innerhalb der Rauchschicht wird in NFPA 204 [91] im Anhang B441 eingegangen.)

> Für die Beurteilung von Bauteilen ist die Kenntnis der Plume-Temperatur von Bedeutung.

Die mittlere absolute Plume-Temperatur $T_{p}(z)$ in der Höhe z erhält man aus der Energiebilanz zu

$$T_{\rm p}(z) = \frac{\dot{Q}_{\rm p}}{\dot{m}_{\rm p}(z) \cdot c_{\rm p}} + T_{\infty} \ [^{\circ}{\rm C}]$$
(3.3-29).

Setzt man in diese Gleichung für $\dot{m}_{\rm p}(z)$ den ZUKOSKY-Plume nach Gleichung (3.3-13) ein, so erhält man für die mittlere absolute Plume-Temperatur $T_{\rm p}(z)$ oberhalb der Flammenzone (mit dem konvektiven Anteil $\dot{Q}_{\rm p}$

$$T_{\rm P}(z) = T_{\infty} \cdot \left[1 + 0.043 \cdot \left(\frac{z}{\dot{Q}_{\rm P}^{0.4}} \right)^{-5/3} \right] \quad [{\rm K}]$$
(3.3-30).

Für die Achstemperatur des Plume erhält man aus der Formel (18) des NFPA 92B [90] nach Umstellung auf SI-Einheiten (der Faktor 9,1 in der Originalformel wird zu 10,3 für SI-Einheiten)

$$T_{\rm P,Achse}(z) = T_{\infty} \cdot \left[1 + 0.096 \cdot \left(\frac{z}{\dot{Q}_{\rm f}^{0.4}}\right)^{-5/3}\right]$$
 [K] (3.3-31).

Die Achstemperatur und die mittlere Temperatur des Plumes unterscheiden sich durch einen Faktor und den anzusetzenden Energiestrom (total bzw. nur konvektiv) in den beiden vorgenannten Gleichungen. Für alle drei Bereiche eines Plume – ständige Flammenzone, intermittierende Flammen und Auftriebsplume – gaben TANAKA und YAMANA einen mittleren Temperaturverlauf für einen Plume in Abhängigkeit von $z/\dot{Q}_{\rm f}^{0,4}$ an, für den JOHN [66] folgende algebraische Ausdrücke angab:

Abszisse =
$$z / \dot{Q}_{\rm f}^{0,4}$$
 (3.3-32)

$$\theta_{\rm p} = 970^{\circ} {\rm C} ~[{\rm K}]$$
 für *Abszisse* $\le 0,067$ (3.3-33)

$$\mathcal{G}_{\rm p} = 10^{1,9-0,9257 * \log_{10}(Abszisse)} \quad [{\rm K}] \qquad \text{für } 0,067 < Abszisse < 0,15 \qquad (3.3-34)$$

$$\mathcal{G}_{\rm P} = 10^{1,27-1,691 * \log_{10}(Abszisse)}$$
 [K] für $0,15 \le Abszisse$ (3.3-35)

In Bild 3.3-9 ist diese Drei-Bereichs-Plume-Temperatur und die Plume-Achstemperatur nach Gleichung (3.3-31) eingetragen. Ebenfalls für drei Bereiche sind im BSI DD 240 [18] Formeln angegeben; sie führen – ebenfalls mit der Brandleistung – zu ähnlichen Werten wie die Drei-Bereichs-Plume-Temperatur nach TANAKA. Die Gleichung (3.3-30) führt zu etwas niedrigeren mittleren Plume-Temperaturen als nach TANAKA.



Bild 3.3-9: Mittlere Plume-Temperatur nach TANAKA und YAMANA und Plume-Achstemperatur nach NFPA 92B

Plume-Eigenschaften, Abmessungen des Plume

Der Durchmesser eines Plume D_{Plume} wächst infolge der Lufteinmischung etwa linear mit der Höhe z an:

$$D_{\text{Plume}} = K_{\text{D}} \cdot z$$

(3.3-36)

Nach NFPA 92B (Ausgabe 2000) [90] ist K_D eine Durchmesser-Faktor, der zwischen 0,25 und 0,5 variieren kann. K_D ist so zu wählen, dass die Berechnungen konservativ durchgeführt werden:

- 1) $K_D = 0,50$ führt zu einer konservativen Betrachtung hinsichtlich Wandkontakt des Plume und
- 2) $K_D = 0.25$ zu einer konservativen Betrachtung hinsichtlich Strahldetektoren zur Erkennung von Plumes.

Der Öffnungswinkel α des Plume ist aus der trigonometrischen Beziehung

$$\alpha = 2 \cdot \arctan(K_{\rm D}/2) \tag{3.3-37}$$

zu bestimmen. Er beträgt für Fall 1) 28° und für Fall 2) 14°.

Zu Fall 1) (Bedeutung des Öffnungswinkels) führt BREIN in [17] aus: "Wenn die Aufstiegshöhe hinreichend groß und das Atrium hinreichend schmal ist, dann kommen die Rauchgase in Kontakt mit allen Wänden. Bei dieser Aufstiegshöhe liegt dann die Rauchschichtunterkante. Oberhalb dieser Aufstiegshöhe erfolgt aufgrund der generellen Modellvorstellung also keine weitere Einsaugung von Luft in das Rauchgas (sofern die Begrenzungswände keine Öffnungen aufweisen und die Lage der neutralen Druckzone berücksichtigt wurde."

Plume-Eigenschaften, maximale Steighöhe des Plume

Die maximale Steighöhe eines Plume wird durch die mit der Höhe infolge Einmischung schwindende Auftriebswirkung bestimmt. Nach unterschiedlichen Quellen wird die maximale Steighöhe beim Erreichen einer Temperaturdifferenz von nur noch 2 K bis 5 K zwischen mittlerer Plumetemperatur und Umgebung erreicht; vergl. z.B. John (1989) [67].

Bei isothermer Umgebung, d.h. bei konstanter Umgebungstemperatur über der ganzen Höhe, ist die maximale Steighöhe aus der Gleichung (3.3-30) oder (3.3-35) zu bestimmen; den konservativen Wert liefert Gleichung (3.3-30). Setzt man in diese Gleichung

$$T_{\rm P}(z) = T_{\infty} \cdot \left[1 + 0.043 \cdot \left(\frac{z}{\dot{Q}_{\rm P}^{0.4}} \right)^{-5/3} \right] \quad [{\rm K}]$$
(3.3-30).

für die Umgebungstemperatur $T_{\infty} = 293$ [K] und für die Mindesttemperaturdifferenz $\Delta \vartheta = 5$ [K] ein, so erhält man direkt für die maximale Steighöhe die Gleichung

$$z_{\rm max} = 1,75 \cdot \dot{Q}_{\rm P}^{0,4}$$
 [m] (3.3-38).

mit $\dot{Q}_{\rm P}$ in [kW]. Bild 3.3-10 zeigt die Auswertung dieser Beziehung. KLOTE und MILKE [73] geben eine allgemeingültige Formel an:

$$z_{\max} = \left(\frac{14}{\Delta T_{\min}} - 0,0254\right)^{3/5} \dot{Q}_{\rm p}^{0,4} \quad [{\rm m}\}$$
(3.3-39).

Sie geben sich mit 2 K Temperaturdifferenz zufrieden und erzielen damit um den Faktor 1,8 größere Steighöhen; die Ergebnisse unterscheiden sich um den Faktor 10,3/9,1, der von der Einheiten-Umstellung herrührt (s. Erläuterung bei Gleichung (3.3-30).



Bild 3.3-10: Maximale Steighöhe von Rauchgas-Plumes in isothermer Umgebung

Bei **Temperaturschichtung mit Inversion**, das heißt mit der Höhe zunehmender Temperatur, wirkt die erhöhte Umgebungstemperatur dem Auftrieb entgegen. Die Rauchgase werden sich in hohen Atrien weit unterhalb des Daches "einschichten", wenn diese Situation bei der Planung unberücksichtigt bleibt – möglicherweise übersehen wird.

Besonders anfällig für Warmluftpolster (Inversionen) sind Glasaufbauten, die die angrenzenden Gebäudeteile deutlich überragen. Ein Temperaturanstieg um 20 [K] und mehr gegenüber dem unteren Bereich ist oberhalb der angrenzenden Gebäudeteile keine Seltenheit. Die Übertemperatur des Plume $\Delta T_P = T_P(z) - T_{\infty}$ nach Gleichung (3.3-30) muss mindestens ca. 5 K über dem Temperatursprung in der Inversionsschicht liegen, um eine Einschichtung des Rauchgases am Unterrand der Inversionsschicht zu vermeiden.

HESKESTAD [56] gibt Hinweise zur Behandlung von Plumes in einer Umgebung mit linear mit der Höhe ansteigender Temperatur, die auf Untersuchungen in Temperatur-geschichteten Salzlösungen beruhen. Nach einer Überprüfung und numerischen Auswertung der Angaben von HESKESTAD und der als gering eingeschätzten Bedeutung solcher Temperaturverteilungen empfehlen die Verfasser nicht die Anwendung der Literaturstelle.

3.3.2 Rauchgasströmung aus einer Öffnung des Raumes heraus – Fenster-Plume

Unter Fenster-Plume ist der aus senkrechten Öffnungen von Räumen (Fenstern, Türen, temporär offenen Wänden) austretende Brandgas-Massenstrom zu verstehen. Es ist zu unterscheiden zwischen einem Raumbrand in der Pre-flash-over-Phase und einem Raumbrand in der Phase des lüftungsgesteuerten Vollbrandes. Bild 3.3-11 zeigt aus einem Fenster austretende Brandgas-Plumes, die an einer Fassade anliegend in einen hohen Gebäudebereich (z.B. Atrium) abströmen. Im linken Teil des Bildes ist die Pre-flash-over-Phase und im rechten Teil die Vollbrandphase dargestellt. Die verwendeten Bezeichnungen werden an den entsprechenden Stellen der folgenden Ausführungen erläutert.

Je nach Vorgehensweise in der verfügbaren Literatur werden Plume-Massenströme für jeden Einzelschritt, nämlich Fenster-Plume, Balkon-Plume und Überström- bzw. Spill-Plume, wie dies in der britischen Literatur bevorzugt wird, oder für zusammengefasste Schritte, wie dies bevorzugt in der US-amerikanischen Literatur erfolgt, angegeben.



Bild 3.3-11: Fenster-Plume und anschließend an der Fassade anliegender Überström-Plume (Spill-Plume), links: in der Pre-flash-over-Phase, rechts: bei ventilationsgesteuertem Vollbrand

3.3.2.1 Fenster-Plume in der Pre-flash-over-Phase

In der Pre-flash-over-Phase bildet sich – wie im Abschnitt 3.1 schon ausgeführt – eine deutlich ausgeprägte Rauchschicht unter der Raumdecke aus, während unterhalb eine raucharme Schicht zu erwarten ist. Für den Fenster-Plume in der Pre-flash-over-Phase wird deshalb auch das Zonenmodell mit der Massenbilanz nach Bild 3.1-6 und mit der Energiebilanz nach Bild 3.1-7 angewendet. Der Austritt der Rauchgase erfolgt jedoch nicht an bestimmten Abzugsstellen sondern im oberen Bereich auf der ganzen Breite der Raumöffnung. Die Dicke der Rauchschicht in der Raumöffnung bzw. die Unterkante der Rauchschicht wird sich – im vorausgesetzten stationären Bemessungsfall – so einstellen, dass der über dem Brandherd in die Rauchschicht eintretende Plume-Massenstrom $\dot{m}_{\rm p}$ genau so groß ist wie der aus der Raumöffnung austretende Massenstrom $\dot{m}_{\rm w}$.

HANSELL und MORGAN [53] unterscheiden drei geometrisch verschiedene Fälle von Raumöffnungen. Bild 3.3-12 zeigt einen Raum, an dessen Öffnung eine vernachlässigbar geringe Unebenheit an der Decke existiert. Einen hohen Unterzug (engl.: downstand) in der Raumöffnung zeigt Bild 3.3-13. In Bild 3.3-14 schließt an einem Unterzug eine abgehängte Unterdecke flach an den Unterzug an. Die Frontalansicht eines Brandgas-Plumes an einer Raumöffnung zeigt Bild 3.3-15.

In der zitierten Arbeit wird eine Art Durchflusskoeffizient C_d als Funktion der Schichtdicke D_W und der Unterzugshöhe D_d definiert⁴⁰. Die angegebene Formel für C_d wurde von MORGAN et.al. [88] für praktische Anwendungen entsprechend Tabelle 3.3-6 durch drei feste Werte ersetzt.

Cd	Bedingung	Erläuterung
1,0	$0 \le D_{\rm d} < 0.25 D_{\rm W}$	Öffnungen mit vernachlässigbaren Unterzugshöhen
0,8	$0,25D_{\rm W} \le D_{\rm d} \le 2D_{\rm W}$	
0,65	$2D_{\rm W} < D_{\rm d}$	hohe Unterzugshöhen

Tabelle 3.3-6: Durchflusskoeffizient C_d für breite Raumöffnungen nach [88]

⁴⁰ Zu der Wirkung von seitlichen Strömungshindernissen in der Raumöffnung wird nichts ausgesagt. Die Autoren haben diesen Einfluss offenbar als vernachlässigbar klein angesehen, weil die angegebenen Formeln ursprünglich für breite offenstehende Geschäfts-Fronten entwickelt worden waren (1993 durch HANSELL im Rahmen einer Dissertation an der SOUTH BANK UNIVERSITY LONDON).



Bild 3.3-12: Brandgas-Plume an einer Raumöffnung mit der Höhe *h* und einem Balkon mit der Breite *B*, mit nahezu glatt durchgehender Decke



Bild 3.3-13: Brandgas-Plume an einer Raumöffnung mit der Höhe h und einem Balkon mit der Breite B, mit Unterzug mit der Höhe D_d



Bild 3.3-14: Brandgas-Plume an einer Raumöffnung mit der Höhe h und einem Balkon mit der Breite B, mit Unterzug mit der Höhe D_d und anschließender Unterdecke



Bild 3.3-15: Frontalansicht eines Brandgas-Plumes an einer Raumöffnung mit der Höhe *h* und mit der Breite *W* unterhalb eines Balkons





Nach den genannten Quellen berechnet sich der durch die Raumöffnung strömende Massenstrom mit einer Formel des Typs für "großes" Feuer zu

$$\dot{m}_{\rm W} = C_{\rm E} P h^{3/2} \frac{W}{\left[W^{2/3} + \frac{1}{C_{\rm d}} \left(\frac{C_{\rm E} P}{2}\right)^{2/3}\right]^{3/2}}$$
(3.3-41)

mit $C_E = 0,188$ für große Räume bzw. $C_E = 0,337$ für zellenartige Räume (siehe Tabelle 3.3-1).

Die Rauchschichtdicke D_W in der Öffnung berechnet sich zu

$$D_{\rm W} = \frac{1}{C_{\rm d}} \left[\frac{\dot{m}_{\rm W}}{2 \,\rm W} \right]^{2/3} \tag{3.3-42}.$$

In beiden vorgenannten Gleichungen sind für den Koeffizienten C_d die Werte der Tabelle 3.3-6 maßgebend. Zweckmäßigerweise beginnt man mit der Annahme $C_d = 0,65$ und überprüft das Ergebnis auf Einhaltung der Bedingungen nach der gleichen Tabelle, um die Rechnung gegebenenfalls mit einem höheren Wert für C_d erneut durchzuführen.

Der errechnete Massenstrom $\dot{m}_{\rm w}$ muss bei Kontrollrechnungen identisch sein mit dem Massenstrom für "großes" Feuer mit der aktuellen Steighöhe $z = h \cdot D_{\rm W}$ nach Gleichung (3.3-10)

$$\dot{m}_{\rm W} = C_{\rm E} P \left(h - D_{\rm W} \right)^{3/2}$$
 (3.3-43).

Konsequenterweise unterliegt die Gleichung (3.3-41) den gleichen Anwendungsgrenzen nach Tabelle 3.3-1 bzw. nach Tabelle 3.3-3 wie die Gleichung (3.3-10). Für die wohl seltenen Anwendungsfälle außerhalb der Grenzen nach Tabelle 3.3-3 wird empfohlen, entweder

- die weiter gesteckten Anwendungsgrenzen nach prEN 12101-5 aus der Tabelle
 3.3-1 zuzulassen, oder
- Formeln zu verwenden, die dem Typ für "kleines" Feuer entsprechen.

BSI DD 240-1 [18] gibt für den Plume-Massenstrom $\dot{m}_{\rm w}$ in einer Öffnung mit der Breite W und der Öffnungsoberkante h ab Brandherd eine Formel des Typs **"kleines" Feuer mit linienförmiger Quelle** an:

$$\dot{m}_{\rm W} = 0.09 \, \dot{Q}_{\rm P}^{1/3} \, W^{2/3} \, h$$
 (3.3-44).

 $\dot{Q}_{\rm P}$ ist dabei der konvektive Anteil der vom Feuer freigesetzten Leistung (Brandleistung) in kW. Im BSI DD 240-2 [19] wird die Anwendung dieser Formel ausdrücklich auf Brände in der Pre-flash-over-Phase beschränkt.

Weitere Formeln, die unmittelbar vom Energieaustritt aus Raumöffnungen zum Massenstrom des Überlauf-Plume (Spill-Plume) führen, sind im Abschnitt 3.3.4 angegeben.

3.3.2.2 Fenster-Plume in der Vollbrand-Phase

In einem Raum ist der Vollbrand zu unterstellen, sobald die Berechnung für die Pre-flashover-Phase eine Rauchschichttemperatur von mehr als 550°C ergibt. Die Belüftungsverhältnisse in einem Raum bestimmen die Intensität des Brandes; man spricht vom ventilationsgesteuerten Brand. Es treten an der Raumöffnung teilweise unvollständig verbrannte Rauchgase aus, die an der Öffnung zu Flammenbildung führen. Etwa in den oberen ²/₃ der Raumöffnung strömen heiße Brandgase mit Flammenbildung aus, während im unteren Drittel die Verbrennungsluft in den Raum einströmt. Bild 3.3-11 zeigt diese Verhältnisse.

Die US-amerikanische Richtlinie NFPA 92B [90] behandelt die aus Räumen in der Preflash-over-Phase und im Vollbrand austretenden Brandgase in gleicher Weise; vergl. Abschnitt 3.3.4. Auch Berechnungsformeln englischen Ursprungs sind geeignet, den bei Vollbrand aus Fenstern austretenden konvektiven Energiestrom als neue Brandquelle an der Fassade zu betrachten; vergl. hierzu auch die Angaben zum Vollbrand in den Zeilen 1.3 und 2.3 der Tabelle 3.2-16: Bemessungsbrände nach MORGAN et. al. [88].

Für die Berechnung der notwendigen Entrauchungseinrichtungen in einem angrenzenden Bereich ist eine Öffnung an einem im Vollbrand stehenden Raum als Brandherd an der Außenfassade anzusehen.

Bei der Beurteilung des Verhaltens von Konstruktionsteilen (tragende Stahlkonstruktionen, Verglasungen), die von Brandgasen aus einem im Vollbrand stehenden Raum beaufschlagt werden, bedarf es einer ausführlicheren Untersuchung. Die vorliegenden Forschungserkenntnisse zum Brandgasaustritt aus Öffnungen von Räumen, die im Vollbrand stehen, reichten zur Normungsreife. Der EUROCODE 1 [36] enthält in seinem informativen Anhang C ein vereinfachtes Berechnungsverfahren für die Brandfall-Bemessung: "Bei außenliegenden Bauteilen zu berücksichtigende thermische Einwirkungen". Dieses Verfahren ist auch für Räume mit mehreren Fenstern anwendbar. Die Lüftungsbedingungen und der Energieverzehr im Rauminnern werden durch den "Öffnungsfaktor des Brandabschnittes" $A_w \sqrt{H_w} / A_t$ berücksichtigt, in dem die totale innere Oberfläche A_t die Wärme absorbierende Oberfläche darstellt. Der gleiche Ausdruck – in Gleichung (1.2-2) – wurde 1974 [93] "Lüftungsfaktor genannt". Das Rechenverfahren enthält Anweisungen zur Berücksichtigung von Wind (wie für teilweise offene Atrien oder Einkaufsstraßen von Bedeutung) sowie von Zwangs-Be- und Entlüftung (wie z.B. für Atrien mit maschineller Unterdruckhaltung von Bedeutung; engl.: depressurization). Der EUROCODE 1 ist bisher in Deutschland nicht als Technische Baubestimmung vorgesehen; die Anwendung anderer EUROCODES ist jedoch ohne EUROCODE 1 nur beschränkt möglich.

Der EUROCODE 3, inzwischen in den meisten Bundesländern als TECHNISCHE BAUBESTIMMUNG eingeführt, enthält folgende für aus Fenstern austretende Plumes relevante Abschnitte:
- 4.2.5 Entwicklung der Stahltemperatur
- 4.2.5.1 Ungeschützte Stahlkonstruktionen im Gebäudeinnern
- 4.2.5.4 Stahlkonstruktionen an der Gebäudeaußenseite
- 4.3 Allgemeine Berechnungsverfahren
- Anhang C (normativ): Wärmeübertragung auf außenliegende Bauteile

In dem zugehörigen **nationalen Anwendungsdokument** (NAD), das ist der DIN-Fachbericht 93 [38], werden Regelungen getroffen, um den EUROCODE 3 konform mit deutschem Baurecht anwenden zu können. Damit wird der Abschnitt "4.2.5.4 Stahlkonstruktionen an der Gebäudeaußenseite" außer Kraft gesetzt. Durch die Überbauung von Einkaufsstraßen oder die Errichtung von Atrien werden diese Bereiche sicherlich als "innere Bereiche baulicher Anlagen" zu beurteilen sein; damit "greift" der Abschnitt "4.2.5.1 Ungeschützte Stahlkonstruktionen im Gebäudeinnern". Als Rechengrundlage wird auf den EUROCODE 1 verwiesen.

Das NAD legt hierzu wiederum fest, dass allgemeine Rechenverfahren und die Anhänge zum EUROCODE 3 nur nach Abstimmung mit der Bauaufsichtsbehörde angewendet werden dürfen. Außerdem sind Nachweise von einem hierfür qualifizierten Prüfingenieur zu überprüfen.

Es ist festzustellen, dass bei der Abfassung des NAD wohl bedacht worden war, die EUROCODES für **ungeschützte Stahlkonstruktionen** in Sonderbauten, wie Einkaufsstraßen oder Atrien, anwendbar zu machen.

Bezüglich des Verhaltens von Verglasungen, die im Brandfall von Brandgasen beaufschlagt werden können, existiert nach unserer Kenntnis bisher nur in den USA ein "Werkzeug" für den Planer. Dort wurde ein Computer-Programm zur Prognose von Glasbruch unter Brandeinwirkung entwickelt. Es trägt die Bezeichnung BREAK1 und kann kostenlos aus dem Internet unter der Adresse

http://www.bfrl.nist.gov/866/fmabbs.html

herunter geladen werden; die Beschreibung von BREAK1 im Internet ist in der Fußnote⁴¹ wiedergegeben. Im vorliegenden Bericht wird auf das Programm nicht eingegangen.

⁴¹ <u>BREAK 1</u> (Berkeley Algorithm for Breaking Window Glass in a Compartment Fire) is a program which calculates the temperature history of a glass window exposed to user described fire conditions. The calculations are stopped when the glass breaks. The inputs required are the glass thermal conductivity, thermal diffusivity, absorption length, breaking stress, Young's modulus, thermal coefficient of linear expansion, thickness, emissivity, shading thickness, half-width of window, the ambient temperature, numerical parameters and the time histories of flame radiation from the fire, hot layer temperature and emissivity, and heat transfer coefficients. The outputs are temperature history of the glass normal to the glass surface, and the window breakage time. BREAKI was written in FORTRAN by A.A. Joshi and P.J. Pagni, Department of Mechanical Engineering, University of California at Berkeley supported by a grant from the National Institute of Standards and Technology.

3.3.3 Rauchgasströmung unter Vorsprüngen und Balkonen – Balkon-Plume

Aus Raumöffnungen austretende Brandgase strömen unter Vorsprüngen und Balkonen (mit der Abmessung *B*) meist in Richtung des Vorsprunges in höhere Gebäudebereiche ab (**Querströmung**); vergl. hierzu Bild 3.3-12 bis Bild 3.3-15.

HANSELL und MORGAN [53] beschreiben auch die Brandgasströmung in Längsrichtung unter Vorsprüngen und Balkonen, um die Brandgase nicht in hohe Gebäudebereiche sondern gezielt an anderen Stellen abzuleiten. Sie geben Bemessungshinweise auch für Fälle an, in denen in Strömungsrichtung Hindernisse – wie Rohrleitungen und Unterzüge – vorhanden sind (Längsströmung).

Für die Querströmung mit Höhenversatz (with downstand) geben HANSELL und MORGAN [53] sowie MORGAN et.al. [88] eine Verdoppelung des Rauchgasmassenstromes

$$\dot{m}_{\rm B} = 2 \cdot \dot{m}_{\rm W} \tag{3.3-45}$$

von der Raumöffnung bis unter die Balkonunterseite an. Dieser Massenstrom $\dot{m}_{\rm B}$ wird im nächsten Abschnitt als Eingangsgröße für den Überström-Plume (Spill-Plume) in dem von MORGAN et.al. [88] beschriebenen Berechnungsverfahren verwendet.

Die Dicke D_B der strömenden Rauchgasschicht unter dem Balkon errechnet sich zu

$$D_{\rm B} = \frac{0.36}{C_{\rm d}} \left[\frac{\dot{m}_{\rm B} T_{\rm B}}{\theta_{\rm B}^{1/2} L T_{\rm \infty}^{1/2}} \right]^{2/3}$$
(3.3-46)

mit $C_d = 1$ wenn kein Unterzug quer zur Strömungsrichtung vorhanden ist und mit $C_d = 0,6$ wenn ein großer Unterzug quer zur Strömungsrichtung vorhanden ist.

In der Gleichung bedeuten $T_{\rm B}$ die absolute Temperatur der Rauchschicht unter dem Balkon und $\theta_{\rm B}$ deren Übertemperatur gegenüber der Umgebungstemperatur, die Länge *L* entspricht der Breite der strömenden Rauchschicht (z.B. Deckenbreite oder mittels Rauchschürzen begrenzte Rauchschichtbreite); vergl. hierzu Bild 3.3-15 und Bild 3.3-16.

3.3.4 Überström-Plume oder Spill-Plume

Überström-Plumes (engl.: spill plume) bilden sich von Überströmkanten ausgehend aus. Brandgase, die aus Wandöffnungen austreten oder unter Balkonen entlang strömen, lenken an den Öffnungsunterzügen oder an Balkonkanten – den Überströmkanten – in die senkrechte Strömungsrichtung um. Bei dieser linienförmigen Umlenkung mischt sich viel Luft aus der Umgebung entlang einer Linie in den Brandgasmassenstrom ein, sodass in der Modellvorstellung der Spill-Plume an der Überströmkante seinen linienförmigen Ursprung nimmt. Nach MORGAN et.al. [88] treffen alle Theorien über Linien-Plumes für Plumes zu, die im freien Raum aufsteigen können und in der Umgebung einheitliche Umgebungstemperatur herrscht. Einige der Theorien konnten modifiziert werden, um näherungsweise an einer Seite an Wandflächen anliegende Plumes (eng.: adhered plumes) zu beschreiben. Nach MORGAN et.al. bildet sich in großflächigen Rauchreservoirs – wie sie in großen Atrien häufig vorliegen – kein scharfer Temperatursprung zwischen raucharmer Schicht und Rauchschicht aus. Für die Anwendung der in Großbritannien entwickelten Rechenverfahren unterscheidet man deshalb die Unterkante der mit Verbrennungsprodukten beladenen sichtbaren Rauchschicht und die effektive Schichtunterkante, die den Temperaturanstieg von der Umgebung zur Rauchschicht kennzeichnet; siehe hierzu Bild 3.3-17. Diesem Umstand wird dadurch Rechnung getragen, dass die Steighöhe z_{Spill} des Plumes (gemessen ab Überströmkante) **in weit ausgedehnten Rauchreservoirs (Rauchabschnitten)** korrigiert wird zu $z_{\text{Spill,eff}}$ (mit d_1 = Dicke der sichtbaren Schicht und A_{Res} = Grundfläche des Rauchreservoirs).

An Stelle von $z_{\text{Spill}} = H - d_1$ ist für $d_1 < 0.67 \sqrt{A_{\text{Res}}}$

$$z_{\text{Spill,eff}} = H - 1,26 d_1 \text{ [m]}$$
 (3.3-47)

zu verwenden. Für $z_{\text{Spill,eff}} < 0,75$ m entfällt die Korrektur.



Bild 3.3-17: Effektive Steighöhe z_{Spill} in großräumigen Rauchreservoirs

In Großbritannien (UK) wurden vier Verfahren zur Berechnung der Einmischung in Überström-Plumes (Spill-Plumes) entwickelt, die alle auf den gleichen relativ wenigen Versuchsdaten basieren. Sie führen nach MORGAN et.al. [88] auf "einigermaßen enge Übereinstimmung" mit den verfügbaren Versuchsdaten.

Alle derzeit bestehenden **Methoden** sehen MORGAN et.al. [88] als **vorläufig** an und hoffen in naher Zukunft mit mehr Forschungsergebnissen eine bessere Absicherung der Verfahren zu ermöglichen. Die Methode a) des BRE bedient sich komplizierterer Algorithmen als die bekannten Plume-Formeln für "großes" oder "kleines" Feuer. Die Methode b) von POREH et.al. benutzt zwar die Energie in der Potenz "¹/₃", jedoch nur vertikale Längen in der Potenz "1". Die Methoden c) von THOMAS und d) von Thomas et.al. verwenden, wie für linienförmige Plumes über "kleinem" Feuer typisch, die Energie in der Potenz "¹/₃", die vertikale Länge in der Potenz "³/₃" und die waagrechte Länge in der Potenz "²/₃", sowie eine Verschiebung des Ursprunges des Plumes in eine virtuelle Quelle unterhalb der Umströmkante.

	freie Plumes				
Bezeichnung der Methode nach MORGAN et.al. [88]	$\begin{vmatrix} \text{große} \\ \text{reser} \\ d_1 < 0, 0 \\ z_{\text{Spill}} < 3 \text{ m} \end{vmatrix}$	Rauch- rvoirs $57 \sqrt{A_{\text{Res}}}$ $z_{\text{Spill}} > 3 \text{ m}$	kleine Rauchre- servoirs $d_1 >$ $0,67 \sqrt{A_{Res}}$	anliegende Plumes	Bedingungen Bemerkungen
a) BRE-Methode 1994	*	÷.	+		Rauchschichttem- peratur < 350°C
b) POREH et.al. 1998	*	*			vorher berechnen: Massenstrom und Schichtdicke unter dem Balkon; ohne Einmischvor- gang an den freien Plume-Enden
c) THOMAS 1987	*				vorher berechnen: Massenstrom und Schichtdicke unter dem Balkon; mit Einmischvor- gang an den freien Plume-Enden
d) THOMAS et.al. 1998		*			vorher berechnen: Massenstrom unter dem Balkon; liefert die besten Er- gebnisse in der Nähe der Überströmkante

T.L.U. 2 2 7.	A manual and the sector of the	3 A TITZ	N	D I	C	
1 abelle 5.5-/:	Anwendbarkeit	der 4 UN	-ivietnoden	zur Berecnnu	ing von S	pill-Plumes

Erläuterung der Symbole in der Tabelle: * anwendbar, + anwendbar und empfohlen, -- nicht anwendbar

Folgt man den Empfehlungen von MORGAN et.al. entsprechend den Angaben in der Tabelle 3.3-7, so könnte kaum ein Überström-Plume ohne die BRE-Methode berechnet werden. Die BRE-Methode ist für die von uns angestrebten übersichtlichen Tabellenkalkulationen jedoch nicht zu empfehlen.

Wir folgen deshalb den Empfehlungen, für freie Überström-Plumes in großen Rauchabschnitten die Methoden c) und d) anzuwenden und weiter der Empfehlung von MORGAN et.al. [88], deren zahlreiche Ergebnisse aus Beispielrechnungen mittels BRE-Methode mit freien und mit anliegenden Plumes für Bemessungszwecke zu verwenden.

In Bild 3.3-18 sind von MORGAN et.al. [88] mit der BRE-Methode gewonnene Rechenergebnisse enthalten. Es handelt sich bei dem ausgewählten Beispiel um Brände in gesprinklerten Großraumbüros, deren Brandgase in ein Atrium abströmen, und zwar im linken Teilbild als freier und im rechten Teilbild als an der Fassade anliegender Überström-Plume. Der zugrunde gelegte Bemessungsbrand entspricht den Angaben in Tabelle 3.2-16, Zeile 2.1. Bei diesem Brand strömen mit dem Brandgas 1000 kW konvektive Wärme in das Atrium ab. Der Parameter "W" bezeichnet die Überströmlänge an der Überströmkante (diese Länge wird im vorliegenden Bericht mit L bezeichnet). In diesem Beispiel unterscheiden sich die Massenströme freier und anliegender Plumes in Höhe der Raumöffnung (3,4 m über dem Brandherd) noch um weniger als Faktor 2, in 20 m Höhe über dem Brandherd unterscheiden sie sich etwa um den Faktor 2,4. Dieser große Unterschied darf bei der Bemessung nicht ignoriert werden.



Bild 3.3-18: Massenstrom von Überstrom-Plumes aus Großraumbüro-Bränden, berechnet nach BRE-Methode, aus MORGAN et.al. [88] links: freier Plume, rechts: an der Fassade anliegender Plume

Die Methode a) wird – wie bereits begründet – nicht in diesen Bericht aufgenommen. Die Methode b) bleibt unberücksichtigt, weil sie von MORGAN et.al. nicht empfohlen wird. Es bleiben die Methoden c) und d) zu behandeln.

3.3.4.1 Spill-Plumes mit freier Einmischung nach britischer Literatur

Methode c) zur Berechnung der Einmischung in einen Linien-Plume für $z_{\text{Spill}} > 3 \text{ m}$

Die Formel für den Massenstrom bei großer Steighöhe lautet:

$$\dot{m}_{\rm Spill} = 0.58 \,\rho_{\rm Spill} \left[\frac{g \,\dot{Q}_{\rm c,o} L^2}{\rho_{\rm Spill} \,c_{\rm p} T_{\infty}} \right]^{1/3} (z_{\rm Spill} + \Delta) \left[1 + \frac{0.22 (z_{\rm Spill} + 2\Delta)}{L} \right]^{2/3} [\rm kg/s] \quad (3.3-48).$$

Die Dichte ρ_{Spill} ist die mittlere Dichte des Plumes in der Höhe z_{Spill} ; sie ist iterativ zu bestimmen und kann bei geringen Plume-Temperaturen $\rho_{\text{Spill}} = 1,1$ [kg/m³] gesetzt werden. Die Höhenverschiebung Δ des Ursprunges des Plumes in eine virtuelle Quelle unterhalb der Umströmkante ergibt sich zu

$$\Delta = D_{\rm B} + \frac{\dot{m}_{\rm B}}{C \, \dot{Q}_{\rm c,o}^{1/3}} \quad [\rm m]$$
(3.3-49).

Hierfür ist vorher der Massenstrom $\dot{m}_{\rm B}$ nach Gleichung (3.3-45) und die Dicke der Rauchschicht unter dem Balkon $D_{\rm B}$ nach Gleichung (3.3-46) unter Verwendung der Konstanten C

$$C = 0,132 \ \rho_{\infty} \ L^{2/3} \tag{3.3-50}$$

zu berechnen.

Methode d) zur Berechnung der Einmischung in einen Linien-Plume für $z_{\text{Spill}} < 3 \text{ m}$

Die Formel für den Massenstrom ohne die Einmischung an den freien Enden lautet bei geringer Steighöhe:

$$\dot{m}_{\text{Spill}} = 1.2 \ \dot{m}_{\text{B}} + 0.16 \ L \ z_{\text{Spill,efff}} \left[\frac{\dot{Q}_{\text{c,o}}}{L} \right]^{1/3} + 0.0027 \ \dot{Q}_{\text{c,o}} \ [\text{kg/s}]$$
 (3.3-51).

Für die beiden freien Enden gemeinsam ist zusätzlich anzusetzen:

$$\delta \dot{m}_{\text{Spill}} = 0,09 \ z_{\text{Spill,eff}} \left[\frac{\dot{Q}_{c,o}}{L} \right]^{1/3} [\text{kg/s}]$$
 (3.3-52).

Vereinfachung für bestimmte Fälle:

Für Einkaufsstraßen, in denen das Dach nicht wesentlich über den Öffnungen der Geschäfte liegt und die Rauchschichtunterkante höchstens 2 m über der Öffnungsoberkante geplant ist, dürfen nach MORGAN et.al. [88] alle Einzelrechnungsschritte ersetzt werden durch die Formel (3.3-10) für "großes" Feuer unter Verwendung der Einmischkonstanten $C_{\rm E} = 0,38$.

3.3.4.2 An Fassaden anliegende Spill-Plumes nach britischer Literatur

Die mitgeteilten und empfohlenen Formeln für Überström-Plumes sind ausschließlich für frei abströmende Plumes gültig. MORGAN et.al. [88] haben jedoch eine Vielzahl von Anwendungsfällen mit freien und mit anliegenden Plumes mit Hilfe der BRE-Methode berechnet und in Diagrammform mitgeteilt. Diese Daten haben wir entsprechend deren Empfehlung für Bemessungszwecke ausgewertet. Dabei ist aufgefallen, dass die Kurvenscharen in den Diagrammen teilweise keine Äquidistanz aufweisen. Die Durchsicht des User-Guides zur verwendeten BRE-Methode klärt dies auf: Die Berechnungen waren bereichsweise mit unterschiedlichen Parametern durchzuführen. Auffallend ist weiterhin, dass die Massenströme freier Plumes und anliegender Plumes durch Unterzüge praktisch nicht beeinflusst werden, wenn die Öffnungshöhe zugleich Deckenhöhe oder die Öffnungshöhe zugleich Unterkante Unterzug ist (dieses Ergebnis ist nicht sehr überzeugend, da an anderer Stelle dem Impuls der ungehinderten Deckenströmung große Bedeutung beigemessen wird, was hier völlig "untergeht").

Die Auswertungen zeigen erwartungsgemäß, dass sich die Massenströme freier und anliegender Plumes mit zunehmender Höhe stärker unterscheiden⁴² (die US-amerikanischen Formeln verwenden unabhängig von der Steighöhe feste Verhältniszahlen; siehe Abschnitt 3.3.4.4). Bei größeren Steighöhen, wie sie in Atrien auftreten, betragen die Massenströme der an Fassaden anliegenden Plumes ca. 40% der berechneten Massenströme für freie Plumes. Bei Steighöhen bis etwa 10 m betragen die Massenströme der anliegenden Plumes noch ca. 50% der Massenströme freier Plumes.

Es wird deshalb empfohlen, für die Bemessung der an Fassaden anliegenden Plumes die verfügbaren Formeln für freie Plumes (Gleichungen (3.3-41) bis (3.3-52) ohne (3.3-44)) anzuwenden und das Ergebnis

- bei Steighöhen über 3 m bis 10 m mit dem Faktor 0,5 und
- bei Steighöhen über 10 m mit dem Faktor 0,4

zu multiplizieren um die Massenströme anliegender Plumes zu erhalten.

⁴² Bei der Situation "große Einzelhandelsgeschäfte mit Normalsprinklern" haben die Autoren [88] deutlich größere Massenströme in Höhe der Oberkante der Raumöffnung für den anliegenden Plume als für den freien Plume ermittelt. Zu diesem Ergebnis kann kein Vertrauen bestehen, weil sich ein in Richtung des Brandgasstromes später einstellendes Ereignis – ein sich anlegender oder ein frei abströmender Plume – niemals "rückwärts" in Höhe der Raumöffnung derartig auswirken kann.

3.3.4.3 Spill-Plumes mit freier Einmischung nach US-amerikanischer Literatur

Formeln des Typs "kleines" Feuer mit virtueller punktförmiger Quelle für den Überlaufplume

Die Richtlinie NFPA 92B [90] und andere US-amerikanische Literatur verwenden auch für komplexe Plumes die Formeln des Typs "kleines" Feuer. Die Entwicklung dieser Formeln geht auf HESKESTAD zurück. Die englischen Arbeiten finden im NFPA 92B nur knappe Erwähnung; wohl deshalb weil diese "schlecht kompatibel" sind. Für einen ventilationsgesteuerten Brand in einem an einen großen Bereich direkt angrenzenden Raum wird die höchstmögliche Brandleistung angegeben zu

$$\dot{Q}_{\rm f} = 1260 A_{\rm W} \sqrt{H_{\rm W}} \ [\rm kW]$$
 (3.3-53).

In der **Modellvorstellung** strömt dieses Brandgas aus einer **Punktquelle**, die um ein Höhenkorrekturmaß "a" unterhalb der Öffnungsoberkante liegt. Das Maß a errechnet sich aus

$$a = 2,4 A_{\rm W}^{2/5} H_{\rm W}^{1/5} - 2,1 H_{\rm W}$$
 [m] (3.3-54).

Das Korrekturmaß *a* führt anstelle der virtuellen Höhe z_0 in der HESKESTAD-Formel (3.3-18) zur Formel für den Massenstrom eines an einer Raumöffnung beginnenden **freien** Überlauf-Plumes (Spill-Plume), der für Räume mit nur einer einzigen Öffnung angewendet werden soll:

$$\dot{m}_{\rm Spill} = 0,071 \, \dot{Q}_{\rm c,o}^{1/3} \, (z_{\rm W} + a)^{5/3} + 0,0018 \, \dot{Q}_{\rm c,o} \, [\rm kg/s]$$
 (3.3-55).

Die Richtlinie NFPA 92B führt zu dieser Formel aus, dass es sich wohl um eine vernünftige Modellvorstellung handle, für die aber im Jahr 2000 noch keine experimentelle Validierung vorlag.

3.3.4.4 An Fassaden anliegende Spill-Plumes nach US-amerikanischer Literatur

KLOTE und MILKE [73] gehen 2002 mit ihrer Modellvorstellung für den Überlauf-Plume noch weiter. Sie verwenden zusätzlich die Korrektur für den Einfluss des Brandherdes in Bezug auf Wände, wie dies bereits mit Tabelle 3.3-4 in der Formel (3.3-21) erfolgte.

Die Gleichung (3.3-55) lautet somit in der allgemein gültigen Form sowohl für freie als auch für anliegende Überlauf-Plumes

$$\dot{m}_{\text{Spill}} = C \dot{Q}_{\text{c,o}}^{1/3} (z_{\text{W}} + a)^{5/3} + 0,0018 \dot{Q}_{\text{c,o}} \text{ [kg/s]}$$
 (3.3-56)

mit dem Faktor C aus Tabelle 3.3-4 bzw. Tabelle 3.3-8 (der Hauptanwendungsfall des an der Fassade anliegenden Plumes ist hervorgehoben).

Aufgrund der getroffenen Annahmen bei der Ableitung ist die Gleichung (3.3-56) sowohl für Raumbrände in der Pre-flash-over-Phase als auch für Raumbrände in der ventilationsgesteuerten Vollbrandphase anwendbar.

Lage des Plumes	Anwendungsfall : Der Plume		Korrektur- faktor k ^{2/3}	Faktor <i>C</i> in (3.3-56)
frei im Raum	kann oberhalb frei abströmen (Gebäuderücksprung)	1	1	0,071
an einer Außenecke	legt sich an Außenecke an	0,75	0,825	0,058
an einer Wand	legt sich an Fassade an	0,5	0,63	0,044
an einer Innenecke	legt sich an Innenecke an	0,25	0,4	0,028

Tabelle 3.3-8: Brandgasaustritt aus Wandöffnung, Einfluss der Lage des Plumes

In Verbindung mit der lüftungsgesteuerten höchstmöglichen Energiefreisetzung nach Gleichung (3.3-53) und einem konvektiven Energieanteil von 70% ($\chi = 0,7$) ergibt sich der größtmögliche Massenstrom des Plumes zu

$$\dot{m}_{\rm Spill} = 0.68 \ k^{2/3} \left(A_{\rm W} \sqrt{H_{\rm W}}\right)^{1/3} \left(z_{\rm W} + a\right)^{5/3} + 1.59 \ A_{\rm W} \sqrt{H_{\rm W}} \ [\rm kg/s]$$
 (3.3-57).

Der Faktor k bzw. $k^{2/3}$ ist der Tabelle 3.3-8 zu entnehmen.

Die aufgezeigte "Strapazierung" der HESKESTAD-Punktquellen-Formel für eine universelle Anwendung bei linienförmigen Überlauf-Plumes macht die Validierung umso dringlicher. Nach KLOTE und MILKE beabsichtigt der ASHRAE TC 5.6 die Formeln zu überprüfen (Informationstand: 2002). Die angegebenen Formeln sind somit als vorläufige "Werkzeuge" anzusehen, die nach Vorliegen neuer gesicherter Erkenntnisse nachgebessert werden müssen (den gleichen Standpunkt hatten auch die englischen Forscher im Umfeld von HANSELL und MORGAN bereits für ihre eigenen Formeln vertreten).

Formeln des Typs "kleines" Feuer mit Linienquelle für den Überlaufplume

Der BSI DD 240 [18] ergänzt seine Fenster-Plume-Formel – in diesem Bericht Gleichung (3.3-44) – mit zwei Spill-Plume-Formeln aus US-amerikanischer Literatur.

Für sehr breite Öffnungen (W/h>>1) und frei abströmendem Plume ist (zitiert nach CIBSE 1995) zu verwenden

$$\dot{m}_{\rm Spill} = 0.23 \, \dot{Q}_{\rm P}^{1/3} \, W^{2/3} \, (h + z_{\rm Spill}) \, [\rm kg/s]$$
 (3.3-58)

W ist die Breite der Wandöffnung, *h* die Oberkante der Wandöffnung, gemessen ab Brandherd und z_{Spill} ist die Steighöhe ab Überströmkante (hier gemessen ab Öffnungsoberkante; vergl. Bild 3.3-11).

Den Angaben zufolge ist für einen **an der Fassade anliegenden Plume** unter sonst gleichen Bedingungen mit ¹/₃ geringerem Massenstrom zu rechnen und somit ist

$$\dot{m}_{\rm Spill} = 0.15 \, \dot{Q}_{\rm P}^{1/3} \, W^{2/3} \, (h + z_{\rm Spill}) \, [\rm kg/s]$$
 (3.3-59)

In Fällen, in denen ein **Balkon über einer sehr breiten Wandöffnung** auskragt, ergibt sich der Massenstrom des Überlauf-Plumes (zitiert nach LAW 1997) zu

$$\dot{m}_{\rm Spill} = 0.36 \, \dot{Q}_{\rm P}^{1/3} \, L^{2/3} \, (0.25 \, h + z_{\rm Spill}) \, [\rm kg/s]$$
 (3.3-60).

In dieser Gleichung wird z_{Spill} ab Unterkante Balkon gemessen, weil an dieser Kante die Überströmung erfolgt. Die senkrechte Länge *h* wird hier als Höhe zwischen Unterkante der Öffnung und dem Balkon angegeben.

Die waagrechte Länge L ist die Länge der Überströmkante, über die Brandgas abströmt; im Falle einer Längenbegrenzung durch Rauchschürzen nach Bild 3.3-16 ist L das Maß zwischen zwei Rauchschürzen und beim Fehlen von Rauchschürzen (Bild 3.3-15) beträgt die Länge L

$$L = W + B [m]$$
 (3.3-61).

B ist die Breite des Balkons.

3.3.5 Verdünnung der Rauchgase

Im Abschnitt 2.2.2 und im Abschnitt 2.2.3 wurden die notwendigen Verdünnungen bezüglich Sichtweite und schädlicher Rauchgasbestandteile angegeben. Das Maß der Verdünnung V der Rauchgase wird auf die stöchiometrische Rauchgasmenge bezogen. Es wird hierfür der mittlere stöchiometrische Rauchgasmassenstrom von 0,368 m³ pro 1000 kJ freigesetzter Energie verwendet; vergl. Abschnitt 3.2.2.2.

Die Verdünnung V berechnet sich zu

$$V = \frac{10^3 \dot{m}_{\rm RG}}{0,368 \dot{Q}_{\rm f}} - 1 \ [./.]$$
(3.3-62)

mit

 $Q_{\rm f}$ Brandleistung in [kW] und

 $\dot{m}_{\rm RG}$ Rauchgas-Massenstrom in [kg/s] an der Stelle, für die die Verdünnung ermittelt werden soll.

3.4 Brandgasableitung aus Gebäuden

3.4.1 Wirkungsweise natürlicher und maschineller Rauchabzüge

3.4.1.1 Natürliche Rauchabzüge NRA

Bei natürlichen Rauchabzügen wird die Fähigkeit von Auftriebskräften genutzt, Brandrauch durch Abzugsöffnungen abströmen zu lassen. Diese Fähigkeit wird durch die Dicke einer Rauchschicht und durch deren Übertemperatur gegenüber der Umgebung bestimmt. Der abgeführte **Massenstrom wächst** mit zunehmender Dicke und zunehmender Temperatur der Rauchschicht an. Ohne Windeinwirkung und ohne Schornsteineffekt (verursacht durch Temperaturunterschiede zwischen innen und außen) dient einzig und allein der sich aus Schichtdicke und Übertemperatur ergebende Differenzdruck $\Delta p_{Auftrieb}$ als Antrieb, um die infolge der Strömung durch die Zuluftöffnungen und die Abzugsöffnungen entstehenden Druckverluste Δp_z und Δp_A abzudecken. Bei natürlichen Rauchabzügen stellt sich deshalb unter diesen Bedingungen im Innern des Gebäudes die Druck-neutrale Ebene ein; vergl. Bild 3.4-1. Oberhalb dieser Ebene herrscht Überdruck und Unterhalb Unterdruck. Im Überdruckbereich strömt Rauch durch Öffnungen und Undichtheiten nach außen oder in andere Bereiche ab, und im Unterdruckbereich strömt Luft nach.



Bild 3.4-1: Differenzdruckverläufe in Räumen mit Rauchschichten links: Druckverlauf bei natürlichem Abzug rechts: mögliche Druckverläufe bei maschinellem Abzug

3.4.1.2 Maschinelle Rauchabzüge (MRA)

Bei maschinellen Rauchabzügen dienen Ventilatoren als Antrieb. Es ist möglich, im gesamten zu entrauchenden Bereich Unterdruck zu erzeugen; vergl. Bild 3.4-1. Die Entrauchung ist auch über Leitungen möglich, weil die Druckverluste in den Leitungen ebenfalls durch Ventilatoren abgedeckt werden können. Ventilatoren sind Strömungsmaschinen, die unabhängig von sich ändernder Dichte bzw. Temperatur des zu fördernden Mediums näherungsweise konstante Volumenströme fördern. Durch die Dichteabnahme von Rauchgasen mit zunehmender Temperatur sinkt der Massenstrom infolge des konstanten Volumenstromes bei den maschinellen Abzügen mit zunehmender Temperatur ab.

3.4.2 Rauchschicht

3.4.2.1 Temperatur der Rauchschicht

Die Temperatur der Rauchschicht ergibt sich im stationären Fall aus dem Energiestrom aus der Rauchschicht und deren Massenstrom zu

$$\vartheta_{\rm S} = \vartheta_{\rm Z} + \frac{Q_{\rm c,o}}{c_{\rm p} \dot{m}_{\rm P}} \tag{3.4-1}.$$

Der aus der Rauchschicht abströmende Energiestrom $\dot{Q}_{A} = \dot{Q}_{c,o}$ ist nach der Energiebilanz (vergl. Bild 3.1-7, Seite 34) der von der Brandleistung verbliebene "Rest", der mit dem Brandgasmassenstrom aus der Rauchschicht abgeführt wird.

Die Berechnung der in Bauteile abfließenden Energieströme mit Hilfe der stationären Wärmeübertragungsgleichungen führt im Allgemeinen zu unbrauchbaren Ergebnissen, da es sich um hochgradig instationäre Wärmeübertragungssituationen handelt. Von ursprünglicher Vernachlässigung dieser Energiemengen ausgehend (vergl. HANSELL und MORGAN 1994 [53]) hat es sich heute international durchgesetzt, in den relativ einfachen Algorithmen der Zonenmodelle auch die Wärmeverluste auf "einfache" Art und Weise bei begrenzten Rauchabschnittsgrößen zu berücksichtigen.

Begrenzung der Rauchabschnittsgrößen

MORGAN und GARDNER [86] führten 1990 in einer als Richtlinie anzusehenden Veröffentlichung über Planungshinweise für die Entrauchung in überdachten Einkaufszentren aus, dass zur Vermeidung von übermäßiger Abkühlung und Rezirkulation von Brandrauch Rauchabschnitte in ihrer Größe zu begrenzen seien. Danach sollen Rauchabschnitte, in denen ein Brand unterstellt wird und der Rauch direkt abgeführt wird, auf 2000 m² Grundfläche bei natürlicher Entrauchung und auf 2600 m² Grundfläche bei maschineller Entrauchung begrenzt werden. Die Größe der Rauchabschnitte ist auf 1000 m² bzw. 1300 m² zu begrenzen, wenn der Rauch in größere Bereiche überströmt und von dort abgeführt wird (größere Lufteinmischung an Überströmkanten und damit weitere Abkühlung). In der gleichen Richtlinie wird die Länge des Rauchabschnittes auf 60 m begrenzt, um von jeder Stelle in 30 m Entfernung einen gesicherten Fluchtweg erreichen zu können (diese Festlegung dient nicht der Begrenzung der Grundfläche sondern passt an britisches Baurecht bezüglich Fluchtweglängen an).

Die Weißdruckvorlage zu DIN 18232-2 [32] begrenzt die Länge von Rauchabschnitten ebenfalls auf 60 m. Die Rauchabschnittsfläche ist auf 1600 m² begrenzt (in Anlehnung an die größte Brandabschnittsfläche von 1600 m² nach deutschem Baurecht).

"Unbegrenzte" Rauchabschnittsgrößen in Atrien

MILKE (USA) führt in seinem Beitrag "Smoke management in covered malls and atria" [79] aus, dass die üblichen Methoden zur Rauchabführung in Atrien wegen der großen Grundflächen und der großen Höhen nicht anwendbar seien. Er untersucht u. a. die Verzögerung einer Rauchdetektion, die Auswirkungen einer Verrauchung der Atrien und die mögliche Akzeptanz der Verrauchung infolge starker Verdünnung für Atrien mit einem Querschnitt (nicht Grundriss!) bis zu 10.000 m² und einer Höhe bis 105 m. Deutsche Vorstellungen über die notwendige Verdünnung von Brandrauch haben JOHN und SCHATZ unterbreitet, vergl. hierzu die Abschnitte 2.2.2 und 2.2.3 in diesem Bericht (Notwendige Verdünnung zur Erzielung ausreichender Sichtweite und zur Begrenzung der Wirkung schädlicher Brandgasbestandteile).

Energieinhalt der Rauchschicht

Der Normungsvorschlag zu EN 12101-5 [43] und MORGAN et. al. [88] empfehlen für viele Anwendungsfälle zwar nur 20% Strahlungsverluste aber

50% der Brandleistung $\dot{Q}_{\rm f}$

als abzuführenden Energiestrom zu verwenden; dieser Energiestrom ist auch maßgebend für die Bestimmung der Rauchschichttemperatur (Überprüfung ob der Flash-over eingetreten sein wird). Für die gleichen Anwendungsfälle sind

bei natürlichen Abzügen mit Sprinklerung 25% der Brandleistung $\dot{Q}_{\rm f}$

als abzuführender Energiestrom vorgesehen.

Für eine konservative Bemessung sollte die kühlende Wirkung von Sprinklern bei maschinellen Abzügen vernachlässigt werden, sodass

bei maschinellen Abzügen ohne Sprinklerung 50% der Brandleistung $\dot{Q}_{\rm f}$

als abzuführender Energiestrom vorzusehen sind. Alternativ wird für die Bemessung der Entrauchungsventilatoren von MORGAN et. al. vorgeschlagen, die Mitteltemperatur zwischen der Rauchschichttemperatur ohne Kühlwirkung durch Sprinkler und der Auslösetemperatur der Sprinkler anzusetzen.

MAX und BREIN [77] haben 30% Strahlungsverluste des Plumes über dem Brandherd und pauschal 30% Energieverluste in der Rauchschicht (jeweils bezogen auf die Brandleistung $\dot{Q}_{\rm f}$) angesetzt um damit die Bemessungstabellen für die Weißdruckvorlage zu DIN 18232-2 zu erstellen; vergl. Erläuterungen in [32]. Mit dem Massenstrom wird somit ein Anteil von 1 - 0.3 - 0.3 = 0.4 oder

40% der Brandleistung $\dot{Q}_{\rm f}$

abgeführt (für eine konservative Bemessung wird außerdem eine spezifische Brandleistung von 300 kW/m² verwendet).

Für die 1999 erschienene Fassung DIN V 18232-5 für maschinelle Rauchabzüge waren – wie damals nach britischem Vorbild noch gebräuchlich – nur 20% Strahlungsverluste und keine weiteren Verluste aus der Rauchschicht berücksichtigt worden; wie schon ausgeführt waren eine spezifische Brandleistung von 600 kW/m² verwendet worden, um eine für maschinelle Abzüge konservative Auslegung zu erzielen.

In der US-amerikanischen Literatur wird bei der Bemessung natürlicher Rauchabzüge in NFPA 204 [91] der in die Rauchschicht eindringende Energiestrom mit 70% der Brandleistung angesetzt. Für die Temperatur der Rauchschicht wird die Formel

$$\vartheta_{\rm S} = \vartheta_{\rm Z} + \frac{K \dot{Q}_{\rm P}}{c_{\rm p} \dot{m}_{\rm P}}$$
(3.4-2)

angegeben. Der Faktor K bezeichnet den Bruchteil der konvektiven Energie, der in der Rauchgasschicht verblieben ist. Ohne besonderen Nachweis ist K = 0,5 zu setzen. Mit dem Massenstrom wird dann ein Anteil von $0,7 \times 0,5 = 0,35$ oder

35% der Brandleistung $\dot{Q}_{\rm f}$

abgeführt. Dieser niedrige Anteil sollte ausschließlich zur konservativen Auslegung von natürlichen Rauchabzügen nach NFPA 204 angewendet werden.

HANSELL und MORGAN berichten 1994 [53], dass große Atrien meist völlig verglast seien und diese Bauteile im Gegensatz zu anderen Bauteilen als erhebliche Wärmesenken wirken. Sie haben für Atrien mit bis zu 24.000 m² (!) Wärme "verzehrender" Oberfläche für Brände mit konvektiven Wärmeströmen von 1 MW, 5 MW und 6 MW die Rauchschichttemperaturen in Abhängigkeit vom Massenstrom (somit indirekt abhängig von der Steighöhe des Rauchgases) berechnet und die Ergebnisse als Grafiken angegeben.

Bei einem Massenstrom von 100 kg/s ergab sich bei 6 MW konvektiver Wärme ein Wärmeverlust in die Bauteile von 7% bei 2.000 m² Wärmeübertragungsfläche und von 40% bei 24.000 m² Wärmeübertragungsfläche.

Bei einem Massenstrom von "nur" 10 kg/s ergab sich bei 6 MW konvektiver Wärme ein Wärmeverlust in die Bauteile von 65% bei 2.000 m² Wärmeübertragungsfläche und von 90% bei 24.000 m² Wärmeübertragungsfläche.

Für eine konservative Bemessung schlagen wir für Atrien und vergleichbare große Bereiche folgende feste Werte vor:

bei maschinellen Abzügen in Atrien mit 70% und bei natürlichen Abzügen in Atrien mit 35%

des zugeführten Konvektionswärmestromes $\dot{Q}_{\rm P}$ die Rauchgastemperatur zu berechnen.

Begrenzung der Massenströme

MORGAN et. al. [88] sehen für die natürliche Entrauchung eine ökonomische Grenze bei Massenströmen über 150-200 kg/s (limitations to the use of through flow ventilation), da die Übertemperatur und damit der Antrieb mit zunehmenden Massenströmen immer weiter abnimmt.

3.4.2.2 Mindestdicke der Rauchschicht

Eine Mindestdicke der Rauchschicht ist sowohl bei natürlichen Rauchabzügen als auch bei maschinellen Rauchabzügen erforderlich, um die Ausbildung der Deckenströmung (engl.: ceiling jet) hin zu den Abzügen zu ermöglichen und um eine Lufteinsaugung an den Abzügen (engl.: plugholing) zu verhindern. Bild 3.4-2 zeigt die Effektivität der Absaugung in Abhängigkeit von der Rauchschichtdicke d_S . Während im Teilbild b) gerade noch nur Rauch abgesaugt wird, strömt im Teilbild c) Rauch aus der Deckenschicht und Luft aus der darunter liegenden raucharmen Schicht ab. Tritt der Fall c) beim Bemessungsfeuer auf, so hat der Abzug versagt (sofern er nicht für diesen Fall ausdrücklich bemessen wurde). Die geeignete Bemessung findet man im Abschnitt 3.4.4.



Bild 3.4-2: Effektivität der Absaugung in Abhängigkeit von der Rauchschichtdicke d_S

Bei natürlichen Rauchabzugsanlagen bestimmt die Dicke der Rauchschicht und ihre Übertemperatur darüber hinaus noch die Wirksamkeit der Abzüge. HANSELL und MORGAN [53] geben die Mindestschichtdicke einer parallelen auf die Abzüge hin gerichteten Deckenströmung mit der oben bereits mitgeteilten und erläuterten Formel (3.3-46) an:

$$D_{\rm B} = \frac{0.36}{C_{\rm d}} \left[\frac{\dot{m}_{\rm B} T_{\rm B}}{\theta_{\rm B}^{1/2} L T_{\infty}^{1/2}} \right]^{2/3}$$
(3.3-46).

ALPERT [1] definiert die Dicke der Deckenströmung als den Abstand von der Deckenunterseite, an dem die Übertemperatur auf den Bruchteil 1/e (1/2,718...) der maximalen Übertemperatur abgesunken ist. Die Art der Temperaturverteilung entspricht der Geschwindigkeitsverteilung wie sie im Bild 3.1-1 (Ausbildung einer Deckenströmung über der "ruhenden" Rauchschicht) eingetragen ist. Für diese Definition berechnet sich die Dicke ℓ_{T} der Deckenströmung im radialen Abstand r von der Achse des an der Decke auftreffenden Plumes zu

$$\ell_{\rm T} / (H - H_{\rm f}) = 0.112 \left[1 - \exp\left(-2.24 r / (H - H_{\rm f})\right) \right]$$
(3.4-3).

Die Gleichung ist anwendbar für den auf die Höhe zwischen Brandherd und Decke bezogenen radialen Abstand $0,26 \le r/(H - H_f) \le 2,0$. In der Gleichung bedeuten *H* die Raumhöhe und H_f die Lage des Brandherdes über dem Boden. Die Auswertung ergibt, dass zur Ausbildung der Deckenströmung eine Schichtdicke zwischen 10% und 12% der Höhe zwischen Brandherd und Decke erforderlich sind.

Daraus ergibt sich eine Mindestdicke der Rauchschicht von 12% der Höhe zwischen Brandherd und Deckenunterkante, um eine Entwicklung der Deckenströmung zu ermöglichen.

3.4.3 Rauchschürzen

Rauchschürzen erfüllen aus heutiger Sicht drei verschiedene Aufgaben. Sie

- begrenzen Rauchabschnitte,
- leiten Brandgasströme und
- können die Wirkung impulsreicher Zuluftströme begrenzen.

Die "klassische" Aufgabe von Rauchschürzen ist es, Rauchschürzen in ihrer waagrechten Ausdehnung zu begrenzen, wo Wände aufgrund der Nutzung des Gebäudes nicht eingesetzt werden können.

In Großbritannien werden in größerem Umfang Rauchschürzen auch eingesetzt, um Rauchgasströme zu Abzugsschächten oder mit geringst möglicher Lufteinmischung zu Überströmkanten zu leiten (MORGAN und GARDNER 1990 [86], HANSELL und GARDNER 1994 [53], MORGAN et. al. 1999 [88]).

Darüber hinaus können Rauchschürzen bei geeigneter Anordnung die Induktionswirkung von Zuluftzuführungen unschädlich machen; vergl. z. B. MORGAN und GARDNER [86].

In jedem Anwendungsfall müssen Rauchschürzen angemessen dicht an der Decke anschließen und grundsätzlich mindestens so weit von oben herabhängen, dass die Oberkante der im Brandfall angestrebten Raucharmen Schicht höher liegt als die Unterkante der Rauchschürzen. In Deutschland wurden bisher fast ausschließlich fest eingebaute Rauchschürzen verwendet. Unterzüge der Dach- oder Deckenkonstruktion mit mindestens 1 m Höhe dürfen nach DIN 18232 als Rauchschürzen benutzt werden. Tief hängende Rauchschürzen wurden aus architektonischen Gründen als brandsichere Verglasungen ausgeführt.

Der britische Einfluss in der europäischen Normung "brachte" uns bewegliche Rauchschürzen (engl.: draft curtains oder drop curtains), die in Deutschland vorher nicht bekannt waren. Sie sind während der ungestörten Gebäudenutzung nicht wahrnehmbar und werden erst im Brandfall ausgelöst und ausgefahren. Diese Rauchschürzen – meist in Form von textilen Vorhängen ausgeführt – müssen hinreichend dicht und schwer genug sein, um im Brandfalle wirklich als Begrenzung des Rauchabschnittes oder als Leitelement für Rauchgasströme zu dienen. Der Auftriebsdruck der Rauchgasschicht führt zu einer Verformung und damit zu einer Verkürzung, bei Eckanordnungen auch zu einer Spaltvergrößerung. Diesen Umständen ist bei der Planung Rechnung zu tragen. Es sei hierzu auf den Anhang H zu EN 12101-5 [43] verwiesen. Er behandelt frei hängende Rauchschürzen und Rauchschürzen, die Öffnungen völlig verschließen (wie z. B. Bühnenvorhänge).

3.4.4 Abzugseinrichtungen

Abzugseinrichtungen sind so zu bemessen, dass sie im Brandfall – wie geplant – ausschließlich Rauch und nicht auch Luft aus der raucharmen Schicht unterhalb der Rauchschicht ableiten. Mit Hilfe der BERNOULLI-Gleichung ergibt sich der maximal mögliche Massenstrom

$$\dot{m}_{\rm A} = \frac{C_{\rm A} A_{\rm A} \rho_{\infty} \sqrt{2 g d_{\rm S} \theta_{\rm S} T_{\infty}}}{T_{\rm S}} \quad [\rm kg/s] \tag{3.4-4},$$

der sich in der Abzugsöffnung aufgrund des Auftriebsdruckes der Rauchschicht bei druckverlustfreier Nachströmung einstellt, solange kein Einsaugen von Luft (engl.: plugholing) erfolgt. Das Einsaugen setzt bei einem Grenzwert ein, den SPRATT und HESELDEN [111] 1974 experimentell untersuchten. Nach Überarbeitung wurden die Ergebnisse von MORGAN und GARDNER 1990 in [86] im Abschnitt "minimum number of extract points" veröffentlicht. Danach ergibt sich der **maximale Massenstrom je Abzugsstelle** zu

$$\dot{m}_{\rm crit} = \frac{\alpha \sqrt{g \, d_{\rm s}^5 \Theta_{\rm s} \, T_{\infty}}}{T_{\rm s}} \quad [\rm kg/s] \tag{3.4-5}$$

- mit $d_{\rm S}$ dicke der Rauchschicht unterhalb des Abzuges,
 - g Erdbeschleunigung,
 - $T_{\rm s}$ absolute Schichttemperatur,
 - T_{∞} absolute Umgebungstemperatur,
 - α = 1,3 für Deckenabzüge in der Nähe von Wänden

bzw. für Wandabzüge in der Nähe einer Decke,

- α = 1,8 für Deckenabzüge in "großem" Abstand von Wänden,
- θ_s Übertemperatur der Rauchschicht über Umgebungstemperatur,
- ρ_{∞} Dichte der Luft in der Umgebung.

Aus dem Massenstrom ergibt sich der maximale Volumenstrom zu

$$\dot{V}_{\text{crit}} = \frac{\alpha}{\rho_{\infty}} \sqrt{\frac{g \, d_{\text{S}}^5 \,\theta}{T_{\infty}}} \quad [\text{m}^3/\text{s}]$$
(3.4-6).

Bei der Bemessung maschineller Rauchabzüge ist die **Begrenzung des Volumenstromes** je Absaugstelle erforderlich, um ein Einsaugen von Luft zu verhindern. Da die Absaugung bei maschinellen Abzügen meist über Öffnungen in Leitungen erfolgt, wird die effektive Rauchschichtdicke Δd_s für die Bemessung angewendet. ZITZELSBERGER [134] hat in Abstimmung mit dem Normenausschuss NABau AA 00.35.00 eine noch "funktionierende Übertemperatur von $\theta = 35$ K für die Bemessung angesetzt und danach die Tabelle 3.4-1 für DIN 18232-5 entwickelt; dabei wurde konservativ mit $\alpha = 1,3$ gerechnet⁴³. Für die effektive Rauchschichtdicke ist Δd_s nach Bild 3.4-5 maßgebend. Die Gleichung (3.4-6) ist in Bild 3.4-3 für die gleichen Rauchschichtdicken Δd_s wie in DIN 18232-5 ausgewertet dargestellt.

 Tabelle 3.4-1: Maximaler Volumenstrom je Absaugstelle oder Einzelventilator nach

 DIN V 18232-5 (Quelle: [134])

Dicke $\Delta d_{\rm S}$ der Rauchschicht an der Absaugstelle oder am Anschlussquerschnitt eines Einzelventi- lators in [m]	Volumenstrom je Absaugstelle oder Einzelventilator in [m³/s]		
$\geq 0,5^{44}$	≤ 0,2		
≥ 1,0	≤ 1,2		
≥ 1,5	≤ 3,5		
≥ 2,0	≤ 7,0		
≥ 2,5	≤ 12,0		

⁴³ MORGAN et. al. [88] beschränken sich 1999 auf den "worst case" indem sie nur noch $\alpha = 1,3$ angeben.

⁴⁴ Auch für Rauchschichtdicken $\Delta d_{\rm S} < 0.5$ m anwendbar, sofern Absaugstellen nach Bild 3.4-5 c) (nach oben gerichtet) verwendet werden.



Bild 3.4-3: Maximaler Volumenstrom je Absaugstelle nach DIN V 18232-5 (Quelle: [134])



Bild 3.4-4: Maximaler Volumenstrom je Absaugstelle in hohen Atrien in Abhängigkeit von der Rauchschichtdicke Δd_s , für $\theta = 5$ K und für $\theta = 20$ K



Bild 3.4-5: Für die Bemessung der Absaugstellen oder Einzelventilatoren anzusetzende Dicke Δd_s der Rauchschicht nach DIN V 18232-5 (Quelle: [134])

- a) $\Delta d_{\rm S}$ für nach unten gerichtete Absaugstellen
- b) $\Delta d_{\rm S}$ für horizontal angeordnete Absaugstellen
- c) $\Delta d_{\rm S}$ für nach oben gerichtete Absaugstellen

Für Schichtdicken von 0,5 m bis 5,0 m ist der Massenstrom in Abhängigkeit von der Übertemperatur nach Gleichung (3.4-5) in Bild 3.4-6 und der Volumenstrom in Abhängigkeit von der Übertemperatur nach Gleichung (3.4-6) in Bild 3.4-7 dargestellt. Der maximale Massenstrom stellt sich bei der gewählten bilogarithmischen Darstellung als Schar von Geraden dar.

Für hohe Atrien wurde der maximale Volumenstrom in Abhängigkeit von der Rauchschichtdicke unterhalb der Abzüge für Übertemperaturen von 5 K und von 20 K in Bild 3.4-4 angegeben.

Die minimale Anzahl N von natürlichen Rauchabzügen je Rauchabschnitt mit der Fläche A_R ergibt sich somit zu

$$N \ge \dot{m}_{\text{Bemessung}} / \dot{m}_{\text{crit}}$$
(3.4-7).

Die minimale Anzahl N von Absaugstellen oder Einzelventilatoren bei maschineller Entrauchung ergibt sich zu

$$N \ge \dot{V}_{\text{Bernessung}} / \dot{V}_{\text{crit}}$$
 (3.4-8).

In DIN 18232-2 wird der Wirkbereich eines Rauchabzuges auf 200 m² begrenzt. Damit wird dem Abkühlen und dem Absinken von Rauch vorgebeugt. Es sollte deshalb grundsätzlich

$$N \ge A_{\rm p} / 200$$
 (3.4-9)

eingehalten werden.

Eine rechnerische Strömungsgeschwindigkeit von 6 m/s bezogen auf den freien Querschnitt der Abzugsöffnungen sollte nicht überschritten werden. Es bestehen keine Bedenken gegen höhere Absauggeschwindigkeiten in nach oben gerichteten Absaugöffnungen von maschinellen Abzügen.



Bild 3.4-6: Maximaler Massenstrom je Absaugstelle in Abhängigkeit von der Rauchschichtdicke Δd_S unterhalb der Absaugstelle und der Übertemperatur θ der Rauchschicht (Parameter Δd_S :

 $1 \rightarrow 0,5 \text{ m}; 2 \rightarrow 1,0 \text{ m}; 3 \rightarrow 1,5 \text{ m}; 4 \rightarrow 2,0 \text{ m}; 5 \rightarrow 2,5 \text{ m}; 6 \rightarrow 3,5 \text{ m}; 7 \rightarrow 5,0 \text{ m}$



Bild 3.4-7: Maximaler Volumenstrom je Absaugstelle in Abhängigkeit von der Rauchschichtdicke $\Delta d_{\rm S}$ unterhalb der Absaugstelle und der Übertemperatur θ der Rauchschicht (Parameter $\Delta d_{\rm S}$: 1 bis 7 wie in Bild 3.4-6)

Sonderform von Abzugseinrichtungen für maschinelle Rauchabzüge Schlitzabsaugung senkrecht nach oben

Eine Schlitzabsaugung nach oben wird nach MORGAN et. al. [88] (siehe Bild 3.4-8) eingesetzt, wenn unter Balkonen eine Rauchschicht nicht durch Unterzüge oder Rauchschürzen begrenzt werden kann und eine Überströmung in einen angrenzenden Bereich nicht zugelassen wird. Anstelle einer Barriere kann eine ausreichend bemessene Schlitzabsaugung – möglichst nur in Ergänzung zu einer Raumabsaugung – ein Überströmen verhindern.



Bild 3.4-8: Schlitzabsaugung nach MORGAN et. al. [88]

Um ein Überströmen zu verhindern ist die Absaugung in nächster Nähe der Raumöffnung und über ganze Breite anzuordnen. Die notwendige Absaugleistung ist nach MORGAN um ³/₃ des abzusaugenden Massenstromes zu vergrößern; hier wird also durch gezieltes Einmischen von Luft aus der raucharmen Schicht einem Überströmen vorgebeugt. Als Formel ausgedrückt beträgt der vom Schlitzauslass abzuführende Massenstrom

$$\dot{m}_{\rm Slot,exhaust} = \frac{5}{3} \dot{m}_{\rm Slot}$$
(3.4-10)

mit

 $\dot{m}_{\text{Slot,exhaust}}$ Massenstrom in einem Schlitzabzug, der verhindert, dass eine thermische Rauchschicht über den Schlitzabzug hinwegströmt,

 \dot{m}_{Slot} Massenstrom einer thermischen Rauchschicht, die einem Schlitzabzug entgegen strömt; wirken im Raum weitere Abzüge, so strömt dem Schlitzabzug nur der "Rest" zu.

Sonderform von Abzugseinrichtungen für maschinelle Rauchabzüge Schlitzabsaugung waagrecht

Nach MORGAN et. al. besteht für lang gezogene Absauggitter in der Wandung von Absaugleitungen maschineller Entrauchungsanlagen, die als Alternative zu Einzelabsaugstellen benutzt werden, ebenfalls eine gesicherte Bemessungsmöglichkeit. Hierzu ist die Gleichung (3.3-46)

$$D_{\rm B} = \frac{0.36}{C_{\rm d}} \left[\frac{\dot{m}_{\rm B} T_{\rm B}}{\theta_{\rm B}^{1/2} L T_{\infty}^{1/2}} \right]^{2/3}$$
(3.3-46)

anzuwenden und die Länge L wie folgt neu zu definieren:

$$L = L_{\text{Gitter}} = \sum_{i=1}^{n} L_{\text{Gitter},i}$$
 (3.4-11).

Hierbei ist die Schichtdicke D_B definiert als Maß zwischen Oberkante Absauggitter und Unterkante der Schicht.

Sonderform von Abzugseinrichtungen für maschinelle Rauchabzüge Drallrohrabsaugung

GERHARDT und KONRATH [47] berichten über linienförmige Absaugungen, bei denen eine tangentiale Einströmung zu einer Drallströmung in der Leitung führte; sie bezeichnen diese Einrichtung deshalb als Drallrohre. Sie erzielten mit dieser Ausführung relativ gleichmäßige Absaugleistungen entlang größerer Längen.

Andere Abzugseinrichtungen

Für andere Absaugeinrichtungen, vor allem für solche mit Abmessungen ähnlich oder wesentlich kleiner als die Schichtdicke, empfehlen MORGAN et. al. die folgende Gleichung für den maximalen Massenstrom anzuwenden:

$$\dot{m}_{\rm crit} = \frac{2,05 \,\rho_{\infty} \,\sqrt{g \, T_{\omega} \theta_{\rm S}} \, d_{\rm S}^2 \,\sqrt{W_{\rm A}}}{T_{\rm S}} \quad [\rm kg/s]$$
(3.4-12).

 W_A ist eine charakteristische Länge des Abzuges, z. B. der Durchmesser oder der Durchmesser eines Kreises gleicher Fläche.

3.4.5 Zulufteinrichtungen

Entrauchungsanlagen wirken nur, wenn Luft in ausreichendem Maße – wie bemessen – nachströmen kann und kein Rauch von der Zuluft angesaugt werden kann. So banal dies klingt, so gern wird dies vergessen. Die natürliche Entrauchung reagiert naturgemäß sogar sehr empfindlich auf zu geringe Zuluftöffnungsflächen. Bild 3.4-9 zeigt die Veränderung des Massenstromes mit der Rauchgastemperatur in Abhängigkeit vom Verhältnis effektive Zuluftflächen zu effektive Abluftflächen. In diesem Bild wurde der Massenstrom auf den höchsten Massenstrom (bei ca. 320° C) für das Flächenverhältnis 1,5 nach DIN 18232-2 bezogen. Die Darstellung zeigt sehr deutlich, dass vierfache oder gar zehnfache Zuluftflächen kaum 10% Massenstromzunahme bewirken, während z. B. die Reduktion der Zuluftflächen bis zum Flächenverhältnis Z/A = 0,5 fast 40% Massenstromabnahme verursacht. Die Folge sind geringere raucharme Schichthöhen und höhere Temperaturen als bei der Bemessung vorausgesetzt wurden – einschließlich des Risikos eines Flash-overs, der verhindert werden sollte.



Bild 3.4-9: Einfluss der effektiven Zuluftflächen bezogen auf die effektive Abluftfläche bei natürlichen Rauchabzügen

Grundsätzlich sind Zuluftflächen so zu bemessen, dass die Zuluft die Rauchschicht nicht verwirbelt oder ansaugt. Um ansaugende /induzierende) Wirkung und Strahlwirkung zu vermeiden, müssen Zuluftöffnungen möglichst weit unterhalb von möglichen Rauchschichten angeordnet und die Zuluft mit niedriger Geschwindigkeit zugeführt werden. Eine Zuluftgeschwindigkeit von 3 m/s nach DIN 18232-5 sollte als oberster Grenzwert angesehen werden. Nach MORGAN et. al. [88] darf die Zuluftgeschwindigkeit in der Nähe von Rauchschichten nicht 1 m/s überschreiten. CZECH, DETZER und JUNG [21] stellten fest,

dass Atrien mit hoch liegenden Rauchschichten fast schlagartig verrauchten, wenn Zuluft mit 5 m/s oder 7 m/s zugeführt wurde. Bei einer Zuluftgeschwindigkeit von nur noch 0,5 m/s stellten sie keine Wechselwirkungen zwischen Zuluft und Abluft mehr fest. Sie empfehlen deshalb (wie MORGAN et. a.), Zuluftöffnungen so zu bemessen, dass die

Zuluftgeschwindigkeit nicht über 1 m/s

beträgt.

Wegen der großen Bedeutung ausreichend groß bemessener Zuluftöffnungen befassten sich RICHTER et. al. [98] in ihren Abschnitten "Modell der großen Öffnungen", "Besonderheiten bei Fenster und Türen" und "Ventilationsöffnungen für Brandräume" ausführlich mit der Frage der Luftnachströmung. Sie deckten auch die große Spannweite der vorliegenden Versuchsergebnisse auf. Für die "tägliche Arbeit" werden in der Praxis einfach handhabbare feste Vorgaben, wie sie die Weißdruckvorlage zu DIN 18232-2 bietet, bevorzugt. Die Tabelle 3.4-2 enthält diese Vorgaben zur Bewertung von Zuluftöffnungen. Die Werte dieser Tabelle stehen nicht mit den Ausführungen von RICHTER et. al. im Widerspruch. Sie sind für frei nachströmende Zuluft bei natürlichen und bei maschinellen Rauchabzügen anwendbar. Aus der Abmessung der Öffnung (in der Norm: Rohbauöffnung) und den Korrekturfaktoren c_z der Tabelle errechnen sich die wirksamen bzw. effektiven Flächen der Zuluftöffnungen. Die Verfasser dieses Berichtes empfehlen, die Tabelle mit dem geometrischen Öffnungsmaß im Einbauzustand zu verwenden, um die Imponderabilien durch z. B. beliebig breite Fensterlaibungen auszuschließen; es sei hier an den von Prof. GERHARDT im Normenausschuss NABau AA 00.35.00 stets vertretenen Korrekturfaktor "0,6" für scharfkantige Öffnungen, bezogen auf das geometrische (fertige) Öffnungsmaß, erinnert. THOMAS et. al. [88] bezeichnen "0,6" ebenfalls als typischen Wert für Zulufteinlässe.

Öffnungsart	Öffnungswinkel	Korrekturfaktor c _z		
Tür- oder Toröffnungen, Maschengitter	-	0,7		
öffenbare Jalousien	90°	0,65		
Dreh- und Kippflügel	90°	0,65		
Dreh- und Kippflügel	≥ 60°	0,5		
Dreh- und Kippflügel	≥ 45°	0,4		
Dreh- und Kippflügel	≥ 30°	0,3		

Tabelle 3.4-2: Korrekturfaktoren cz für Zuluftöffnungen nach [32]

Bezüglich der Lage von Zuluftöffnungen fordern MORGAN und GARDNER [86] mindestens 2 m Höhenunterschied und die Weißdruckvorlage zu DIN 18232 fordert mindestens 1 m Höhenunterschied zwischen der Oberkante der Zuluftöffnung und der Unterkante der Rauchschicht. Wo 2 m nicht einzuhalten ist, fordern MORGAN und GARDNER eine mindestens 3 m zurückversetzte Rauchschürze, um die Zuluftgeschwindigkeit "abzubauen",

bevor die Zuluft in den Bereich der Rauchschicht gelangt. DIN 18232 fordert mindestens 1,5 m Höhenunterschied für Zuluftöffnungen mit nach oben gerichteten Wetterschutzgittern.

Impulsarme Zuluftzuführung in Form von Quellauslässen führt zu größeren Druckverlusten als offen stehende Raumöffnungen. Voraussetzungen für Quellauslässe sind deshalb

- Maschinelle Rauchabzüge,
- hinreichende Gebäudedichtigkeit
- Begrenzung der Differenzdrücke um Fluchttüren benutzen zu können.

Bei maschinellen Rauchabzügen kann eine maschinelle Zuluft zu erheblichen Schwankungen der Differenzdrücke im Verlaufe eines sich ändernden Brandgeschehens führen. Dies wird durch das größere Volumen der erwärmten Abluft gegenüber der Zuluft verursacht.



Bild 3.4-10: Wirkung der Rauchschichttemperatur auf den erforderlichen Zuluftstrom bei maschineller Rauchabzugsanlage

Im Bild 3.4-10 wird für einen Brand in einem Großraumbüro mit 3,2 m lichter Höhe der sich mit der Rauchschichttemperatur ändernde Zuluftvolumenstrom dargestellt. Es wird dabei ein sich mit mittlerer Ausbreitungsgeschwindigkeit bis zum Bemessungsbrand nach Zeile 2.2 in Tabelle 3.2-16 entwickelnder Brand vorausgesetzt. Es werden mittels Ventilatoren konstant 31 m³/s abgesaugt, um eine mindestens 2,5 m hohe raucharme Schicht aufrecht zu erhalten. Dabei sinkt die nachströmende Zuluft von 31 m³/s auf 15 m³/s ab. Bei einer Auslegung der maschinellen Entrauchung für Temperaturen kurz vor dem Flash-over würde der notwendige Zuluftvolumenstrom sogar auf etwa 10 m³/s zurückgehen. Maschinelle Zuluftanlagen können in Verbindung mit maschinellen Abzugsanlagen dieses Problem nicht "meistern". MORGAN und GARDNER empfehlen deshalb, solche "push-pull systems" zu vermeiden und maschinelle Zuluft nur bei natürlicher Abluft dann zu verwenden, wenn mit freier Nachströmung die Entrauchung nicht beherrschbar wird.

3.4.6 Äußere Einflüsse

Auch alle äußeren Einflüsse, wie Wind, Schnee, Frost und erhebliche Temperaturunterschiede zwischen innen und außen, dürfen die Wirkung von Rauchabzügen nicht in Frage stellen.

Der Normentwurfsvorschlag zu EN 12101-5 [43] enthält in seinem Abschnitt "external influences" Hinweise zum Einfluss von Wind und von Schnee mit Verweisen auf Nachweisverfahren in anderen Teilen der Normenreihe EN 12101. Die Initiatoren des Teiles 5 – der Bemessungsnorm – wollten durch diese Verknüpfung den Teil 5 zu einem unumgänglichen Bestandteil der Normenreihe erheben, mit der Folge, den Mitgliedsstaaten in diesem Bereich die Planungshoheit zu entziehen (wie bereits ausgeführt, wurde die Bearbeitung des Teiles 5 eingestellt).

Ohne höhere Bauten in der Nachbarschaft wird auf Flachdächern bei Wind an allen Stellen Unterdruck herrschen, sodass bei thermisch angetriebenen natürlichen Rauchabzügen mit geeigneten Windleitblechen eine Erhöhung der Wirksamkeit erfolgen wird.

Bei maschinellen Abzügen mit nicht senkrechten Mündungen ist der Windeinfluss auch auf Flachdächern zu berücksichtigen.

Für andere Dachformen, bei Nachbarschaftsverbauung, bei topografischen Besonderheiten und bei Abzugsöffnungen ohne nachgewiesene Eignung für Wind wird man Planungssicherheit erst aufgrund von Modelluntersuchungen im Windkanal erhalten.

Der Einfluss tiefer winterlicher und hoher sommerlicher Außentemperaturen führt zu einer Schornsteinwirkung, die sich mit zunehmender Gebäudehöhe stärker auswirkt. Diese Problematik ist im Teilband B dieses Forschungsberichtes – allerdings im Zusammenhang mit innen liegenden Sicherheitstreppenräumen in hohen Gebäuden – behandelt. Die Physik und die Auswirkungen bleiben aber gleich.

Schnee kann den Bewegungsbereich von Abzugsklappen "verstopfen" und den Öffnungskräften entgegen wirken. Eine schneesichere Bemessung ist vom Standort, der Gebäudenutzung und der Ausführung der Abzüge bzw. deren Mündungen sowie deren unmittelbarer Umgebung abhängig.

MORGAN et. al. erwähnen, dass zur Unterdruckhaltung in einem Atrium mittels maschineller Abzüge die größte für die Bemessung maßgebende Windgeschwindigkeit bei der Auslegung der Ventilatoren zu berücksichtigen sei. Sie verwiesen auf Literatur von MORGAN und HANSELL aus dem Jahre 1990.

Bauteilbezogene Anforderungen gegen die Wirkung äußerer Einflüsse finden sich im Abschnitt 5.3.2 dieses Berichtes.

3.5 Ungeeignete Bemessungsansätze

Der Wunsch nach überschlägigen Bemessungsansätzen ist verständlich und führte in der Praxis häufig zum Versuch, das Brandrisiko in einer baulichen Anlage allein über die Brandlast zu beurteilen und über Luftwechselansätze die Lösung zu finden. Dass dies ein gefährliches Unterfangen ist, soll im Folgenden dargestellt werden.

3.5.1 Brandlastansatz

Ein Palettenstapel mit den Abmessungen $(1,22 \times 1,22 \times 1,22)$ m nach Bild 3.5-1 besteht aus ca. 220 kg Nadelholz. Der Abbrand erfolgt nach BABRAUSKAS [10] bis zum Einsturz in ca. 12 Minuten mit einer Brandleistung bis 3.700 kW. Wie in Tabelle 3.5-1 dargestellt, verkörpert ein Holzwürfel mit den gleichen Außenabmessungen wie die Palette fünfmal so viel Brandlast wie der Palettenstapel, brennt aber mit einer Brandleistung von maximal 1.050 kW ab. Die Branddauer wird allerdings mehr als 12 Stunden betragen. Werden nun Paletten 6,1 m hoch gestapelt, verkörpern diese die Brandlast des soeben besprochenen Würfels. Die maximale Brandleistung steigt auf 14.000 kW an, das ist fast die 14-fache Brandleistung des Würfels mit gleicher Brandlast. Die Ergebnisse zeigen, dass die Heftigkeit und damit die Gefährlichkeit eines Brandes wesentlich von der Oberfläche des Brandgutes und nur untergeordnet von der Brandlast abhängen. Die Brandlast ist der die Branddauer bestimmende Faktor.



Bild 3.5-1: Typischer Palettenstapel und seine Energiefreisetzung im Brandfalle (Brandleistung) nach BABRAUSKAS [10]

Geometrie	kompakter Würfel ⁴⁵ h=1,22 m	Paletten- Stapel h=1,22 m	Paletten- Stapel h=6,1 m	
Masse m [kg]	1100	220	1100	
Brandlast <i>Q</i> [MJ]	19.080	3.815	19.080	
max. Brandleistung \dot{Q}_{max} [kW]	1050	3700	14000	
max. spezifische Brandleistung $\dot{q}_{f,max}$ [kW/m ²]	700	2470	9300	
Abbranddauer τ_{Brand}	>12 h	≈12 min ⁴⁶		

Tabelle 3.5-1: Einfluss vor	Stapeldichte und –höhe auf	das Brandgeschehen
-----------------------------	----------------------------	--------------------

3.5.2 Luftwechselansatz

In einer Halle mit 8 m Höhe entwickle sich nach den Festlegungen in DIN 18232-5 während 10 Minuten ein Brand mit mittlerer Brandausbreitungsgeschwindigkeit und einer spezifischen Brandleistung von 600 kW/m². Anders als in DIN 18232-5 soll die rauchfreie Schichtdicke nicht nur am Ende der Brandentwicklungsdauer sondern noch nach 30 Minuten eingehalten werden. Die Bemessung führt bei der langen Beurteilungszeit von 30 Minuten unabhängig von der Rauchabschnittsgröße zu den gleichen abzuführenden Volumenströmen. Bei der Angabe von Luftwechselzahlen müssen sich diese Werte im gleichen Verhältnis wie die Rauchabschnittsgrößen unterscheiden. Es folgt:

die Luftwechselzahl ist kein Maß zur Bemessung maschineller Entrauchungsanlagen.

Tabelle 3.5-2: Für den Rauchabzug ist die Luftwechselzahl kein Maß(Beispiel: Halle 8 m hoch)

erwartete Brandentwicklungsdauer τ_{Entw} in min		10			
Brandausbreitungsgeschwindigkeit nach DIN 18232 mittel		ttel			
maximale Brandfläche $A_{\rm f}$ in m ²	20				
Rauchabschnittsfläche $A_{\rm R}$ in m ²	400	400	1600	1600	
angestrebte Dicke <i>d</i> der raucharmen Schicht in m nach 30 Minuten	4	5	4	5	
notwendiger Volumenstrom \dot{V}_A in m ³ /s	45	53	45	53	
Luftwechselzahl in h ⁻¹	50	60	13	15	
Luftwechselzahl in h ⁻¹ , bezogen auf raucharmes Raumvolumen	100	95	25	24	

⁴⁵ Nadelholz, mit $H_u = 17,35$ [MJ/kg] gerechnet.

⁴⁶ Zeit bis zum Einsturz des Stapels.

4 Bemessung von Entrauchungsanlagen

4.1 Grundsätzliches

Anlagen zur Ableitung von Rauch aus Gebäuden (Entrauchungsanlagen und Druckbelüftungsanlagen) sind immer Bestandteil eines Brandschutzkonzeptes und als solcher zu dokumentieren. Die im Jahre 2000 veröffentlichte VFDB-Richtlinie "Brandschutzkonzepte" [126] kann als Leitfaden herangezogen werden. Die in diesem Bericht bereitgestellten Algorithmen sind für die ingenieurmäßige Bemessung von natürlichen und maschinellen Entrauchungsanlagen im vorausgesetzten stationären Zustand vorgesehen. Mit der Zeit anwachsende Brände sind deshalb mit ihrer Brandleistung zum Zeitpunkt der angesetzten Brandentwicklungsdauer in die Rechnung einzusetzen. Die Algorithmen sind überschaubar genug, um sie in Handrechnungen oder in Tabellenkalkulationen (z. B. Microsoft Excel) anzuwenden. Erfahrungsgemäß sind unterschiedliche Brandszenarien unter unterschiedlichen Gesichtspunkten jeweils konservativ (auf der sicheren Seite) zu untersuchen, sodass Handrechnungen nur für stichprobenartige Überprüfungen empfohlen werden können.

4.2 Schritt-für-Schritt-Bemessung

Nach

- der Beschreibung der Schutzziele und
- der Formulierung der Anforderungen sind
- den Situationen angepasste Bemessungsbrände zu wählen.
- Die Massenströme der abzuführenden Rauchgase werden mit den Plume-Formeln für den Plume über dem Brandherd bis hin zum Überström-Plume für jede Stelle innerhalb der baulichen Anlage bestimmt.
- Zusammen mit dem konservativ anzusetzenden verbliebenen Energieinhalt im abzuführenden Rauchgas erhält man die Temperatur des Rauchgases.

Die Bemessung für den vorausgesetzten stationären Zustand, das heißt unter Vernachlässigung der Speicherwirkung großer Rauchabschnitte, führt

- für natürliche Entrauchungsanlagen bei festgelegtem Verhältnis der effektiv wirksamen Zu- und Abluftflächen mit Hilfe der **Durchflussformel** unmittelbar zur Bemessung der erforderlichen effektiven Zuluft- und Abluftflächen,
- 2) für natürliche Entrauchungsanlagen bei nicht festgelegtem Verhältnis der effektiv wirksamen Zu- und Abluftflächen mit Hilfe der Durchflussformel iterativ zur Bemessung der erforderlichen effektiven Zu- und Abluftflächen und

 für maschinelle Entrauchungsanlagen mit der Dichte der Rauchschicht unmittelbar zur Bemessung der erforderlichen Abluftvolumenströme und der erforderlichen Zuluftflächen.

Die Durchflussformel ist durch Gleichsetzen der Summe der Druckverluste in den Zuluftöffnungen

$$\Delta p_{Z} = \frac{1}{2\rho_{\infty}} \left(\frac{\dot{m}_{A}}{A_{Z,\text{eff}}}\right)^{2} \text{ [Pa]}$$
(4.2-1)

und in den Abluftöffnungen

$$\Delta p_{\rm A} = \frac{1}{2 \rho_{\infty}} \frac{T_{\rm S}}{T_{\infty}} \left(\frac{\dot{m}_{\rm A}}{A_{\rm Z,eff}} \right)^2 \quad [\rm Pa]$$
(4.2-2)

mit dem verfügbaren Auftriebsdruck der thermischen Rauchschicht

$$\Delta p_{\text{therm}} = \rho_{\infty} g d_{\text{S}} \left(1 - \frac{T_{\infty}}{T_{\text{S}}} \right) \quad [\text{Pa}]$$
(4.2-3)

mit der BERNOULLI-Gleichung abzuleiten. Nach umfangreicher Rechnung erhält man die Durchflussformel für den **Rauchgasmassenstrom** bei gegebenen Abzugsflächen

$$\dot{m}_{\rm A} = \frac{A_{\rm A,eff} \rho_{\infty} \sqrt{2 g d_{\rm S} \theta_{\rm S} T_{\infty}}}{T_{\rm S} \sqrt{1 + \frac{T_{\infty}}{T_{\rm S}} \left(\frac{A_{\rm A,eff}}{A_{\rm Z,eff}}\right)^2}} \quad [\rm kg/s]$$
(4.2-4).

Durch Umstellen dieser Gleichung erhält man die **notwendigen Abzugsflächen** für einen gegebenen Massenstrom zu

$$A_{\rm A,eff} = \frac{\dot{m}_{\rm A} T_{\rm S} \sqrt{1 + \frac{T_{\infty}}{T_{\rm S}} \left(\frac{A_{\rm A,eff}}{A_{\rm Z,eff}}\right)^2}}{\rho_{\infty} \sqrt{2 g \, d_{\rm S} \theta_{\rm S} T_{\infty}}} \quad [\rm{m}^2]$$
(4.2-5).

Die Durchflussformel wird in der englischen und in der US-amerikanischen Literatur "through-flow formula" bezeichnet.

Bei nicht festgelegtem Verhältnis der effektiv wirksamen Zu- und Abluftflächen verwendet man die Durchflussformel zunächst mit einem frei gewählten "Schätzwert" für das Flächenverhältnis und "verbessert" das gesuchte Ergebnis schrittweise mit neuen Schätzwerten, um zum notwendigen Massenstrom, zu den verfügbaren Zu- bzw. Abluftflächen oder infolge der Verschiebung der Druckverluste zur angestrebten Lage der druckneutralen Ebene zu gelangen.

Der notwendige Volumenstrom von maschinellen Rauchabzügen ergibt sich aus dem erforderlichen Rauchgasmassenstrom und dessen Dichte bzw. Temperatur zu

$$\dot{V}_{\rm A} = \frac{\dot{m}_{\rm A}}{\rho_{\rm A}} = \frac{\dot{m}_{\rm A}}{\rho_{\infty}} \frac{T_{\rm A}}{T_{\infty}} \quad [\rm kg/s] \tag{4.2-6}$$

Die Geschwindigkeit wz in den Zuluftöffnungen ergibt sich zu

$$w_{\rm Z} = \frac{1}{\rho_{\infty}} \frac{\dot{m}_{\rm A}}{A_{\rm Z,eff}} \, [{\rm m/s}]$$
 (4.2-7)

Die Lage der druckneutralen Ebene (engl.: neutral pressure plane oder NPP) ist an Hand von Bild 3.4-1 einfach abzuleiten. Sie liegt in der Höhe z_{NPP}

$$z_{\rm NPP} = d + \frac{1}{2\rho_{\infty}^2 g \left(1 - \frac{T_{\infty}}{T_{\rm S}}\right)} \left[\frac{\dot{m}_{\rm A}}{A_{\rm Z,eff}}\right]^2 \ [m]$$
(4.2-8).

Tabelle 4.2-1: Beispiele für die konservative Berücksichtigung des Energieinhaltes im Rauchgas

Berechnung für:	Energieinhalt konservativ		
Personenschutz	hoher Energieinhalt		
Bauteilbeanspruchung	hoher Energieinhalt		
Beurteilung, ob Flash-over erfolgen wird	hoher Energieinhalt		
maschineller Rauchabzug	hoher Energieinhalt und Vernachlässigung von Sprinklerkühlung		
natürlicher Rauchabzug	niedriger Energieinhalt und starke Kühl- wirkung durch Sprinkler		

Für den natürlichen Rauchabzug wird man in den meisten Fällen Rechnungen mit hohem Energieinhalt des Rauchgases für die Schutzziel orientierte Auslegung und mit niedrigem Energiegehalt des Rauchgases für die Beurteilung der ausreichenden Funktion vornehmen müssen.

Ausdrücklich wird hier angemerkt, dass die immer wieder erwähnte konservative – jeweils auf der sicheren Seite liegende – Bemessung nicht ein Misstrauen in die Rechenverfahren ausdrückt, sondern der Berücksichtigung der möglichen realen Brandabläufe dient. Die Entrauchungsanlagen müssen schließlich nicht nur an einem Bemessungspunkt den Schutzzielen gerecht werden.

HEINS [55] hat **natürlichen Rauchabzug über Schächte** untersucht. Er fand eine ähnliche Charakteristik heraus wie bei natürlichem Rauchabzug über Abzugsöffnungen. Dies muss nicht verwundern, da mit zunehmender Temperatur zwar eine Volumenstromzunahme erfolgt, aber gleichzeitig der Antrieb durch den erhöhten Schornsteineffekt wächst.

Bei natürlichen und bei maschinellen Rauchabzügen über **sehr hohe Schächte** können die Druckverhältnisse in einem Gebäude empfindlich gestört und die Benutzbarkeit von Flucht- und Rettungswegen beeinträchtigt werden.

4.3 Bemessung nach DIN 18232-2

Die Bemessungstabellen der Weißdruckvorlage zu DIN 18232-2 entstanden ebenfalls für den stationären Fall Schritt für Schritt bis hin zur Anwendung der Durchflussformel, um in Tabellenform die notwendigen effektiven Abluftflächen angeben zu können (MAX und BREIN [77]. Die Tabellen sind im Gegensatz zu früheren Ausgaben der Norm rechnerisch nachvollziehbar geworden. Die Massenströme wurden jedoch nicht aufgenommen, da der Anwender der Norm auf deren Kenntnis nicht angewiesen ist. Den Verlauf der Rauchgasmassenströme in Abhängigkeit von der Rauchschichttemperatur (präziser: in Abhängigkeit von der Übertemperatur über der Umgebungstemperatur) bei einer Bemessung nach dieser Norm zeigt Bild 4.3-1.



Bild 4.3-1: Rauchgasmassenstrom in Abhängigkeit von der Rauchschichttemperatur bei einer Bemessung nach DIN 18232-2

Die stichprobenartige Überprüfung der sich einstellenden Strömungsgeschwindigkeiten in den Zuluftöffnungen durch die Verfasser dieses Berichtes ergab, dass in hohen Räumen mit niedriger raucharmer Schicht die Zuluftgeschwindigkeit über 3 m/s beträgt. In niedrigen Räumen stellen sich bei gleicher raucharmer Schichthöhe geringere Strömungsgeschwindigkeiten ein, weil wegen der geringeren Rauchschichtdicken größere Flächen erforderlich sind. Aufgrund der heutigen Erkenntnisse darf die Geschwindigkeit der Zuluft in der Nähe der Rauchschicht – wie bei geringen raucharmen Schichtdicken zutreffend – 1 m/s nicht überschreiten; vergl. Abschnitt 3.4.5). Die erlaubte Reduktion der Zuluftöffnungen bei gleichzeitiger Vergrößerung der Abluftflächen führt sogar noch zu 50% höheren Zuluftgeschwindigkeiten.

4.4 Bemessung nach DIN 18232-5

Die maschinelle Entrauchung wirkt sofort nach der Einschaltung bzw. Auslösung in vollem Maße. Der zuständige Normenausschuss stimmte zu, die sofortige Wirksamkeit maschineller Rauchabzüge zu "honorieren". Anstelle einer stationären Bemessung durfte die Speicherwirkung der Rauchschicht berücksichtigt und der Beurteilungszeitpunkt zeitgleich mit der erwarteten Brandentwicklungsdauer gesetzt werden. Außerdem "verlangte" der Ausschuss die Anwendung der temperaturabhängigen spezifischen Wärmekapazität für die Rauchgase.

Die Gleichsetzung des Beurteilungszeitpunktes mit der Brandentwicklungsdauer und die Anwendung der temperaturabhängigen spezifischen Wärmekapazität (über deren Einfluss im Abschnitt 3.2.1.2 berichtet wurde) führte zum Teil zu deutlich niedrigeren notwendigen Volumenströmen in DIN V 18232-5 [34], als sie sich bei stationärer Berechnung ergeben hätten.

In der Folgezeit zeigte sich jedoch bei konkreten Bauvorhaben, dass der abwehrende Brandschutz (die Feuerwehren) trotz häufig frühzeitiger Erkennung des Brandherdes und Begrenzung des Brandflächenwachstums mindestens während 30 min die Anforderungen an die Entrauchung erfüllt haben will. Dieser Umstand spricht für eine Überarbeitung von DIN 18232-5, die mit der wesentlich einfacheren stationären Rechenmethode vorgenommen werden könnte.

4.5 Bemessungsbeispiel

Es werden Brände bei ungesprinklerter Büronutzung in Räumen oder überdachten Innenhöfen untersucht. Der Bemessungsbrand hat nach MORGAN et. al. [88] (siehe Tabelle 3.2-16) eine Brandherdfläche $A_f = 47 \text{ m}^2$ und einen Brandherdumfang P = 24 m. Die konvektiv abzuführende Wärmeleistung beträgt $\dot{Q}_f = 6.000 \text{ kW}$.

Bis zur Höhe $z_1 = 3 \times \sqrt{A_f} = 20,6$ m kann die Formel (3.3-10) für den Plume über großem Feuer mit der Einmischkonstanten $C_E = 0,188$ für Großraumbüros und $C_E = 0,337$ für zellenartige Büros angewendet werden (Kriterium für die Wahl von C_E : siehe Tabelle 3.3-3 im Abschnitt 3.3.1.2). Im Bild 4.5-1 sind die abzuführenden Rauchgasmassenströme und die zugehörigen Rauchschichttemperaturen in Abhängigkeit von der Höhe über dem Brandherd bzw. der Höhe der raucharmen Schicht *d* eingetragen.



Bild 4.5-1: Bemessungsbeispiel Brand im Großraumbüro und im Einzelbüro

Aus dem Bild ist abzulesen:

- die Gefahr eines Flash-over besteht im Großraumbüro bei einer raucharmen Schicht $d \le 1,7$ m,
- für Menschen zuträgliche Strahlungsverhältnisse (maximal 200°C Rauchschichttemperatur) müsste im Großraumbüro eine mindestens 3,7 m hohe raucharme Schicht bestehen (diese Höhe kann nur bei Büronutzung in überbauten Innenhöfen verwirklicht werden),
- die abzuf
 ührenden Massenstr
 öme m
 üssen m
 indestens 30 kg/s betragen, um die Rauchschichttemperatur auf 200°C zu begrenzen.

5 Hinweise zur Ausführungsplanung von Entrauchungsanlagen

5.1 Allgemeines

In der europäischen Normenreihe EN 12101 (deutscher Titel: Rauch- und Wärmefreihaltung) behandelt der Teil 4 Ausführungsregeln für natürliche und maschinelle Entrauchungsanlagen. Ein Entwurf wurde 2002 zur Stellungnahme veröffentlicht [42]. Ein deutsches Pendant als Norm oder Richtlinie existiert nicht.

Der schematische Ablauf der Ausführungsplanung beginnt mit der Bemessung und mündet in der Auswahl geeigneter Bauprodukte und Bauarten, wie dies in Bild 5.1-1 dargestellt ist. Die Beurteilung ausgeführter Anlagen ist ein schwieriges Unterfangen, da Abnahmeprüfungen praktisch nur bei normalen Umgebungstemperaturen ausgeführt werden. Abnahmeprüfungen mit thermischer Belastung werden heute teilweise gefordert und auch ausgeführt. Im Falle von maschinellen Rauchabzugsanlagen und bei Kabelanlagen mit Funktionserhalt kann dies zu Schädigungen führen, die das Versagen der Sicherheitsanlagen im Ernstfall vorprogrammieren.



Bild 5.1-1: Von der Bemessung zu geeigneten Bauprodukten und Bauarten

5.2 Natürliche Entrauchungsanlagen

Unter natürlichen Entrauchungsanlagen werden fast ausschließlich Bauprodukte mit der Bezeichnung "Horizontal eingebaute Rauchabzüge" (derzeit nach Bauregelliste A Teil 2, lfd. Nr. 2.13) [24] verstanden, die bislang bevorzugt im Industriebau eingesetzt waren. Die derzeit gültige Bauregelliste schreibt als Verwendbarkeitsnachweis hierfür ein allgemeines bauaufsichtliches Prüfzeugnis vor. Dort sind Verwendungs- bzw. Einbaubestimmungen enthalten. Einbauhinweise enthält außerdem DIN 18232-2; teilweise sind zusätzlich VdS-
Richtlinien zu beachten. Bei diesen Rauchabzügen handelt es sich überwiegend um kuppelartige Rauchabzüge, die meist zugleich der Belichtung und der Belüftung der Räume dienen.

Für andere Ausführungsformen von natürlichen Rauchabzügen, insbesondere auch für senkrecht eingebaute Abzüge, bedarf es Verwendbarkeitsnachweisen nach § 22 der MBO [5] (§ 22 Nachweis der Verwendbarkeit von Bauprodukten im Einzelfall).

5.3 Maschinelle Entrauchungsanlagen

Über die an Bauteile von maschinellen Entrauchungsanlagen (Rauchabzugsanlagen; auch für hohe Temperaturen ohne den Begriff "Wärmeabzugsanlagen" zu verwenden) entsprechend dem fortschreitenden Entwicklungsstand zu stellenden Anforderungen hat ZITZELS-BERGER mehrfach berichtet ([132], [133] und [136]).

5.3.1 Bestandteile maschineller Entrauchungsanlagen

Maschinelle Rauchabzugsanlagen sind beim flüchtigen Hinsehen nicht von Lüftungsanlagen bzw. RLT-Anlagen zu unterscheiden. Diese Tatsache verführt zu der bei RLT-Anlagen gewohnten planerischen Großzügigkeit. Fehlbeurteilungen durch die am Bau Beteiligten während der Planung und hinsichtlich der Leistungsfähigkeit konventioneller Lüftungsanlagenbauteile führen leider in vielen Fällen zu unnötigen Risiken oder gar zu erheblichen Gefahren.

Bild 5.3-1 zeigt schematisch eine maschinelle Rauchabzugsanlage mit einigen ihrer Einzelteile. Für die Einzelteile werden national und europaweit vorgesehene Bezeichnungen verwendet, um die Unterschiede zu raumlufttechnischen Anlagen zu verdeutlichen:

- 1 Entrauchungsventilatoren mit Motor und mit elastischem Anschlussstutzen für den Leitungsanschluss (optional sind Wetter- und Vogelschutzgitter oder -klappen, z.B. bei Dachventilatoren, und Schwingungsdämpfer, wenn die Ventilatoren auch für die tägliche Lüftung eingesetzt werden)
- 2 Entrauchungsleitungen innerhalb eines Brandbereiches
- 3 Entrauchungsleitungen, die feuerwiderstandsfähig sein müssen
- 4 Entrauchungsklappen, die feuerwiderstandsfähig sein müssen
- 5 Mündung mit Wetterschutz und Vogelschutz (nicht, wenn im Ventilator integriert)
- 6 Stromversorgung, Melde- und Steuerleitungen
- 7 Rauchmelder
- 8 Rauchschürzen
- 9 Zuluftöffnungen.



Bild 5.3-1: Bauteile einer maschinellen Rauchabzugsanlage

Weitere Bauteile sind:

- Rauchabzugsöffnungen in Entrauchungsleitungen
- Entrauchungsklappen, die nicht feuerwiderstandsfähig sein müssen
- Zuluftleitungen, die feuerwiderstandsfähig sein müssen (z.B. wenn die Zuluft über Leitungen durch andere Brandbereiche geführt wird)
- Zuluftklappen, die feuerwiderstandsfähig sein müssen
- Dehnungskompensatoren in Entrauchungsleitungen (z.B. wenn die Leitungen aus Stahl bestehen)
- Verschlussklappen
- Schalldämpfer (z.B. wenn die Ventilatoren auch für die tägliche Lüftung eingesetzt werden).

5.3.2 Anforderungen an die Bauteile maschineller Entrauchungsanlagen

5.3.2.1 Anforderungen an Entrauchungsventilatoren

Entrauchungsventilatoren stehen heute in verschiedenen Ausführungsformen zum Aufstellen im Freien am Dach oder an Außenwänden, in ausreichend gelüfteten Aufstellungsräumen (Entrauchungszentralen) und seit wenigen Jahren auch innerhalb des zu entrauchenden Bereiches zur Verfügung. Es bestehen zahlreiche Einzelanforderungen.

a) Temperatur-Zeit-Beanspruchung (DIN EN 12101-3 [28])

Bild 5.3-2 zeigt die Temperatur-Zeit-Beanspruchung von Entrauchungsventilatoren. Die Kreise kennzeichnen die Temperatur-Kategorien nach DIN V 18232-6 [35], die Rauten kennzeichnen die Klassen nach DIN EN 12101-3. Die ausgezogenen Linien kennzeichnen das heute bereits bestehende Marktangebot (Vollbrandkurve bis zu 90 Minuten).



Bild 5.3-2. Temperatur-Zeit-Beanspruchung von Entrauchungsventilatoren

b) Volumenstrom (DIN EN 12101-3 [28])

Der Volumenstrom von Entrauchungsventilatoren darf sich während des Rauchabzugsbetriebes bis zu 10 % verringern. Es wird deshalb angeraten, bei der

Volumenstrombemessung der Entrauchungsventilatoren 10% aufzuschlagen.

c) Wärmedämmung (DIN EN 12101-3 [28])

Ventilatoren, die die Kriterien der Wärmedämmung erfüllen, dürfen

in belüfteten Aufstellungsräumen

(außerhalb des Brandraumes) aufgestellt werden. Über die notwendige Belüftung von Aufstellungsräumen haben KRÜGER et. al. 1983 berichtet [74].

d) Schneelast (DIN EN 12101-3 [28])

Entrauchungsventilatoren, die im Freien aufgestellt werden (Dach- und Wandventilatoren), werden nach Schneelastklassen von SL 0 bis SL 1000 unterschieden. Die Zahl besagt die zulässige Schneelast in N/m² Fläche der Auslassöffnungen. Ventilatoren der Schneelastklasse SL 0 dürfen nur für beheizte Gebäude verwendet werden.

e) Eignung für Lüftungsbetrieb (DIN EN 12101-3 [28])

Die Motoren von Entrauchungsventilatoren, die auch für den Lüftungsbetrieb eingesetzt werden sollen, müssen zur Begrenzung der Alterung der Wicklung weniger ausgelastet werden als ihrer Wärmeklasse entspräche (10 K niedrigere Betriebstemperatur führt etwa zu einer Verdoppelung der Lebensdauer). Bisher wurden an der TU München von den Verfassern keine Entrauchungsventilatoren ausschließlich für den Entrauchungsfall sondern immer auch für den täglichen Lüftungsbetrieb geprüft

f) Rauchmelder (bisher nur durch allgemeine bauaufsichtliche Zulassung geregelt)

Rauchabzugsanlagen erfüllen ihre Aufgabe meist nur bei automatischer Inbetriebnahme. In der BRD werden deshalb Zulassungen für Entrauchungsventilatoren in Verbindung mit Rauchmeldern erteilt.

g) Elastische Stutzen (bisher nur durch allgemeine bauaufsichtliche Zulassung geregelt)

Für Entrauchungsventilatoren, die sich zum Anschluss an Leitungen eignen (z.B. weil Anschlussflansche vorhanden sind), sind elastische Stutzen erforderlich. Sie müssen der Temperatur und dem Differenzdruck standhalten, müssen mindestens 50 mm axiale und mindestens 25 mm radiale Verschiebung aufnehmen können und dabei ausreichend dicht bleiben. Einzelheiten werden im Rahmen des Zulassungswesens geregelt.

Die Bedeutung elastischer Stutzen zum Anschluss von Entrauchungsventilatoren verdeutlicht Bild 5.3-3. Erhebliche Querbewegungen infolge Versagens von Schwingungsdämpfern könnten das Versagen der gesamten maschinellen Entrauchungsanlage bewirken.



Bild 5.3-3: Elastische Stutzen für Längs-, Quer- und Vibrationsbewegungen

h) Schwingungsdämpfer (bisher nur durch allg. bauaufsichtliche Zulassung geregelt)

Vor wenigen Jahren wurden an der TU München erstmals Entrauchungsventilatoren zum Einbau innerhalb des Brandraumes durch die Verfasser erfolgreich untersucht; inzwischen ist diese Einsatzmöglichkeit für verschiedene Bauarten eine Selbstverständlichkeit geworden (z.B. für Entrauchungsventilatoren in Tiefgaragen; Ventilatoren in Katengeräten). Besondere Anforderungen ergeben sich dabei für Schwingungsdämpfer, weil sie ungeschützt der jeweiligen Temperaturbeanspruchung ausgesetzt sind. So muss das Temperatur bedingte Einsinken von Federstahlschwingungsdämpfern durch geeignete Konstruktionen begrenzt werden, um ein Versagen der Anlage aufgrund dieser nebensächlich erscheinenden kleinen Bauteile zu verhindern. Bild 5.3-4 zeigt einen Schwingungsdämpfer mit Alu-Guss-Gehäuse vor und nach einem Brandversuch bei 600°C; der mechanisch belastete Schwingungsdämpfer hat – erwartungsgemäß – versagt.



Bild 5.3-4: Schwingungsdämpfer mit Alu-Guss-Gehäuse vor und nach Brandversuch bei 600°C (versagt)

Ein vorgespannter Schraubenfeder-Schwingungsdämpfer mit kleinen freien Abständen zwischen den einzelnen Windungen konnte sich nur bis zum Aufsitzen der Windungen verformen und war deshalb als "geeignet" einzustufen. **Bild 5.3-5** zeigt den mechanisch belasteten Schwingungsdämpfer vor und nach einem Brandversuch bei 600.



Bild 5.3-5: Vorgespannter Schraubenfeder-Schwingungsdämpfer aus Stahl vor und nach Brandversuch bei 600°C

5.3.2.2 Anforderungen an elektrische Anlagen mit Funktionserhalt

Der Funktionserhalt von Kabelanlagen zur Inbetriebsetzung und zum Betrieb der Rauchabzugsanlage ist zwingende Voraussetzung. Der Funktionserhalt nach DIN 4102-12 [27] schließt jedoch **nicht** den **Funktionserhalt von Kabelanschlüssen an Verbraucher** (wie Motoren innerhalb des heißen Brandgasstromes) ein; Regelungen hierzu finden sich derzeit nur in den allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassungen für die Entrauchungsventilatoren.

bisher nur durch allg. bauaufsichtliche Zulassung geregelt:

Der Funktionserhalt von Kabelanschlüssen an Verbraucher im Brandraum oder im Brandgasstrom ist weder durch Kabel mit Funktionserhalt nach DIN 4102-12 noch durch die Festlegungen in der Muster-Leitungsanlagen-Richtlinie MLAR [23] gesichert bzw. geregelt. Die Angaben der Prüfberichte der Prüfstelle hierzu sind deshalb in die allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassungen für die Motoren bzw. Ventilatoren aufzunehmen.

5.3.2.3 Anforderungen an Entrauchungsklappen

(bisher nur durch allgemeine bauaufsichtliche Zulassung geregelt; in Vorbereitung: DIN EN 166-10)

Entrauchungsklappen dienen der Steuerung der abzusaugenden Rauchgasströme. Es werden Klappen unterschieden, die entweder in den Querschnitt von Leitungen oder in Öffnungen an der Oberfläche von Leitungen eingebaut werden.

Entrauchungsklappen müssen auch noch nach 25 Minuten Brandeinwirkung gegen einen Differenzdruck von 1500 Pa bzw. eine Strömungsgeschwindigkeit von 10 m/s in der laufenden Rauchabzugsanlage fernbedient zuverlässig öffnen können. Zum Rauchabzug geöffnete Rauchabzugsklappen müssen ihren Querschnitt beibehalten. Rauchabzugsklappen, die geschlossen bleiben müssen (z.B. um einen gezielten Rauchabzug an anderen Stellen zu ermöglichen oder andere Brandbereiche zu schützen), müssen ausreichend dicht bleiben. Brandschutzklappen dürfen nicht als Entrauchungs- oder Zuluftklappen in Rauchabzugsanlagen eingesetzt werden. Die missbräuchliche Nutzung in Verbindung mit meist gefährlicher Manipulation der Funktionsweise führt zum Verlust der allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung. Der Einsatz von Brandschutzklappen anstelle von Entrauchungsklappen führt häufig zu erheblichen Gefahren. Tabelle 5.3-1 verdeutlicht die Unterschiede zwischen Brandschutzklappen und Entrauchungsklappen. Für Entrauchungsklappen sind deshalb auch eigene Nachweise nötig.

Bauteil ⇒	Absperrvorrichtung	Entrauchungsklappe	
Klassifikation ⇔	K 30 K 90		ERK 30 ERK 90
Anforderung	zum Schutz anderer <i>Brand</i> bereiche	innerhalb eines <i>Brand</i> bereiches	zum Schutz an- derer <i>Brand-</i> bereiche
Schutz anderer Bereiche	zu	zu	zu
Entrauchung	unzulässig (zu)	offen	offen
sicheres Schließen	durch Strömung unterstützt; M _{Motor} ≈ 11 Nm ⁴⁷	in anderen Bereichen sicher ge- schlossen bleiben	
sicheres Öffnen		durch Strömung erschwert; $M_{Motor} \approx 36 \text{ Nm}^{47}$	

Tabelle 5.3-1: Merkmale von Brandschutzklappen und Entrauchungsklappen

Man unterscheidet Entrauchungsklappen nach der Einbaustelle

- innerhalb des Leitungsquerschnittes und zwar innerhalb oder außerhalb von Wänden und Decken angeordnet oder
- in der Oberfläche von Entrauchungsleitungen angeordnet

und nach dem Feuerwiderstand

- ohne Feuerwiderstand (genauer: ohne Dämmwirkung) nur zum Einbau innerhalb eines Brandbereiches (Brandabschnitt oder Geschoss) und
- mit Feuerwiderstand zum Schutz anderer Brandbereiche.

Die Leckage geschlossener Entrauchungsklappen außerhalb eines zu entrauchenden Rauchabschnittes darf höchstens 200 m³/h je 1 m² Querschnittfläche betragen, wenn Prüfklappen

- bei Umgebungstemperatur mit 1500 Pa Differenzdruck und
- bei Brandprüfungen mit 500 Pa Differenzdruck

geprüft werden. Die Prüftemperatur für Entrauchungsklappen ohne Feuerwiderstand beträgt je nach vorgesehenem Einsatzbereich 300°C oder 600°C, für Klappen mit Feuerwiderstand folgt sie der Einheits-Temperaturzeitkurve DIN EN 1363-1 [25].

5.3.2.4 Anforderungen an Verschlussklappen

(bisher weder durch allgemeine bauaufsichtliche Zulassung noch durch einen anderen Nachweis geregelt; derzeit auch keine Prüfanforderung in Vorbereitung)

⁴⁷ Drehmomentangabe für 90°-Antriebe.

Durch Schwerkraft schließende und durch die Rauchgasströmung öffnende Verschlussklappen werden in maschinellen Rauchabzuganlagen eingesetzt, um bei Abschaltung der Anlage eine Gebäudedurchlüftung zu vermeiden. Ein "Zufallsergebnis" einer Brandprüfung wies auf die Problematik hin: die Stellkräfte zur Öffnung der Klappen sinken mit zunehmender Rauchgastemperatur ab; bei einer Rauchgastemperatur von 300°C beträgt die Dichte des Brandgases nur noch 50% der Dichte bei normaler Raumtemperatur. Die Öffnungskräfte für die Klappen sind damit ebenfalls halbiert. Dies kann sich entscheidend auf den Volumenstrom der maschinellen Entrauchungsanlage auswirken, wie das vergleichende Bild 5.3-6 aus zwei Brandversuchen (mit und ohne Klappe) zeigt.



Bild 5.3-6: Einfluss einer Schwerkraft-Verschlussklappe auf den Volumenstrom beim Temperaturanstieg von 20°C auf 600°C

5.3.2.5 Anforderungen an Entrauchungsleitungen

(DIN V 18232-6 [35]; in Vorbereitung: DIN EN 1366-8 und DIN EN 1366-9)

Entrauchungsleitungen müssen nach DIN V 18232-6 im Brandfalle ausreichend dicht bleiben und ihren Querschnitt beibehalten. Der Erhalt des Querschnittes wird bei feuerwiderstandsfähigen Lüftungsleitungen nicht gefordert. Diese können deshalb nicht als Entrauchungsleitungen eingesetzt werden. Für Entrauchungsleitungen sind eigene Nachweise nötig. Man unterscheidet Entrauchungsleitungen

- ohne Feuerwiderstand (in europäischer Definition: feuerwiderstandsfähig, jedoch ohne Dämmwirkung) zum Einbau in Öffnungen – auch mit Entrauchungsklappen "ohne Feuerwiderstand" versehen – innerhalb eines Brandbereiches (Brandabschnitt oder Geschoss) und
- mit Feuerwiderstand zum Überqueren anderer Brandabschnitte oder Geschosse auch mit brandschutztechnisch gesicherten Öffnungen.

Die Leckage von Entrauchungsleitungen darf höchstens 10 m³/h je 1 m² innerer Oberfläche betragen, wenn Prüfleitungen

- bei Umgebungstemperatur mit 1500 Pa Unterdruck und
- bei Brandprüfungen mit 500 Pa Unterdruck

geprüft werden. Die Dehnungskräfte dürfen an der Prüfleitung während des Brandversuches 1 kN nicht überschreiten. Die Prüftemperatur für Entrauchungsleitungen ohne Feuerwiderstand beträgt 600°C, für Leitungen mit Feuerwiderstand folgt sie der Einheits-Temperaturzeitkurve nach DIN EN 1363-1 [25].

Dehnungskompensatoren sind erforderlich, wenn die Entrauchungsleitungen allein im Brandversuch höhere Dehnungskräfte als 1 kN erzeugen. Als Bestandteil solcher Leitungen sind die Dehnungskompensatoren mit diesen Leitungen gemeinsam zu prüfen und die Dehnungskräfte und die Leckage gemeinsam zu beurteilen. Dehnungskompensatoren für Stahlblechleitungen aus Normalstahl müssen eine freie Schiebelänge von mindestens 100 mm in Richtung der Leitungsachse ermöglichen. Bei der Kompensatorenindustrie besteht das Bedürfnis, **Dehnungskompensatoren auch unabhängig von den Leitungen zu prüfen**; es besteht deshalb ein dringendes Bedürfnis für geeignete Prüfvorschriften und die Regelung des Verwendungsnachweises.

Zuluftleitungen: Ohne weitere Nachweise dürfen Entrauchungsleitungen auch als Zuluftleitungen sinngemäß verwendet werden; dieser Sachverhalt ist in die an der TU München ausgestellten amtlichen bauaufsichtlichen Prüfzeugnisse aufgenommen und ein Muster für den Übereinstimmungsnachweis sowohl für Entrauchungsleitungen als auch für Zuluftleitungen angefügt worden.

Schalldämpfer werden in Rauchabzugsanlagen immer dann benötigt, wenn die Anlagen auch für Lüftungszwecke eingesetzt werden. Mehrfach konnte zwischenzeitlich festgestellt werden, dass Kulissenschalldämpfer herkömmlicher Bauart bereits bei relativ niedrigen Rauchabzugstemperaturen versagen; die Kulissen verlieren nämlich ihre Festigkeit und werden vom Rauchgasstrom mitgerissen. Verstopfungen der Leitungen und Klappen sowie Gefährdung der Ventilatoren sind die Folge. Wichtigstes Kriterium für die Eignung von Schalldämpfern ist der Querschnittserhalt während der Förderung heißer Gase.

Bezüglich der notwendigen Anordnung von feuerwiderstandsfähigen Entrauchungsleitungen und von Entrauchungsklappen kann die Richtlinie über den Brandschutz in Lüftungsanlagen Fassung 1984 [3] oder inoffizielle Fassung 2000 [7] (abgedruckt bei ZITZELSBERGER und OSTERTAG [137]) sinngemäß angewendet werden.

5.3.2.6 Anforderungen an Rauchschürzen

(in Vorbereitung: DIN EN 12101-1 [41])

Rauchschürzen dienen der Unterteilung eines Brandbereiches oder Brandabschnittes in Rauchabschnitte und sollen eine Mindesthöhe von 1 m haben. Sie müssen aus nichtbrennbaren Baustoffen bestehen, der vorgesehenen Temperatur-Zeit-Beanspruchung standhalten und dürfen im Brandfall nur begrenzte Spalte oder Öffnungen aufweisen.

Für bewegliche Rauchschürzen wurde ein europäisches Nachweisverfahren (Anforderungen, Prüfung, CE-Zeichen) entwickelt (EN 12101-1).

Rauchschürzen aus Glas: Aus unterschiedlichen Gründen werden transparente Rauchschürzen gefordert. Auch diese müssen zuverlässig den Temperaturbeanspruchungen und den Temperaturwechselbeanspruchungen sowie den auftretenden Differenzdrücken gewachsen sein. Obwohl der Strahlungsdurchgang bei Rauchschürzen kaum eine Rolle spielt, sind sog. G-Verglasungen als Rauchschürzen für heiße Rauchgase aufgrund von Versuchserfahrungen ungeeignet.

5.3.2.7 Anforderungen an Absaugöffnungen

(bisher weder durch allgemeine bauaufsichtliche Zulassung noch durch einen anderen Nachweis geregelt; derzeit auch keine Prüfanforderung in Vorbereitung)

Die notwendige Anzahl von Absaugöffnungen oder Einzelventilatoren ist im Abschnitt 3.4.4 behandelt worden. Die Absaugöffnungen müssen so ausgeführt werden, dass bei den auftretenden Temperaturen, Strömungsgeschwindigkeiten und Differenzdrücken der Strömungsquerschnitt erhalten bleibt.

5.3.2.8 Anforderungen an Zuluftöffnungen

(bisher weder durch allgemeine bauaufsichtliche Zulassung noch durch einen anderen Nachweis geregelt; derzeit auch keine Prüfanforderung in Vorbereitung)

Anforderungen bezüglich Anordnung und Strömungsgeschwindigkeit sind im Abschnitt 3.4.5 behandelt worden. Die Zuluftöffnungen müssen so ausgeführt werden, dass bei der auftretenden Wärmebeanspruchung (im Wesentlichen Strahlung) ihr Strömungsquerschnitt erhalten bleibt. Zuluftöffnungen dürfen auch in angrenzenden Rauchabschnitten angeordnet sein, wenn die Rauchabschnitte untereinander durch feste oder bewegliche Rauchschürzen mit begrenzter Länge getrennt sind. Zuluftöffnungen dürfen nicht in notwendigen feuerwiderstandsfähigen Wänden oder Decken eingebaut werden; auch dann nicht, wenn die Öffnungen mit Brandschutzklappen gesichert werden – von solch einer Lösung geht erhebliche Gefahr aus.

6 Empfehlungen für bauaufsichtliche Richtlinien und Verordnungen

6.1 Muster-Richtlinie über den baulichen Brandschutz im Industriebau (Muster-Industriebaurichtlinie - M IndBauRL) - Fassung März 2000 –

zum Absatz 5.6.2 der M IndBauRL:

Für die M IndBauRL [6] wird eine Ergänzung bezüglich der Temperaturbegrenzung der Rauchschicht für notwendig erachtet, sodass der Absatz 5.6.2 lauten müsste:

5.6.2 Bei Produktions- und Lagerräumen, die einzeln eine Fläche von mehr ais 1600 m² haben, muss eine ausreichende Rauchableitung vorhanden sein, damit eine Brandbekämpfung möglich wird. Eine ausreichende Brandbekämpfung ist in der Regel dann möglich, wenn für jede zur Brandbekämpfung erforderliche Ebene eine raucharme Schicht mit mindestens 2,5 m Höhe **und eine höchste Rauchschichttemperatur von 200°C** rechnerisch nachgewiesen wird. Die Einrichtungen zur Rauchableitung müssen die technischen Anforderungen an Rauchabzugsanlagen erfüllen.

zum Absatz 5.6.3:

Im Absatz 5.6.3 kommt zum Ausdruck, dass auch in Räumen mit selbsttätigen Feuerlöschanlagen die Schutzziele des Personenschutzes nur zu erfüllen sind, wenn eine wirksame Entrauchung vorhanden ist. Mit Lüftungsanlagen, bei denen lediglich die Abschaltung der Zuluft verlangt wird, kann eine wirksame Entrauchung nicht erwartet werden. Die Gründe dafür sind:

- in gesprinklerten R\u00e4umen muss mit Temperaturen um 200°C gerechnet werden (siehe Seite 8 dieses Berichtes),
- Normalventilatoren werden bei dieser Temperatur in kürzester Zeit versagen,
- f
 ür den baulichen Brandschutz eingesetzte Absperrvorrichtungen gegen Brand
 übertragung schlie
 ßen bei einer Auslösetemperatur von 72°C.

Der Absatz 5.6.3 bedarf zur Abwendung von Gefahren der Überarbeitung bzw. Ergänzung. Es wird eine Ergänzung bezüglich der Beschaffenheit der Lüftungsanlage und der Temperaturbeständigkeit der Ventilatoren für notwendig erachtet, sodass der Absatz 5.6.3 lauten müsste:

5.6.3 Für Räume nach Abschnitt 5.6.2 mit selbsttätigen Feuerlöschanlagen genügen natürliche Rauchabzugsanlagen mit mindestens 0,5 % aerodynamisch wirksamer Rauchabzugsfläche, bezogen auf die Fläche des Raumes. Anstelle von Rauchabzugsanlagen können Lüftungsanlagen verwendet werden, wenn diese so gesteuert werden, dass sie im Brandfall nur entlüften. Diese Lüftungsanlagen müssen

- nach der Richtlinie über die brandschutztechnischen Anforderungen in Lüftungsanlagen so beschaffen sein, dass Absperrvorrichtungen gegen Brandübertragung nicht erforderlich sind und
- die Ventilatoren f
 ür den Betrieb bei mindestens 200°C w
 ährend mindestens 30 Minuten geeignet sind.

6.2 Musterverordnung über den Bau und Betrieb von Versammlungsstätten (Muster-Versammlungsstättenverordnung - MVStättV) - Fassung Mai 2002 -

zum §16 Rauchableitung Absatz (2)

Für die MVStättV [8] wird eine Ergänzung bezüglich der Temperaturbegrenzung der Rauchschicht für notwendig erachtet, sodass der §16 (2) lauten müsste:

(2) Rauchabzugsanlagen müssen so bemessen sein, dass sie eine raucharme Schicht von mindestens 2,50 m auf allen zu entrauchenden Ebenen, bei Bühnen jedoch mindestens eine raucharme Schicht von der Höhe der Bühnenöffnung, ermöglichen, und die Rauchschichttemperatur nicht über 200°C ansteigt.

zum §16 Rauchableitung Absatz (5)

Die Verfasser des vorliegenden Berichtes weisen auf die Gefahren durch die Überdruckangabe von 350 Pa hin. Sie sehen eine Änderung der Bestimmungen für notwendig an. Die Bestimmung lässt nämlich indirekt einen Differenzdruck von 350 Pa an einem Schutzvorhang einer Bühne zu. Es wird aber keinen bezahlbaren Bühnenvorhang geben, der nicht lange vor dem Erreichen eines Differenzdruckes von 350 Pa aus seinen Führungsschienen gerissen wird und damit der Bühnenverschluss verloren geht. Nach unserer Überzeugung werden Gefahren besser abgewendet, wenn auf die Angabe einer Druckdifferenz verzichtet wird. Der §16 (5) würde dann lauten:

(5) Die Abschlüsse der Rauchableitungsöffnungen von Bühnen mit Schutzvorhang müssen bei einem Überdruck von 350 Pa selbsttätig öffnen; eine automatische Auslösung durch geeignete Temperaturmelder ist zulässig.

zum §16 Rauchableitung Absatz (7)

Die Verfasser des vorliegenden Berichtes verweisen auf die Ausführungen des Bandes B dieses Forschungsvorhabens.

6.3 Muster-Verordnung über den Bau und Betrieb von Verkaufsstätten (Muster-Verkaufsstättenverordnung) – MVkVO- Fassung September 1995

zum §16 Rauchableitung Absatz (2)

Die Verfasser des vorliegenden Berichtes halten es nicht für vertretbar, in Verkaufsstätten mit Sprinkleranlagen **zu verlangen**, dass Lüftungsanlagen nur entlüften, aber ihr Versagen mit dem Schließen von Absperrvorrichtungen gegen Brandübertragung in Kauf genommen wird (vergl. Ausführungen zu 6.1). Sollte eine Entrauchung wirklich als verzichtbar angesehen werden, müsste der Absatz (2) die Abschaltung der Zuluft vorschreiben, um die Rauchverwirbelung durch Sprinkler nicht noch zu intensivieren.

zum §16 Rauchableitung Absatz (3) und Absatz (4)

Die Verfasser des vorliegenden Berichtes verweisen auf die Ausführungen des Bandes B dieses Forschungsvorhabens.

6.4 Anwendung der Grundlagen auf Atrien und komplexe Gebäude

Die Verfasser dieses Bandes A zum Forschungsvorhaben "Entrauchung – Grundlagen" sind der Überzeugung, dass nach inzwischen über 20 Jahren "Von-Fall-zu-Fall-Entscheidungen"

für Atrien und komplexe Gebäude

die Erfahrungen vorliegen,

allgemein gefasste bauaufsichtliche Richtlinien oder Verordnungen mit den wesentlichen Anforderungen

aufzustellen. Die Formulierung der wesentlichen Anforderungen für solche baulichen Anlagen kann durch den vorliegenden Band A beeinflusst werden; der Bericht ist im Hinblick auf eine derartige Anwendung nach Einzelgesichtpunkten gegliedert.

6.5 Umbaute Parkhäuser

Nach der Muster-Garagenverordnung (Gar VO) bedarf es in umbauten Parkhäusern keiner Entrauchungsanlagen. In den Bundesländern, in denen dennoch Entrauchungsanlagen in Garagen gefordert werden, bestehen feste Bemessungsregeln. Die konservative "Nachrechnung" von stationären Bränden in Garagen führt oft zum "Versagen". Zumindest für Garagen mit üblichen Fahrbahnen und Stellplätzen sind Brandabläufe zwischenzeitlich gut dokumentiert (z.B. STEINERT [112]), sodass "reale" zeitliche Verläufe der Energiefreisetzung in instationären Rechenverfahren untersucht werden können. Diese Untersuchungen führen meist zu zufrieden stellenden Situationen. Hier ist deshalb auch von den Verfassern kein weiterer Regelungsbedarf erkennbar.

7 Zusammenfassung

In modernen Bauten ist vielfach die Ableitung von Brandrauch über Fenster oder andere Öffnungen nicht möglich, weil z. B. große Raumtiefen, unterirdische oder geschlossene oberirdische Anordnungen wie Atrien vorliegen. Erst durch den Einbau von Entrauchungsanlagen können ausreichend hohe raucharme Schichten oder derart starke Rauchgasverdünnungen erzielt werden, dass die Rettung von Menschen und Tieren sowie Löschmaßnahmen möglich sind.

Bei Bränden in der Entstehungsphase (vor dem Flash-over) muss die Höhe einer raucharmen Schicht mindestens 2,5 m betragen. International wird für Menschen die Erträglichkeitsgrenze für Wärmestrahlung mit 2,5 kW/m² angegeben. Um diese einzuhalten ist die Rauchschichtttemperatur auf 200'C zu begrenzen. Die bisher – nur – in Deutschland benutzte Grenze von 300°C ist zu hoch. Die Erträglichkeit von Rauchschichten mit höheren Temperaturen lässt sich für besondere räumliche Anordnungen und Rettungswegsituationen in Abhängigkeit von der Einwirkungsdauer rechnerisch unter Berücksichtigung der zusätzlich wirkenden konvektiven Wärme in der raucharmen Schicht nachweisen; Abschnitt 2.2.5 und 2.2.6.

In Räumen mit Sprinklerung sind Temperaturen bis ca. 200°C in der Rauchschicht zu erwarten. Die oft behauptete 100°C-Grenze trifft nicht zu; Abschnitt 1.3.

Für die Bemessung von Entrauchungsanlagen stehen ingenieurmäßige Methoden zur Verfügung, die z. B. in Großbritannien, in USA und in Japan seit über 20 Jahren eingesetzt werden. Eine Bemessung an Hand von Bemessungstabellen, wie sie DIN 18232 bietet, ist nur für einfachste Situationen unter Vorbehalten anwendbar.

Die Akzeptanz zu ingenieurmäßiger Vorgehensweise im baulichen Brandschutz hielt auch in Deutschland Einzug. Dies zeigt sich in neueren bauaufsichtlichen Richtlinien bzw. Verordungen, in denen die Einhaltung einer mindestens 2,5 m hohen rauchfreien Schicht durch Nachweis gefordert wird. Auch die Aufnahme der für den Brandschutz relevanten Teile der EUROCODES in die Liste der Technischen Baubestimmungen darf als deutliches Signal der Akzeptanz ingenieurmäßiger Methoden im Brandschutz gewertet werden; Abschnitte 1. 1. 1 und 2.5.

Zu den ingenieurmäßigen Methoden zählen im Wesentlichen Experimente in verschiedenen Maßstäben und mathematische Modellansätze. Hochleistungsfähige Computer erlauben heute die Anwendung mathematischer Feldmodelle (CFD). Die bewährten und überwiegend durch Versuche validierten Algorithmen der Zonenmodelle sind -notfalls per Handrechnung - nachvollziehbar. In zahlreichen Staaten werden sie als "code of practice" angesehen und angewendet. Auf der Basis von Massen- und Energiebilanzen, bei natürlichen Abzügen zusätzlich der Bilanz des verfügbaren thermischen Differenzdruckes und der Druckverluste in den Zuund Abluftöffnungen, wird die Bemessung in nacheinander abzuarbeitende Einzelschritte zerlegt; Abschnitt 3.1.

Die Bemessungsgrundlage bilden die anzunehmenden Brandszenarien bzw. die Bemessungsbrände; Abschnitt 3.2. Die physikalischen Eigenschaften der am Brand beteiligten Stoffe Brandgut bzw. Brandlast, Luft und Brandgas bzw. Rauchgas bdürfen einer einheitlichen für Tabellenkalkulationen geeigneten Definition. Die Dichte der Luft wird auch als Dichte der Brandgase angesehen, nämlich

$$\rho = 353 / T [kg/m^3]$$

mit T als der absoluten Temperatur der Luft oder der Rauchgase; Abschnitt 3.2.1.1. Eine konstante spezifische Wärmekapazität für Luft und Brandgase mit 1,00 [kJ/(m³·K)], wie sie häufig in der Literatur verwendet wird, führt bei höheren Temperaturen allerdings zu Fehlbeurteilungen. Es wird empfohlen, die

spezifische Wärmekapazität für Brandgas
$$c_p = 1,05 \text{ [kJ/(m^3 \cdot \text{K})]}$$

zu setzen. Für Brandgas nahe der Flash-over-Temperatur sollte $c_p = 1,10 \text{ [kJ/(m^3 \cdot K)]}$ angesetzt werden; Abschnitt 3.2.1.2.

Die Angabe von Brandlasten (Abschnitt 3.2.1.4) gibt "nur" Aufschluss über das verfügbare Energiepotential im Falle eines Brandes; Abschnitt 3.5.1. Sie dient der Abschätzung der Dauer eines Bemessungsbrandes; Abschnitt 3.2.5.

Die Regeln der Verbrennungsrechnung erlauben bei bekannter Zusammensetzung des Brandgutes die Ermittlung des Mindestluftbedarfes und der stöchiometrischen Rauchgasmenge. Für praktische Anwendungen kann angesetzt werden:

Mindestluftbedarf = 0,313 kg Luft je MJ freigesetzter Energie, stöchiometrische Rauchgasmenge = 0,285 m_N^3 bzw. 0,368 kg je MJ freigesetzter Energie.

Der Mindestluftbedarf dient der Beurteilung, inwieweit ein (Voll-)Brand gut ventiliert oder ventilationsgesteuert abläuft. Es wurde aufgezeigt, dass Brände erst bei einem Luftüberschuss von 100% gut ventiliert ablaufen; Abschnitt 3.2.3. Die Mindestrauchgasmenge dient der Beurteilung der Verdünnung von Brandgasen; Abschnitt 3.3.5.

Die Größe von Bemessungsbränden und deren spezifische Brandleistungen werden in der englischsprachigen Literatur sehr detailliert angegeben. Unter dem Eindruck deutlich geringerer Bemessungsbrände in der ausländischen Literatur wurden neuerdings die "Entstehungsbrände" in DIN 18232 von 320 m² auf 80 m² Flächenausdehnung begrenzt. Eine ursprünglich für eine europäische Bemessungsnorm vorgesehene und aus Großbritannien stammende detaillierte Tabelle gibt Aufschluss über Bemessungsbrände bei Einzelhandelsgeschäften, Büronutzung, Hotelzimmern und Großgaragen; Abschnitt 3.2.4.5. Aus der gleichen Quelle stammen Angaben zu Brandszenarien auf dem Fußboden von Atrien; Abschnitt 3.2.4.7.

Über dem Brandherd wächst der Massenstrom des Plumes infolge Lufteinmischung unter gleichzeitiger Temperaturabnahme an. Eine weitere Zunahme des Massenstromes findet an jeder Umlenkung bzw. Umströmkante im Gebäude statt. Hierzu liegt in der Literatur eine Fülle von Algorithmen vor. In Deutschland fand bereits im Vorfeld der neuesten Überarbeitung der DIN 18232-2 eine Bewertung für sog. freie Plumes und eine Entscheidung zu Gunsten des THOMAS-HINKLEY-Plumes über "großem" Feuer (Abschnitt 3.3.1.2) und des ZUKOSKY-Plumes über "kleinem" Feuer (Abschnitt 3.3.1.3) statt. Dieser Entscheidung folgt auch der vorliegende Bericht. Für eine einfache Handhabung wird empfohlen, einen

Übergangsbereich von $z_1=3\times\sqrt{A_f}\,$ bis $z_2=5\times\sqrt{A_f}$

anzuwenden. Für raucharme Schichtdicken $d \le z_1$ ist der Plume über "großem" Feuer und für $d \ge z_2$ der Plume über "kleinem" Feuer anzuwenden. Im Übergangsbereich führt eine gewichtete Berücksichtigung zu einem stetigen Massenstrom-Verlauf in Abhängigkeit von der Höhe.

Der freie Plume über dem Brandherd verliert zwischen 20% und 35% seiner Energie infolge Abstrahlung an die umgebenden Bauteile. Strahlungsverluste und Lufteinmischung bestimmen die Temperaturabnahme mit zunehmender Höhe und damit auch das Steigvermögen eines Plumes und zugleich die Anwendungsgrenze von natürlichen Abzügen; Abschnitt 3.3.1.5.

Aus Raumöffnungen in angrenzende Bereiche ausströmende Brandgase werden in der Modellvorstellung als (neuer) Brandherd an der Fassade betrachtet. Die Algorithmen hierfür sind sowohl für die von einem Entstehungsbrand als auch von einem Vollbrand ausgehenden Brandgase anwendbar; Abschnitt 3.3.2. Die Algorithmen aus britischer Literatur werden für die Ermittlung der Massenströme unter Vorsprüngen und Balkonen und für die Ermittlung des Überström-Plumes an Atrienfassaden empfohlen; Abschnitt 3.3.3 und 3.3.4.

Die Bestimmung der Rauchschichttemperatur erfolgt über deren Energieinhalt an den Abströmöffnungen; Abschnitt 3.4.2. Bei Temperaturen über 550°C ist der Vollbrand zu unterstellen und die Rechnung erneut durchzuführen.

Rauchschürzen dienen in gewohnter Weise der Begrenzung der Rauchabschnitte. Sie können auch benutzt werden, um Rauchgasströme zu lenken und die Wirkung impulsreicher Zuluftströme zu begrenzen; Abschnitt 3.4.3. Abzugseinrichtungen müssen so bemessen werden, dass sie Rauchgas und nicht zusätzlich Luft aus der raucharmen Schicht abführen. Hierzu werden Bemessungsregeln angegeben. Zusätzlich werden für einige Sonderformen von Abzugseinrichtungen Bemessungsregeln angegeben; Abschnitt 3.4.4.

Zulufteinrichtungen sind aufgrund neuerer Erkenntnisse im In- und Ausland so zu bemessen, dass die Zuluftgeschwindigkeit auf 1 m/s begrenzt ist. In Nachströmöffnungen, wie Türen und Tore, die von Personen benutzt werden müssen, darf die Geschwindigkeit 5 m/s nicht überschreiten; Abschnitt 3.4.5.

Einflüsse durch Wind bei Nachbarschaftsverbauung und bei topografischen Besonderheiten lassen sich mitunter nur mittels Modellversuchen beurteilen; Abschnitt 3.4.6.

Hinweise zur Ausführungsplanung von Entrauchungsanlagen mit den zu stellenden Anforderungen an die Bauteile enthält Abschitt 5. Im Abschnitt 6 werden schließlich Empfehlungen für bauaufsichtliche Richtlinien und Verordnungen gegeben.

8 Literatur

- [1] Alpert, R. L.: Ceiling jet flows. Chapter 2-2 in [110]
- [2] ARGEBAU: Muster für Richtlinien über die bauaufsichtliche Behandlung von Hochhäusern – Fassung Mai 1981; z.B. über Bau-CD Feuertrutz Wolfratshausen
- [3] ARGEBAU: Bauaufsichtliche Richtlinie über die brandschutztechnischen Anforderungen an Lüftungsanlagen (Musterentwurf) – Fassung Januar 1984 –; Mitteilungen IfBt 4/1984, S. 118-128
- [4] ARGEBAU: Musterverordnung über den Bau und Betrieb von Verkaufsstätten (Muster-Verkaufsstättenverordnung – MVkVO) – Fassung September 1995; z.B. über Bau-CD Feuertrutz Wolfratshausen
- [5] ARGEBAU: Musterbauordnung (MBO) Fassung September 1997; z.B. über www.is-argebau.de Link: Mustervorschriften / Mustererlasse
- [6] ARGEBAU: Muster-Richtlinie über den baulichen Brandschutz im Industriebau (Muster-Industriebaurichtlinie – MindBauRL) – Fassung März 2000 –; Mitteilungen DIBt 6/2000, S. 212-235
- [7] ARGEBAU: Muster-Richtlinie über brandschutztechnische Anforderungen an Lüftungsanlagen (Muster-Lüftungsanlagen-Richtlinie M-LüAR) Entwurf Stand – September 2000 –;
 von der ARGEBAU nicht veröffentlicht; siehe jedoch Anhang zu [137]
- [8] ARGEBAU: Musterverordnung über den Bau und Betrieb von Versammlungsstätten (Muster-Versammlungsstättenverordnung – MVStättV) – Fassung Mai 2002; www.is-argebau.de Link: Mustervorschriften / Mustererlasse
- Babrauskas, V.: Cone calorimeter annotated bibliography 1982-1991. Technical Note 1296, NIST 1992
- [10] Babrauskas, V.: Burning rates. Chapter 3-1 in [109]
- [11] Beard, A.: Evaluation of deterministic fire models: Part I Introduction.Fire safety J. 19 (1992), S. 295-306
- [12] Berchtold, R., K.-P. Ehlert, J. Wesche: Brandversuche Lehrte. Schriftenreihe "Bauund Wohnforschung" 1978
- [13] Beyler, C. L.: Fire plumes and ceiling jets. Fire safety J. 11 (1986), S. 53-75

- Blume, G., D. Hosser: Realbrandversuche zur Überprüfung der Rauchableitung in großen Versammlungsstätten. IBMB Heft 158, S. 319-332, Braunschweig 2001 (ISBN 3-89288-139-1)
- [15] BRE Digest 260: Smoke control in buildings: design principles. Watford/London 1982
- [16] BRE Digest 367: Fire modelling. Watford/London 1982
- [17] Brein, D.: Anwendungsbereiche und –grenzen f
 ür praxisrelevante Modellansätze zur Bewertung der Rauchgasableitung in Geb
 äuden (Plume-Formeln). Forschungsstelle f
 ür Brandschutztechnik der Universit
 ät Karlsruhe (TH); Dezember 2001
- [18] BSI DD 240 "Part 1 "1997: Fire safety engineering in buildings,Part 1: Guide to the application of fire safety engineering principles
- [19] BSI DD 240 "Part 2 "1997: Fire safety engineering in buildings, Part 2: Commentary on the equations given in part 1
- [20] Cooper, L. Y.: Smoke and heat venting. Chapter 3-9 in [110] 2002
- [21] Czech, K. J., R. Detzer, G. Jung: Voraussetzungen f
 ür die Brandrauchevakuierung: Bewertung der Ergebnisse. vfdb 3/99, S. 105-110 und vfdb 4/99, S. 159-164
- [22] ARGEBAU: Muster für Richtlinien über brandschutztechnische Anforderungen an Leitungsanlagen – Fassung Sept. 1993 –; Mitteilungen DIBt 3/1994, S. 94-107
- [23] ARGEBAU: Muster-Richtlinie über brandschutztechnische Anforderungen an Leitungsanlagen – Fassung März 2000 –; Mitteilungen DIBt 6/2000, S. 206-211
- [24] DIBt: Bauregelliste A, Bauregelliste B und Liste C Ausgabe 2002/1 . Mitteilungen DIBt Sonderheft 26, Juli 2002
- [25] DIN EN 1363-1: Feuerwiderstandsprüfungen; Teil 1: Allgemeine Anforderungen
- [26] DIN 4102-2 : 1977-09: Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen; Teil 2: Bauteile; Begriffe, Anforderungen und Prüfungen
- [28] DIN EN 12101-3 : 2002-06: Rauch- und Wärmefreihaltung; Teil 3: Bestimmungen für Rauch- und Wärmeabzugsgeräte
- [29] DIN 18232 Teil 1: Baulicher Brandschutz; Rauch- und Wärmeabzugsanlagen; Teil 1: Begriffe und Anwendung. September 1981

- [30] DIN 18232-2 : 1989-11: Baulicher Brandschutz im Industriebau, Rauch- und Wärmeabzugsanlagen, Rauchabzüge; Bemessung, Anforderungen und Einbau
- [31] DIN 18232-2 : 2001-12 (Entwurf/Gelbdruck): Rauch- und Wärmefreihaltung; Teil 2: Rauchabzüge; Bernessung, Anforderungen und Einbau
- [32] DIN 18232-2 : 2002-09 (Vorlage für Weißdruck; Dok.-Nr. NABau AA 00.35.00 N 0114): Rauch- und Wärmefreihaltung – Teil 2: Rauchabzüge; Bemessung, Anforderungen und Einbau
- [33] DIN 18232 Teil 3: Baulicher Brandschutz im Industriebau; Rauch- und Wärmeabzugsanlagen; Teil 3: Rauchabzüge, Prüfungen. September 1984
- [34] DIN V 18232-5 : 1999-12 (Vornorm): Rauch- und Wärmeableitung, Teil 5: Maschinelle Rauchabzugsanlagen (MRA); Anforderungen, Bemessung
- [35] DIN V 18232-6 : 1997-10 (Vornorm): Rauch- und Wärmeableitung, Maschinelle Rauchabzüge (MRA); Teil 6: Anforderungen an die Einzelbauteile und Eignungsnachweise
- [36] DIN V ENV 1991-2-2 : 1997-05 (Vornorm): Eurocode 1; Grundlagen der Tragwerksplanung und Einwirkungen auf Tragwerke; Teil 2-2: Einwirkungen auf Tragwerke – Einwirkungen im Brandfall; Deutsche Fassung ENV 1991-2-2 : 1995
- [37] DIN V ENV 1993-1-2 : 1997-05 (Vornorm): Eurocode 3; Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten; Teil 1-2: Allgemeine Regeln – Tragwerksbemessung für den Brandfall; Deutsche Fassung ENV 1993-1-2 : 1995
- [38] DIN-Fachbericht 93: Nationales Anwendungsdokument (NAD); Richtlinien zur Anwendung von DIN V ENV 1993 1-2 : 1997 05, Eurocode 3. Beuth-Verlag Berlin-Wien-Zürich (2000)
- [39] Dobbernack, R.: Leserzuschrift zum Beitrag Gerhardt in [46]. vfdb 1/2002
- [40] Drysdale, D. D.: Thermochemistry. Chapter 1-5 in [110] 2002
- [41] EN 12101-1 : 2002 (Entwurf): Anlagen zur Kontrolle von Rauch- und Wärmeströmungen; Teil 1: Bestimmungen für Rauchschürzen
- [42] EN 12101-4 : 2002-06 (Entwurf): Anlagen zur Kontrolle von Rauch- und Wärmeströmungen; Teil 4: Bauarten für Rauch- und Wärmeabzugsanlagen
- [43] EN 12101-5: Fixed fire fighting systems; Smoke and heat control systems; Part 5: Guidelines on functional recommendations and calculation methods für smoke and

heat exhaust systems. (unveröffentlichtes Dokument prEN 12101-5 : 09-03-99 von CEN TC 191 SC1 WG5)

- [44] Friedrich, J.-K.: Höhenluft verhindert Brände Vorbeugender Brandschutz mit Druckluft zur Inertgas-Gewinnung. Druckluft Kommentare 1/01 für die Industrie (Atlas Copco) 2001, S. 29-30
- [45] Gerhardt, H. J., O. Krüger: Experimentelle Untersuchungen zur Entrauchung großer Räume unter besonderer Beachtung des Windeinflusses. vfdb 2/2000, S. 47-54
- [46] Gerhardt, H. J.: Entrauchungsnachweise Kritische Diskussion von Methoden des Brandschutzingenieurwesens. vfdb 3/2001, S. 99-104
- [47] Gerhardt, H. J., B. Konrath: Linienhafte Absaugung von Rauchgasen. vfdb 1/2002, S. 33-36
- [48] Gerhardt, H. J.: Anmerkungen zur Ähnlichkeit von Modellversuchen bei der Rauchableitung. vfdb 2/2002, S. 47-49
- [49] Günther, K. P.: Es löscht auch (nur) mit Wasser, aber wie? MicroDrop, ein (fast) neues Löschverfahren. vfdb 3/95, S. 115-117
- [50] Hagen, E., J. Zitzelsberger: Aus der Normungsarbeit f
 ür die Bemessung maschineller Abz
 üge nach DIN 18232, Teil 5. vfdb 1/95, S29-34
- [51] Hagen, H.: Neue Sonderbauvorschriften Ausrichtung an den Schutzzielen des Brandschutzes. IBMB Heft 163, S. 51-56, Braunschweig 2002 (ISBN 3-89288-144-8)
- [52] Hansell, G. O., H. P. Morgan: Fire sizes in bedrooms implications for smoke control design. Fire Safety Journal, 8 (1984/85), S. 177-186
- [53] Hansell, G. O., H. P. Morgan: Design approaches for smoke control in atrium buildings; BR 258, ISBN 0 85125 6155, Watford/London 1994
- [54] Hegger, T.: Rauch- und Wärmeabzug DIN 18232 und EN 12101; Brandschutz bei Sonderbauten, Braunschweig 2002, S. 57-68, ISBN 3-89288-144-8
- [55] Heins, T.: Untersuchungen des thermischen und maschinellen Rauch- und Wärmeabzugs über Abzugskanäle. vfdb 1/93, S. 17-22
- [56] Heskestad, G.: Fire plumes, flame height, and air entrainment. Chapter 2-1 in [110] 2002
- [57] Hinkley, P. L.: Rates of production of hot gases in roof venting experiments. Fire safety J. 10 (1986), S. 57-65

- [58] Hinkley, P. L., A. W. Williams: Ignition and growth of fire in a room. BRE IP 4/86, Watford/London 1986
- [59] Hinkley, P. L.: Smoke and heat venting. Chapter 3-9 in [109]
- [60] Hopkinson, J. S.: Smoke spread within buildings. BRE IP 22/84, Watford/London 1984
- [61] Hosser, D., R. Dobbernack: Konzepte für die Rauchfreihaltung von überdachten Innenhöfen und Ladenpassagen im Brandfall. vfdb 2/92, S. 55-59
- [62] Hosser, D., R. Dobbernack, W. Siegfried: Rauchabzug in ausgedehnten Räumen ohne und mit Sprinkleranlage am Beispiel des Industriebaus. vfdb 4/97, S. 147-152
- [63] Hosser, D., M. Dehne: Vereinfachter brandschutztechnischer Nachweis für Bauteile bei lokal begrenzten Bränden in großen Räumen. Bauphysik 23 (2001), S. 202-210
- [64] ISO/PDTR 13387-2: Fire safety engineering Part 2: Design fire scenarios and design fires; datiert 1998-04-14. Dokument NABau 00.31.00 Nr. 10-98
- [65] Jansson, R., B. Onnermark : Flame heights outside windows. FOA rapport C 20445-A3, Stockholm 1982
- [66] John, R.: Rauch- und Wärmeabzug bei Bränden in großen Räumen. vfdb 1/88, S. 21-25
- [67] John, R.: Rauch- und Wärmeabzug bei überdachten Innenhöfen. vfdb 2/89, S. 68-72
- [68] John, R.: Rauchabführung aus hohen und weitläufigen Bauwerken im Brandfall für den Personenschutz. Forsch.-Ber. Nr. 79 der Forschungsstelle Brandschutz der TH Karlsruhe, Dez. 1991
- [69] John, R., P. G. Seeger: Rauchentlüftung bei überdachten Atrien. vfdb 2/92, S. 60-66
- [70] John, R., H. Schatz: Brandrauch Entstehung Ausbreitung Auswirkung. Gutachten für Fachverband Lichtkuppel, Lichtband und RWA e.V., Karlsruhe 1997
- [71] Kallenbach, : Brandschutzkonzepte für Atriumbauten. vfdb 2/92, S. 41
- [72] Klingsohr, K.: Glashallen und Atrien Probleme und Lösungen aus der Sicht des Vorbeugenden Brandschutzes. DAB 4/93, S. 661-663
- [73] Klote, J. H., J. A. Milke: Principles of smoke management. ASHRAE, Atlanta / USA, 2002

- [74] Krüger, W., J. Kuhn, D. Ostertag, J. Zitzelsberger: Untersuchung der Wärmeabgabe von Entrauchungsventilatoren. Fortschr.-Ber. VDI-Z., Reihe 6 Nr. 133 (1983)
- [75] Kunze, C.: Gebäude mit glasüberdachten Innenhöfen (Atriumgebäuden) aus der Sicht des Brandschutzes. vfdb 2/92, S. 44-48
- [76] Kutz, M., K.-J. Kohl, J. Klaus: Untersuchungen des Einflusses von Brandbekämpfungsmaßnahmen auf die Brandraumtemperaturentwicklung. vfdb 1/96, S. 14-18
- [77] Max, U., D. Brein: Berechnungsgrundlagen f
 ür die Auslegung von Rauchabzugsanlagen nach DIN 18232-2. Arbeitsgemeinschaft Brandsicherheit AGB, Bruchsal 2001 und 2002 (Verfahren_12.doc und Verfahren_38.doc)
- [78] Mehl, F.: Bauaufsichtliche Akzeptanz von Ingenieurmethoden im baulichen Brandschutz. Tagungsband Juni 2002, VdS, Köln
- [79] Milke, J. A.: Smoke management in covered malls and atria. Chapter 4-13 in [110] 2002
- [80] Morgan, H. P., N. P. Savage: A study of a large fire in a covered shopping complex: St John's Centre 1977. BRE CP 10/80, Borehamwood/London 1980
- [81] Morgan, H. P., G. O. Hansell: Fire sizes and sprinkler effectiveness in offices implications for smoke control design. Fire safety J., 8 (1984/85), S. 187-198
- [82] Morgan, H. P.: A simplified approach to smoke-ventilation calculations. BRE IP 19/85, Watford/London 1985
- [83] Morgan, H. P., G. O. Hansell: Atrium buildings: Calculating smoke flows in atria for smoke control design. Fire safety J., 8 (1984/85), S. 187-198
- [84] Morgan, H. P.: Comments on "Anote on smole plumes from fires in multi-level shopping malls. Fire safety J., 12 (1987), S. 83-84
- [85] Morgan, H. P., G. O. Hansell: Atrium building smoke flows. Fire safety J., 13 (1988), S. 221-224
- [86] Morgan, H. P., J. P. Gardner: Design principles for smoke ventilation in enclosed shopping centres; BR 186, ISBN 0 85125 462 4, Watford/London 1990
- [87] Morgan, H. P., C. Williams, R. Harrison, M. P. Rupp, J. C. De Smedt: Tests mit heißen Rauchgasen im Flughafen Brüssel. vfdb 3/95, S. 113-115
- [88] Morgan, H. P., et. al.: Design methodologies for smoke and heat exhaust ventilation; BR 368, ISBN 1 86081 289 9, Watford/London 1999

- [89] NFPA 101: Life safety code. Quincy, MA USA, 2000
- [90] NFPA 92B: Guide for smoke management systems in malls, atria, and large areas. Quincy, MA USA, 2000
- [91] NFPA 204: Standard for smoke venting. Quincy, MA USA, 2002
- [92] Ostertag, D., J. Zitzelsberger: Wie sicher sind innen liegende Sicherheitstreppenräume in Hochhäusern? Neue Erkenntnisse. BBauBl 4/2001, S. 51-55
- [93] Petterson, O., S.-E. Magnusson, J. Thor: A differentiated design of fire exposed steel structures. Bulletin 44, Lund Institute of Technology, Sweden (1974) (deutsche Übersetzung Januar 1977/ku; IfBt)
- [94] Poreh, M., S. Trebukov: Wind effects on smoke motion in buildings. Fire safety J. 35 (2000), S. 257-273
- [95] Purser, D. A.: Toxicity assessment of combustion products. Chapter 2-8 in [109] 1995
- [96] Purser, D. A.: Toxicity assessment of combustion products. Chapter 2-6 in [110] 2002
- [97] Recknagel/Sprenger: Taschenbuch f
 ür Heizung und Klimatechnik; 58. Ausgabe, M
 ünchen Wien (Oldenburg Verlag) 1974
- [98] Richter, W., et. al.: Untersuchung von Vielraumgebäuden im Brandfall mittels gekoppelter Simulationsverfahren. Abschl.-Ber. DIBt, Dresden, Febr. 2000
- [99] Schneider, U., M. Kersken-Bradley, U. Max: Bemessungsregeln f
 ür maschinelle Rauchabz
 üge auf der Grundlage von W
 ärmebilanzrechnungen. Abschl.-Ber. IfBt Az.: IV 1-5-656/91, Wien, M
 ünchen, Bruchsal, Nov. 1993
- [100] Schneider, U., U. Max, M. Kersken-Bradley: Bemessungsvorschlag f
 ür maschinelle Rauchabz
 üge nach DIN 18232 Teil 5; Schadenprisma 3/94, S. 39-46
- [101] Schneider, U., C. Lebeda: Rauchabzug nach dem Entwurf DIN 18232-5; vfdb 1/99, S. 21-31
- [102] Schneider, U., U. Max: Grundlagen und Verfahren zur Validierung von Rechenprogrammen für die Brandsimulation; Abschl.-Ber. Forsch.-Vorh. RS II 2-67 41-97.116 für BMin. für Verkehr, Bau- u. Wohnungswesen, 1999
- [103] Schneider, U., M. Oswald, U. Max: Grundlagen f
 ür die Dimensionierung der Rauchableitung. vfdb 3/2001, S. 105-110 und vfdb 4/2001, S. 155-164

- [104] Schneider, U.: Grundlagen der Ingenieurmethoden im Brandschutz; Düsseldorf Werner-Verlag) 2002
- [105] Schneider, V., J. Hofmann: Feldmodell-Simulation von Kohlenwasserstoff-Raumbränden und Sprühnebel-Löschversuchen. vfdb 2/93, S. 67-73
- [106] Schneider, V., T. Heins: Personensicherheit in Rettungswegen Nachweise mit Ingenieurmethoden. IBMB Heft 163, S. 157-184, Braunschweig 2002 (ISBN 3-89288-144-8)
- [107] Seeger, P. G., R. John: Brand- und Lüftungsversuche in einem Wohnhochhaus mit innenliegendem Treppenraum, vfdb 1972, S. 125-132
- [108] Seeger, P. G.: Luft- und Rauchgasströmung in einem Gebäude im Brandfall. vfdb 3/77, S. 90-99
- [109] SFPE Handbook of fire engineering. 2nd ed., NFPA, Quincy, USA (1995)
- [110] SFPE Handbook of fire engineering. 3rd ed., NFPA, Quincy, USA (2002)
- [111] Spratt, D., A. J. M. Heselden: Efficient extraction of smoke from a thin layer under a ceiling. Fire research note No. 1001, Borehamwood/London 1974
- [112] Steinert, C.: Experimentelle Untersuchungen zum Abbrand- und Feuerüberschlagsverhalten von Personenkraftwagen. vfdb 4/2000, S. 163-172
- [113] Tamura, G. T.: Smoke Movement and control in high-rise buildings. ISBN: 0-87765-401-8, NFPA, Quincy, USA (1994)
- [114] Tanaka, T., T. Yamana: Smoke control in large scale spaces;
 Part 1: Analytic theories for simple smoke control problems. Fire science and technology 1985, S. 31-40 (Part 2 siehe Yamana)
- [115] Tewarson, A.: Generation of heat and chemical compounds in fires. Chapter 3-4 in[110] 2002
- [116] Theobald, C. R.: The growth and development of fire in industrial buildings (with an appendix by P. H. Thomas, C. R. Theobald: The burning rates and duration of fires). Fire prevention science and technology 1977 (17), S. 4-16
- [117] Thomas, P. H., et. al. : Investigations into the flow of hot gases in roof venting. Fire Research Technical Paper No. 7, HSMO 1963
- [118] Thomas, P. H.: The Size of flames from natural fires. 9th international symposium on combustion 1963, S. 844-859; reprinted as paper 13 in Selected papers BR 80, ISBN 0 85125 208 7, Watford/London 1986

- [119] Thomas, P. H.: Modelling of compartment fires. Fire safety J. 5 (1983), S. 181-190
- [120] Thomas, P. H., H. P. Morgan, N. Marshall: The spill plume in smoke control design. Fire safety J. 30 (1998), S. 21-46
- [121] TÜV Südwest: Garagenverordnungen der einzelnen Bundesländer; Vergleich der Anforderungen zur Auslegung der maschinellen Abluftanlagen und der Entrauchung. Gutachten im Auftrag der Fa. DLK Ventilatoren GmbH in Schöntal-Berlichingen, Filderstadt 12.3.1997
- [122] VDI-Brandschutztagung 2000 in Rüsselsheim: Bei Gebäude-Entrauchung muss jedes Wetter passen. VDI-Nachrichten vom 15.12.2000
- [123] VDI-Wärmeatlas. 5. Auflage 1988
- [124] VdS 2092: Richtlinien für Sprinkleranlagen. VdS Schadenverhütung, Köln 1987
- [125] VdS 2815: Merkblatt. VdS Schadenverhütung, Köln 2001
- [126] vfdb 01/01 : 2000-05: vfdb-Richtlinien Brandschutzkonzept.VdS Schadenverhütung Verlag, Köln 2000
- [127] vfdb: Grundsätze f
 ür Rauchversuche in Geb
 äuden; Technischer Bericht der VFDB. vfdb 3/2001, S. 150-152
- [128] Walton, W. D., P. H. Thomas: Estimating temperatures in compartment fires. Chapter 3-6 in [110] 2002
- [129] Wilk, E., I. Kotthoff: Modellversuche zur Lösung brand- und rauchschutztechnischer Probleme. vfdb 1/2001, S. 18-28
- [130] Yamana, T., T. Tanaka: Smoke control in large scale spaces;
 Part 2: Smoke control experiments in a large scale space. Fire science and technology 1985, S. 41-54 (Part 1 siehe Tanaka)
- [131] Zitzelsberger, J.: Zum Entwicklungsstand von Entrauchungsventilatoren. HLH 35 (1984), S.442-444
- [132] Zitzelsberger, J.: Rauch- und Wärmeabzugsanlagen (RWA) Maschinelle Entrauchung. Tagungsband Okt. 1991, VdS, Köln
- [133] Zitzelsberger, J.: Maschinelle Entrauchung Anforderungen und Pr
 üfverfahren f
 ür Produkte. Tagungsband Okt. 1994, VdS, K
 öln
- [134] Zitzelsberger, J.: Die Mindestanzahl von Absaugstellen in einem zu entrauchenden Bereich. Dokument NABau 00.35.00 Nr. 21-94 (1994-10)

- [135] Zitzelsberger, J.: Definition großflächiger Räume für DIN 18232-5. Dokument NABau 00.35.00.01 (1999-02)
- [136] Zitzelsberger, J.: Rauch- und Wärmeabzugsanlagen Anforderungen an Bauteile von maschinellen Entrauchungsanlagen. Tagungsband Nov. 2000, VdS, Köln
- [137] Zitzelsberger, J., D. Ostertag: Brandschutz bei Lüftungsanlagen. Tagungsband Braunschweiger Brandschutz-Tage 01, S. 153-192
- [138] Zukosky, E. E., T. Kubota, B. Cetegen: Entrainment in fire plumes. Fire safety J. 3 (1980/81), S. 107-121



2

Forschungs- und Versuchslabor des Lehrstuhls für Bauklimatik und Haustechnik der Technischen Universität München Univ.-Prof. Dr.-Ing. Gerhard Hausladen

> Forschungslabor für Haustechnik der Techn. Universität München Karl-Benz-Straße 15 D-85221 Dachau Tel. 08131/2 00 40 Fax 08131/2 00 00 Lehrstuhl: Tel. 089/289-22475 Fax 089/289-23851

DEZEMBER 2002

Bericht über das Forschungsvorhaben

Rauchfreihaltung/Entrauchung von Räumen und Gebäuden Grundlagenermittlung für die Erstellung bauaufsichtlicher Richtlinien

Band B Überdruckbelüftungsanlagen für Sicherheitstreppenräume In Hochhäusern

> Forscher: D. Ostertag J. Kuhn J. Zitzelsberger

Erstellt im Auftrag des Deutschen Instituts für Bautechnik in Berlin mit großzügiger finanzieller Unterstützung durch die Friedrich-Schiedel-Stiftung und die Firma Trox, Neukirchen-Vluyn

Zum Inhalt

Ausgehend von der anhand eines konkreten Beispiels gewonnenen Erkenntnis, dass in Deutschland konform mit dem Regelwerk geplante Überdruckbelüftungsanlagen in sogenannten Sicherheitstreppenräumen nicht nur Funktionsdefizite haben können, sondern sogar Gefahren für Leib und Leben mit sich bringen können, gehen die Verfasser den physikalischen Zusammenhängen beim Betrieb solcher Anlagen nach.

Eine Literaturrecherche im englischsprachigen Raum zeigt, dass in Kanada/USA seit ca. 30 Jahren alle physikalischen Phänomene erkannt und grundsätzlich erforscht sind, dass aber dennoch die angewandte Technik unbefriedigend ist. Die dort eingesetzten Anlagen sind nur begrenzt wirksam und beinhalten durchaus auch erhebliche Risiken. Diese Mängel werden verursacht durch thermische Auftriebskräfte, dort Stack Effect genannt, denen man nichts entgegenzusetzen weiß.

In Deutschland dagegen verursacht der Hinweis auf thermischen Auftrieb und Reibungsdruckverluste bei Experten oft ungläubiges Staunen. Die Anlagen werden wenig reflektiert nach einfachstem Muster auch für größte Höhen gebaut. Die in den Hochhausrichtlinien definierten Anforderungen können von solchen Anlagen – wie die theoretische Analyse sofort zeigt – nicht erbracht werden. Dennoch wird ihre Wirksamkeit durch fragwürdige Funktionsprüfungen "bewiesen". Die vorliegende Arbeit liefert die vollständigen Berechnungsgrundlagen für jede Art von Treppenraum-Lufttechnik und zeigt die engen Grenzen der Tauglichkeit der vorgenannten Anlagen auf.

Die Arbeit schildert ein grundlegend neu entwickeltes System, das die Schwierigkeiten mit dem thermischen Auftrieb physikalisch einwandfrei und technisch machbar löst. Dadurch kann der gewünschte und notwendige Druckverlauf unter allen Witterungsbedingungen erreicht werden, so dass die Sicherheit des Sicherheitstreppenraumes im Brandfall gewährleistet ist.

Den Schluss bilden Vorschläge für die dringend notwendige Überarbeitung der bauaufsichtlichen Regeln, hier der Hochhausrichtlinien.

About the content

Starting from the knowledge gained from a "concrete example" that in Germany pressurised ventilation systems in so-called safety staircases planned in compliance with the regulations may not only have functional deficits but may also represent a danger of death or injury, the authors investigate the physical relationships that apply during the operation of such systems.

A literature research in the English-speaking world has shown that in Canada and the USA research into all the physical phenomena was completed around 30 years ago, but that nevertheless the technique used was unsatisfactory. The systems used in these countries only have limited effectiveness and also incorporate considerable concrete risks. These faults are caused by thermal upthrust, know as the stack effect, and there are no countermeasures against this effect.

In Germany, on the other hand, any mention of thermal upthrust and friction pressure losses often results in incredible amazement on the part of experts. The systems are also built for very great heights using simplistic patterns and with very little reflection. The requirements defined in high-rise building directives cannot be met by these systems – as the theoretical analysis shows immediately. Nevertheless their efficiency is "proven" using questionable function tests. This study provides the complete basis for calculation for all types of staircase ventilation system and shows the narrow limits of the suitability of the above systems.

The study describes a completely newly developed system that solves the difficulties with thermal upthrust using a perfect physical method, which is easily technical feasible. This means that the desired and necessary pressure curve can be achieved in all weather conditions so that the safety of the staircase can be guaranteed in the event of a fire.

The conclusion contains proposals for the urgent revision of the building regulations and in particular in this case, the high-risk building directives.

Sur le contenu

Se basant sur le fait prouvé d'après un exemple concret, que les installations de ventilation pressurisées, planifiées en conformité avec les réglementations, peuvent avoir en Allemagne, non seulement des carences de fonctionnement dans les cages d'escalier de secours proprement dites, mais aussi présenter un danger de mort ainsi que des risques de blessures pour les personnes, les auteurs étudient les corrélations physiques lors du fonctionnement de telles installations.

Une recherche littéraire dans les pays de langue anglaise montre qu'au Canada et aux USA, depuis environ 30 ans, tous les phénomènes physiques sont reconnus et font, en principe, l'objet de recherches, mais aussi que la technique appliquée est cependant insuffisante. L'efficacité des installations qui y sont utilisées est limitée et celles-ci présentent aussi des risques considérables. Des forces portantes thermiques – dénommées dans ces régions « Stack Effect » – sont à l'origine de ces défauts et personne ne connaît aucune contre-mesure.

Par contre, en Allemagne, le fait de mentionner la portance thermique et les pertes de pression dues à la friction provoque souvent chez les experts un étonnement inimaginable. Les installations sont construites selon un schéma très simple et avec très peu de réflexion, même à des hauteurs importantes. Comme l'analyse théorique le montre immédiatement, de telles installations ne sont pas en mesure de satisfaire aux exigences définies dans les directives pour les buildings. Pourtant, des tests de fonction douteux « prouvent » leur efficacité. La présente étude livre les bases de calcul au complet pour chaque type de système de ventilation dans les cages d'escalier et montre les limites étroites de la capacité des installations pré-mentionnées.

Cette étude décrit un système entièrement novateur et développé tout récemment, qui résout les difficultés que pose la portance thermique, en utilisant une parfaite méthode physique et tout en favorisant la faisabilité technique. Ainsi, il est possible d'obtenir la courbe de pression nécessaire et souhaitée sous toutes les conditions atmosphériques de manière à garantir la sécurité de la cage d'escalier de secours en cas d'incendie.

Pour terminer, nous vous soumettons des propositions pour la révision urgente des règles de la surveillance des travaux – dans ce cas les directives pour les buildings.

Inhaltsverzeichnis

V

1	Einleitung	1
2	Status Quo in Deutschland	2
	2.1 Die Aufgaben der Überdruckbelüftung in Sicherheitstreppenräumen von	
	Hochhäusern	2
	2.2 Die Bestimmungen des deutschen Baurechtes	4
	2.3 Der übliche Weg der Umsetzung	6
3	Eine Literaturrecherche im deutsch- und englischsprachigen Raum	7
	3.1 Allgemeines	7
	3.2 Brandereignisse in Hochhäusern	8
	3.3 Gebäude-Undichtigkeiten	10
	3.4 Der thermische Auftrieb – Stack Action	12
	3.5 Die Druckverteilung im Gebäude	14
	3.6 "Stairwell Pressurization" – die amerikanische Lösung	19
4	Sicherheitstreppenräume für Hochhäuser in Deutschland	23
	4.1 Druckverteilung im Gebäude	23
	4.2 Der Druckverlauf im Treppenraum	26
	4.2.1 Allgemeines	26
	4.2.2 Der Sicherheitstreppenraum in Hochhäusern	26
	4.2.3 Die Luftführung	26
	4.2.4 Druckverluste durch Reibung	27
	4.2.5 Druckgewinn durch Thermik	35
	4.2.6 Berechnungen	43
5	Grenzen der üblichen Technik	50
	5.1 Die übliche Technik	50
	5.2 Ein Beispiel	50
	5.3 Die Grenzen des üblichen Systems	55
6	Besondere Problempunkte	57
	6.1 Zulässiger Differenzdruck an Türen – Türöffnungskräfte	57
	6.2 Automatische Außenöffnungen in den Geschossen	60
	6.2.1 Fassadenöffnungen	60
	6.2.2 Abströmkanäle (horizontal)	61
	6.2.3 Abströmschächte über Dach, mit oder ohne Ventilatoren	61
	6.3 Ausgang ins Freie	63
	6.4 Windeinfluss	64
	6.4.1 Windeinfluss bei Außenöffnungen des Brandraumes	64
	6.4.2 Windeinfluss bei Fortluftöffnungen der Treppenraumlüftung	65
	6.4.3 Windeinfluss bei Außenluftansaugöffnungen	66
	6.4.4 Windeinfluss bei Ausgängen	66

	6.5 Schleusen-Lüftung	67
	6.6 RWA – Öffnung	68
7	Eine grundsätzlich neue Lösung – die Überdruckbelüftung mit Thermik-	
	Kompensation	69
	7.1 Grundgedanke und technische Umsetzung	69
	7.2 Die Anwendung auf das Objekt, das die Entwicklung angestoßen hat	73
	7.3 Die Anwendung auf ein 120 m-Hochhaus	79
	7.4 Einsatzgrenzen	83
8	Einfachere, kostengünstigere Lösungen für geringere Gebäudehöhen	84
9	Lüftung innenliegender Treppenräume (nicht: Sicherheitstreppenräume)	88
10	Empfehlungen für bauaufsichtliche Richtlinien	89

Verwendete Formelzeichen:

A	$[m^2]$	Fläche
С	[-]	Strömungsbeiwert
с	$\left[\frac{J}{kg\cdot K}\right]$	spezifische Wärmekapazität
g	$\left[\frac{m}{s^2}\right]$	Erdbeschleunigung
h	[m]	Höhe
Δp	[Pa]	Differenzdruck
Т	[K]	absolute Temperatur
<i></i>	$\left[\frac{m^3}{s}\right]$	Volumenstrom
WL	$\left[\frac{m}{s}\right]$	Geschwindigkeit
α	$\left[\frac{W}{m^2 \cdot K}\right]$	Wärmeübergangszahl
θ	$[^{\circ}C]$	Temperatur
ρ	$\left[\frac{kg}{m^3}\right]$	Dichte

Indizes:

i	innen
D	Decke
dyn	dynamisch
eff	effektiv
L	Luft
o,a	außen
R	Reibung
Si	Schacht innen
So	Schacht außen
Th,0	Ruhethermik
Th,5	Thermik nach 5 Minuten

Literaturhinweise

- Richtlinien über die bauaufsichtliche Behandlung von Hochhäusern, Okt. 1982, MABI 1983, S 495
- [2] John, R.: Rauchfreie Treppenräume, BBauBl 7/2000
- [3] Ostertag, D.; Zitzelsberger, J.: Innenliegende Sicherheitstreppenräume in Hochhäusern und ihre Rauchfreihaltung, VFDB-Zeitschrift 3/2001
- [4] Ostertag, D.: Akute Gefahren in Sicherheitstreppenräumen und Feuerwehraufzügen von Hochhäusern – Erfahrungen und weitere Überlegungen, VFDB-Zeitschrift 2/2002
- [5] John, R.: Brandversuch zur Überprüfung der Leistungsfähigkeit eines Druckbelüftungssystems zur Rauchfreihaltung der Treppenräume in einem Bürogebäude, VFDB-Zeitschrift 1/1983
- [6] Tamura, G.T.: Smoke Movement & Control in High-rise Buildings, NFPA, Quincy, USA, 1994
- [7] Klote, J.H., Milke, J.A.: Principles of Smoke Management, ASHRAE, Atlanta, 2002
- [8] DIN 18095 Türen Rauchschutztüren, Teil 2, Bauartprüfung der Dauerfunktionsfähigkeit und Dichtheit
- [9] Klote, J.H.: Smoke Control by Stairwell Pressurization, Heating/Piping/Air-Conditioning Magazine, 1980
- [10] Tamura, G.T.: The Performance of a Vestibule Pressurization System for the Protection of Escape Routes of a 17-Story Hotel, ASHRAE Transactions, Vol.86, Part 1, 1980
- [11] Klote, J.H.: An Overview of Smoke Control Technology, U.S. Department of Commerce, National Bureau of Standards, Gaithersburg, 1987
- [12] NFPA 92 A: Recommended Practice for Smoke Control Systems, Quincy, USA, 2000
- [13] Tamura, G.T.: Experimental Studies of Pressurized Escape Routes, ASHRAE Transactions, Vol. 80, Part 2, 1974
- [14] Tönnes, K.: Vorbeugender Brandschutz in Hochhäusern, BBauBl 4/99
- [15] VDI-Wärmeatlas, 5.Auflage 1988
- [16] Fourier, J.B.: Théorie analytique de la chaleur, Paris 1822 (franz.) Dt. Übersetzung v. R. Weinstein, Berlin 1884
- [17] Crank, J.; Nicolson, P.: A practical method for numerical evaluation of solutions of partial differential equations of the heat-conduction type.
 Proc.Of the Cambridge philos. Soc. 43 (1947)
- [18] Grigull, U.: Temperaturausgleich in einfachen Körpern, Springer-Verlag 1964
1 Einleitung

Dieser Band B ist Bestandteil der in 2 Bänden dargestellten Forschungsarbeit:

Rauchfreihaltung/Entrauchung von Räumen und Gebäuden. Grundlagenermittlung für die Erstellung bauaufsichtlicher Richtlinien.

Das hier behandelte Teilthema: "Überdruckbelüftungsanlagen für Sicherheitstreppenräume von Hochhäusern" stellt insofern innerhalb der Forschungsarbeit einen Sonderfall dar, als es zwar (wie die anderen Teilthemen) innerhalb des Forschungsthemas liegt, aber eigentlich unabhängig von dem Forschungsauftrag durch einen Auftrag zur Prüfung einer brandschutztechnischen Planung initiiert worden ist, die überraschende und Besorgnis erregende Ergebnisse gebracht hat. Diese Ergebnisse haben zu einer besonders intensiven Beschäftigung der Verfasser mit diesem Thema geführt, die nicht nur in der Theorie, sondern auch in der Anwendung bauaufsichtlich zweifellos besonders relevante Resultate mit sich gebracht hat.

2 Status Quo in Deutschland

2.1 Die Aufgaben der Überdruckbelüftung in Sicherheitstreppenräumen von Hochhäusern

"Hochhäuser", seien sie nun genutzt als Büro-/Verwaltungsbauten oder als Wohnbauten (oder auch Mischformen davon) haben gemeinsam:

- Nutzer sind sehr viele Personen, i.A. um so mehr, je höher die Gebäude sind.
- Die Rettungswege im Brandfall werden um so länger, je höher die Geschosszahl liegt.
- Die Evakuierungszeiträume steigen mit der Geschosszahl.
- Rettung und Brandbekämpfung sind i.A. nur von innen her möglich.

Den Treppen kommt deshalb besondere, zentrale Bedeutung im Brandfall zu. Sie allein dienen der Flucht fluchtfähiger Personen, Rettungsmaßnahmen und auch Brandbekämpfung können sich auch des/der Feuerwehraufzüge bedienen, führen aber oft partiell über Treppenräume. Diese Treppenräume sollen aber auch bereits einen ersten sicheren Zufluchtsort für die vielen Personen dienen, die durch das Brandgeschehen direkt, aber auch mittelbar gefährdet sind.

Die Treppen müssen deshalb unbedingt "rauchfrei" gehalten werden, wobei diese ideale Forderung, streng genommen, in der Regel nicht eingehalten werden kann. Eine begrenzte Rauchkontamination muss gegebenenfalls toleriert werden. Je größer die Gebäudehöhe und damit die nicht unterteilte Länge dieses Rettungsweges ist, um so länger wird die Expositionsdauer, während der die Flüchtenden gegebenenfalls dem giftigen und die Sicht behindernden Brandrauch ausgesetzt sind. Größere Personenzahl einerseits und höhere Expositionsdauer andererseits verschärfen also die Anforderungen an die Rauchfreihaltung mit zunehmender Gebäudehöhe. Maßnahmen zur möglichst weitgehenden Verhinderung der Raucheintragung müssen also mit Maßnahmen zur möglichst raschen Entfernung einmal eingetragenen Rauches einher gehen.

Die Flucht über die Treppenräume macht es notwendig, mehrere Türen zu öffnen, insbesondere die des Geschosses, aus dem die Flucht erfolgt, über die Sicherheitsschleuse in den Treppenraum. Da im Treppenraum Überdruck gegenüber den Geschossen sein soll, muss bei den naturgemäß in Fluchtrichtung aufschlagenden Türen das Druckgefälle Treppenraum — Geschoss überwunden werden.

Die Größe der Fluchttüren (Höhe i.A. über 2 m, Breite i.A. 1,10 m) bringt es mit sich, dass schon geringe Überdrücke im Treppenraum zu erheblichen, von den Fliehenden aufzu-

wendenden Türöffnungskräften führen. Zu große Türöffnungskräfte vermitteln – gerade in der Hektik des Brandfalles – den Eindruck, die Türe sei verschlossen. Dies muss natürlich unbedingt vermieden werden, weil sonst das Ausbrechen einer Panik befürchtet werden muss.

Deshalb wird der zulässige Überdruck des Treppenraumes gegenüber dem Geschoss in Deutschland traditionell mit 50 Pa nach oben limitiert – ein Wert, der zwar leicht versprochen, aber oft nicht gehalten wird. Im Folgenden wird gezeigt werden, dass dieser sicher wünschenswerte Grenzwert selbst bei hohem Grad der Kompetenz und Sorgfalt des Planers und hohem technischen Aufwand oft nicht ganz einzuhalten ist.

Die Aufgaben der Überdruckbelüftung sind also

- Rauchfreihaltung des Treppenraumes (genauer: weitgehende Rauchfreihaltung),
- zuverlässige, möglichst rasche und möglichst vollständige Entfernung gegebenenfalls eingetragenen Rauches und
- unbedingte Begrenzung des Differenzdruckes an Türen, die zur Flucht geöffnet werden müssen, auf ein tolerierbares, niedriges Niveau.

Gilt die letztere Forderung, die in der Praxis vielfach zu locker gehandhabt wird, grundsätzlich, ganz besonders aber natürlich für das Brandgeschoss selbst (das freilich jedes beliebige Geschoss sein kann), so sind die beiden ersteren Forderungen um so schärfer zu werten – und gleichzeitig um so schwerer zu erfüllen – je höher das Hochhaus ist. Eine

Staffelung der Anforderungen mit der Gebäudehöhe ist also sachgerecht.

Der Lösungsansatz - Bild 2.1.1



Bild 2.1.1 zeigt das Prinzip der Lösung:

In den Treppenraum wird, z.B. von unten, unaufbereitete Außenluft eingeblasen. Eine Differenzdruckklappe am Kopf des Treppenraumes sorgt für die Begrenzung des Überdruckniveaus (3.Aufgabe).

Sind alle Türen des Treppenraumes geschlossen, dann durchströmt die eingeblasene Luft den ganzen Treppenraum und spült gegebenenfalls eingetragenen Rauch aus (2. Aufgabe).

Sind dagegen die Schleusentüren des Brandgeschosses offen, dann strömt die Luft aus dem Treppenraum über die Schleuse in das Brandgeschoss und verdrängt Luft bzw. Brandrauch aus dem Brandgeschoss über z.B. Fenster ins Freie. Durch die intensive Durchströmung der Schleuse wird Brandrauch am Eindringen in den Treppenraum gehindert (1. Aufgabe).

2.2 Die Bestimmungen des deutschen Baurechtes

Neben den recht allgemein gehaltenen Bestimmungen der Bauordnung sind hier die Maßgaben der Hochhausrichtlinien von Bedeutung. Um 1980 wurden Muster-Hochhausrichtlinien der ARGEBAU geschaffen, die in den Ländern umgesetzt wurden.

So z.B. in Bayern in die

"Richtlinien über die bauaufsichtliche Behandlung von Hochhäusern", Fassung Oktober 1982 [1], die derzeit noch Gültigkeit haben.

(Ein "Hochhaus" ist nach deutschem Baurecht ein Gebäude, dessen oberste Nutzebene mehr als 22 m über Gelände liegt. Dieses Höhenmaß hat sich aus der Reichweite üblicher Drehleitern ergeben. Ein Hochhaus ist also ein Haus, bei dem zumindest ein Teil der Benutzer nicht mehr von außen gerettet werden kann. "Hochhäuser" beginnen also – abhängig von der Stockwerkshöhe – bei 7 oder noch weniger Geschossen).

Hier relevante Auszüge seien wiedergegeben:

- 3.6.1.1 In Hochhäusern sind mindestens zwei Treppen oder eine Treppe in einem Sicherheitstreppenraum notwendig. Ist nur 1 Sicherheitstreppenraum vorhanden, muss er an einer Außenwand liegen. Bei mehr als 60 m Höhe müssen alle notwendigen Treppen in Sicherheitstreppenräumen liegen (mindestens 2).
- 3.6.2.2 Treppenläufe und Podeste müssen geschlossen und feuerbeständig sein.
- 3.6.2.4 Treppenräume müssen an ihrer obersten Stelle eine Rauchabzugsöffnung haben. Ihre Fläche muss mindestens 5 % der Grundfläche des zugehörigen Treppenraumes, mindestens aber 1 m² groß sein. Sie muss in jedem Geschoss bedient werden können.
- 3.6.3.3 Lüftung innen liegender Treppenräume.
 Im Brandfall muss der Treppenraum mit mindestens 10000 m³/h Luft von unten nach oben durchspült werden. Der Überdruck gegenüber der Atmosphäre darf

50 Pa nicht überschreiten. Die Treppenläufe dürfen im Treppenraum nicht durch Wände oder Schächte voneinander getrennt sein.

- 3.6.6 Sicherheitstreppenräume
- (3.6.7)behandelt außenliegende Sicherheitstreppenräume)
- (3.6.8)behandelt Sicherheitstreppenräume an einem Schacht (Firetower))
- 3.6.9 behandelt Sicherheitstreppenräume im Gebäudeinneren
- 3.6.9.1 fordert den Zugang nur über Sicherheitsschleusen
- 3.6.9.2 Jeder Treppenraum mit den zugehörigen Sicherheitsschleusen muss eine eigene Lüftungsanlage haben. Der Treppenraum muss mit seinen Zugängen und der Lüftungsanlage so beschaffen sein, dass Feuer und Rauch nicht in ihn eindringen können.
- 3.6.9.3 Im Brandfall muss bei geöffneten Schleusentüren von der Schleuse in das Brandgeschoss ein Luftvolumenstrom von

$$\dot{V}_L = k \cdot b \cdot h^{1.5}$$
 in m³/s (2.2.1)

strömen. Hierin bedeuten: b = Türbreite [m]

h = Türhöhe [m] und

- k = Konstantfaktor = 1,8 wenn Brandraum direkt an Schleuse grenzt bzw.
 - = 1.5 wenn sich zwischen Schleuse und Brandraum ein brandlastfreier Bereich (z.B. Flur) befindet.
- 3.6.9.4 Die für diesen Volumenstrom nötige Druckdifferenz richtet sich nach der Art, wie die Rauchgase aus dem Brandraum ins Freie abgeführt werden. Werden die Rauchgase durch z.B. waagrechte Kanäle aus dem Brandraum gedrückt, so muss der Druck in der Schleuse entsprechend dem Strömungswiderstand erhöht werden, sind Schächte oder Abzugsventilatoren angeordnet, die im Brandraum einen Unterdruck erzeugen, so kann bei fensterlosen Räumen der Druck in der Schleuse um den Betrag des erzeugten Unterdruckes im Brandraum verringert werden. Bei Räumen mit Fenstern ist die Lüftungsanlage für einen Druck in der Schleuse von mindestens 10 Pa auszulegen.
- 3.6.9.5 Auf keiner Tür darf ein höherer Druck als 50 Pa auftreten.
- 3.6.9.6 Das Druckbelüftungssystem muss in jedem Geschoss durch Rauchmelder selbsttätig in Betrieb gesetzt werden können.

Soweit die z.Zt. gültigen Bestimmungen des Baurechtes.

John schildert in [2] die Herkunft der Gleichung 2.2.1:

$$\dot{V}_{L} = \alpha \cdot \frac{2}{3} \cdot \sqrt{2g\left(1 - \frac{T_{L}}{T_{R}}\right)} \cdot b \cdot h^{\frac{3}{2}} \quad \text{in } \text{m}^{3}/\text{s}$$
(2.2.2)

mit α = Strömungsbeiwert, ca. 0,8

g = Erdbeschleunigung in m/s²

- T_R = Absoluttemperatur des Brandrauch-Luft-Gemisches im verqualmten Bereich in K
- T_L = Absoluttemperatur im Rettungsweg in K.

Hieraus ergibt sich die Temperaturabhängigkeit von V_L :

$$\dot{V}_{L} \approx \sqrt{1 - \frac{T_{L}}{T_{R}}}$$
(2.2.3)

2.3 Der übliche Weg der Umsetzung

Bild 2.1.1 zeigt, wie diese Bestimmungen üblicherweise umgesetzt werden.

Das Ventilator-Aggregat wird meist am Fuß des Treppenraumes vorgesehen. Es drückt die sich aus [1], Ziffer 3.6.9.3 ergebende Luftmenge (i.A. 18000 m³/h) in den Treppenraum. Am Kopf des Treppenraumes wird eine meist hilfskraftlos geregelte Überdruckklappe vorgesehen, die den "Druck im Treppenraum" auf z.B. 50 Pa limitiert. Einrichtungen für die Abströmung des Brandgases aus dem Brandgeschoss ins Freie werden äußerst selten vorgesehen (gesicherte, statistische Unterlagen darüber liegen allerdings nicht vor).

Läuft nun die Anlage bei geschlossenen Schleusentüren an, dann durchströmt die Luft den Treppenraum von unten nach oben, wirkt also wie eine Spülluftanlage. Werden dagegen Schleusentüren geöffnet, dann geht der Planer davon aus, dass die gesamte Luftmenge jetzt für die Schleusendurchspülung in das Brandgeschoss hinein zur Verfügung steht, während die Regelklappe am Kopf des Treppenraumes durch den abnehmenden Druck schließt.

Die Wirklichkeit sieht bei hohen Hochhäusern häufig freilich ganz anders aus. Die Fehlfunktionen können von kaum nennenswerter Schleusendurchspülung im Brandfall bis hin zu akuten Gefahren für Leib und Leben der Fliehenden reichen!

Um dies verstehen zu können – und es besser zu machen - bedarf es freilich näherer Untersuchungen. Sie sind Gegenstand dieses Bandes.

6

3 Eine Literaturrecherche im deutsch- und englischsprachigen Raum

3.1 Allgemeines

Nachdem eigene Überlegungen und Berechnungen der Verfasser auf Basis der physikalischen Gegebenheiten in einem nicht-isotherm durchströmten Treppenraum die Gefahren der in Deutschland üblichen Praxis offengelegt hatten (siehe auch [3] und [4]), drängte sich selbstverständlich die Frage auf, wie jenseits des Atlantik, wo Hochhäuser eine viel längere Geschichte haben als in Deutschland, diese Probleme wohl gelöst würden.

Vorab ist festzustellen, dass die Recherche der englisch- und deutschsprachigen Literatur nicht nur ein so nicht erwartetes Übergewicht der englischsprachigen Literatur ergeben hat, sondern auch ein einigermaßen überraschendes Defizit deutschsprachiger Auseinandersetzung mit dem anscheinend nicht erkannten Problem "Überdruckbelüftung von Sicherheitstreppenräumen". Dies gilt besonders angesichts der mittlerweile mit einer Fülle hoher Hochhäuser ausgestatteten Main-Metropole Frankfurt.

In der deutschsprachigen Literatur gibt es interessante Beiträge von John [2] und [5], die sich aber nur mit Teilaspekten der Überdruckbelüftung beschäftigen. Daneben 2 Aufsätze der Verfasser [3] und [4], die sich kritisch mit der diesbezüglichen Praxis in Deutschland und den sich daraus ergebenden Gefahren auseinandersetzen.

Völlig anders die Situation im englischsprachigen Raum, insbesondere natürlich in Übersee. Eine Reihe von Forschern haben diesem Thema umfangreiche Forschungsaktivitäten gewidmet. Hervorragend sind im wahrsten Sinn zu nennen:

George T. Tamura, National Research Council of Canada und

John H. Klote, National Bureau of Standards, USA, Center for Fire Research,

von denen ein Großteil der wichtigen Veröffentlichungen zu diesem Thema stammt.

Vorausgeschickt werden soll aber, dass ihre Ergebnisse und ihre "Philosophie" aus mehreren Gründen nicht auf Deutschland übertragen werden können. Dennoch sind die Ergebnisse, die dort gefunden wurden, außerordentlich interessant. Die Gründlichkeit, mit der dort geforscht wurde, findet in Deutschland nichts annähernd Ebenbürtiges.

3.2 Brandereignisse in Hochhäusern

G.T. Tamura beginnt sein Buch "Smoke Movement & Control in High-rise Buildings", 1994 [6] mit Kurzberichten über ausgewählte Brandereignisse.

J.H. Klote tut das Gleiche in seinem Buch "Principles of Smoke Management", 2002 [7].

Bild 3.2.1 ist [7] entnommen und informiert über Brandereignisse in Hochhäusern mit vielen Toten.



Bild 3.2.1: Deaths by floor for three fires where the fire was located on the first floor.

In allen 3 Fällen war das Feuer im Erdgeschoss ausgebrochen, die ganz überwiegende Mehrzahl der Toten gab es jedoch in den oberen Geschossen, also weit entfernt vom Brandherd! Bis dorthin ist der Brand in keinem der Fälle gelangt – dagegen aber der Brandrauch, der bekanntlich für ca. 90 % aller "Brandtoten" verantwortlich ist.

[7] enthält leider keine näheren Angaben über bauliche und brandschutztechnische Gegebenheiten. Eindeutig und alarmierend ist aber, dass der Brandrauch über bauliche "Kanäle" in die oberen Geschosse gekommen ist. In Frage kommen dafür sicher weniger bauliche Undichtigkeiten in den Zwischendecken, als vielmehr Schächte, in denen Brandrauch ohne große Widerstände vom Brandgeschoss aus auch nach ganz oben gelangen konnte.

Das könnten sein:

Aufzugsschächte, Treppenräume (!), Installationsschächte für Heizung, Klima, Sanitär, Installationsschächte für die Elektroverteilung und/oder Luftkanäle von zentralen RLT-Anlagen.

Die Frage drängt sich freilich auf, warum gegen solche offenkundig lebensbedrohenden Missstände nichts unternommen wurde. Insbesondere die Brände in Las Vegas (1980) und in Johnson-City (1989) fallen in eine Zeit, in der die wissenschaftliche Auseinandersetzung mit dem "Smoke Movement" schon weit fortgeschritten war (sie hatte Ende der 60er Jahre intensiv eingesetzt).

Auch Tamura berichtet in [6] über Brandfälle, bei denen Brandrauch über Schächte in höher gelegene Geschosse gelangt ist, mit Toten – auch im Treppenraum! Dort wird auch berichtet von einem Brand im Park Hotel, North York, ON, 1981, bei dem bei –15°C Außentemperatur von Hotelgästen eine Außentür aufs Dach geöffnet wurde, von geborstenen Scheiben und"The door to the west stairwell was not able to withstand the pressure forces created by stack action during the fire" (4 Tote im Treppenraum).

Weder Tamura noch Klote geben irgendwelche Hinweise, wie man solche katastrophalen Brandfolgen vermeiden hätte können.

3.3 Gebäude-Undichtigkeiten

Hochhäuser jenseits des Atlantiks sind überwiegend als bekleidete Stahlbauten errichtet, während in Deutschland selbst bei großen Höhen die Stahlbetonbauweise "aus einem Guss" dominiert. Dies ist sicher ein wesentlicher Grund für den in Übersee ganz anderen Ansatz zur Lösung der Überdruckbelüftung. Die Bauten sind – gemessen an unseren Maßstäben – sehr undicht. Undichtigkeiten sind in der Literatur ein ganz zentrales, umfangreiches Thema und Voraussetzung alles Weiteren.

So gibt Tamura in [6] für verschiedene Bauteile folgende, gemessene relative Undichtigkeiten an (Tabelle 3.3.1):

Tabelle 3.3.1:

Equivalent Leakage Areas for Building Components of Office Buildings		
Building Components	Tightness	· Area Ratio
Exterior Walls ^{4.5}	Tight	0.70×10 ⁻⁴
	Average	0.21×10 ⁻³
	Loose	0.42×10 ⁻³
	Very Loose	0.13×10 ⁻²
Stairshaft Walls⁵	Tight	0.14×10 ⁻⁴
	Average	0.11×10 ⁻³
	Loose	0.35×10 ⁻³
Elevator Shaft Walls ⁶	Tight	0.18×10 ⁻³
	Average	0.84×10 ⁻³
	Loose	0.18×10 ⁻²
Floors ⁸	Tight	0.66×10 ⁻⁵
	Average	0.52×10 ⁻⁴
	Loose	0.17×10^{-3}
Stair Doors ⁶	Tight	0.87×10 ⁻²
	Average	0.13×10 ¹
	Loose	0.18×10 ⁻¹
Elevator Doors ⁶	Tight	0.20×10 ⁻¹
	Average	0.24×10 ⁻¹
	Loose	0.28×10'

Und, etwas deutlicher, in logarithmischer Darstellung





UNIV.-PROF. DR.-ING. DIETER OSTERTAG

Hierin stellen Aufzugstüren ein Sonderthema dar, da hier wie dort – bedingt durch die notwendigen Toleranzen für die Bewegung der meist mehrteiligen Schiebetüren – eine grobe Undichtigkeit unvermeidbares Merkmal solcher Türen ist. Spaltbreiten um 5 mm sind typisch und führen im Regelfall bei 2 waagrechten und 3 senkrechten Spalten zu der außerordentlich großen Leckagefläche von 5 bis 6 dm² für eine normale Tür.

Betrachtet man dagegen z.B. die (gemessenen) Werte von Tamura für Treppenraumtüren, dann liegen die Werte ähnlich hoch. Tamura nennt mittlere Spaltbreiten zwischen Tür und Rahmen von 4 mm, was bei z.B. 50 Pa Differenzdruck zu einer Leckageluftmenge von ca. 500 m³/h führt!

Demgegenüber wird in Deutschland ein sachkundiger Planer eine der beiden Schleusentüren (in den USA sind Schleusen offenbar wenig verbreitet) als T30RS-Tür nach DIN 18095 [8] ausführen. Deren Leckage ist auf 20 m³/h bei 50 Pa beschränkt!

Auffallend sind ferner die hohen relativen Leckageflächen bei Schächten insbesondere für Aufzüge. Solche Schächte werden in Deutschland überwiegend aus Beton hergestellt. Absolut rissefreien Beton gibt es zwar nicht, doch sind die Betonflächen im lüftungstechnischen Sinn dicht, die Undichtigkeiten sicher vernachlässigbar.

Lediglich die Angaben für Decken (floors) und Fassade (exterior wall) erscheinen als übertragbar. Dabei klaffen allerdings die gemessenen Werte minimal/maximal erwartungsgemäß weit auseinander (ca. 1:25), da hier die handwerkliche Qualität der schon immer "schillernden" Arbeit am Bau ihre Auswirkungen zeigt.

3.4 Der thermische Auftrieb – Stack Action

Temperaturdifferenzen zwischen dem Gebäudeinneren und der Außenwelt führen wegen der Dichteunterschiede der Luft innen/außen zu Druckunterschieden und – soweit Öffnungen das zulassen – zu Luftbewegungen, zu "Zug". Das weiß eigentlich jeder aus Alltagserfahrung. Man öffne nur in einem mehrgeschossigen Haus bei niedrigen Außentemperaturen ein Fenster oben, eines unten bei offenen Innentüren!

In den USA heißt dieser thermische Auftrieb "Stack Effect" oder "Stack Action", Begriffe, die fast lautmalerisch die Dynamik dieser Naturerscheinung ansprechen.

Tamura benennt und berechnet diesen Stack Effect schon vor 25 Jahren korrekt zu

$$\Delta p = (\rho_0 - \rho_1) \cdot g \cdot h \tag{3.4.1}$$

mit Δp = thermischer Auftrieb in Pa ρ = Dichte in kg/m³ g = Erdbeschleunigung in m/s² h = Höhe in m

(Anmerkung: diese vereinfachte Gleichung geht von jeweils über die Höhe konstanten Dichtewerten aus, was natürlich nicht richtig ist. Der dadurch bedingte Fehler ist jedoch vernachlässigbar. So ergibt sich bei einer Innentemperatur von $+20^{\circ}$ C, einer Außentemperatur von -16° C und einem atm. Luftdruck von 100000 Pa bei 100 m Höhe eine Differenz von 2 Pa zur genauen Berechnung mittels der barometrischen Höhenformel),

oder

$$\Delta p = \frac{g \cdot p}{R} \cdot \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T_1}\right) \cdot h \tag{3.4.2}$$

mit p = Absolutdruck in N/m² R = Gaskonstante und T = Absoluttemperatur in K.

Der thermische Auftrieb ist also etwa proportional der Höhe und der Temperaturdifferenz. Seine größte Dynamik erreicht er im Winter bei extremer Kälte.

Im Sommer, wenn die Außentemperatur über der Innentemperatur liegt, kehrt sich der thermische Auftrieb um – "Reverse Stack Effect" –, bleibt aber wegen der kleineren Temperaturunterschiede größenmäßig hinter dem im Winter zurück

Wie aus Bild 3.4.1 zu entnehmen, beträgt er z.B. bei 20°C Innentemperatur, -10°C Au-Bentemperatur und 100 m Höhe bereits ein Vielfaches der zulässigen Differenzdruck-Toleranz. Der thermische Auftrieb wird also bei großen Höhen außerordentlich groß und schwankt witterungsabhängig zwischen +100 und -25 %.



Bild 3.4.1: Stack Action

Dabei ist zu beachten, dass der thermische Auftrieb sofort und unverzögert in voller Höhe wirksam wird, während bei der Gebäudeheizung Temperaturspitzen durch die thermische Trägheit des Gebäudes "verschliffen" werden. Wird die Thermik also mit den Heizungs-Auslegungstemperaturen berechnet, dann liegen die Ergebnisse auf der *unsicheren* Seite.

3.5 Die Druckverteilung im Gebäude

Im Folgenden sei angenommen:

- die RLT-Anlagen seien nicht in Betrieb,
- eine evtl. Überdruckbelüftung sei nicht in Betrieb und
- es sei kein Windeinfluss gegeben.

Unter diesen Bedingungen wird die Druckverteilung im Gebäude nur von der Außentemperatur und den Undichtigkeiten bestimmt.

Bei einem nicht unterteilten Innenraum (20°C) wird sich ein Druckverlauf wie in Bild 3.5.1 dargestellt einstellen, wenn die Außentemperatur kleiner als die Innentemperatur ist, z.B. -10° C, d.h. Winterfall:

۰.



Bild 3.5.1: Stack Action (im Winter)

Der Absolutdruck nimmt außen von unten nach oben naturgemäß stetig ab. Innen ergibt sich ebenfalls ein stetiger Abfall von unten nach oben, jedoch entsprechend der niedrigeren Luftdichte, weniger stark als außen. Der Innendruck folgt also der steileren Linie. Druckgleichheit zwischen innen und außen wird sich in der "neutralen Zone" einstellen, die im Schwerpunkt der äußeren Undichtigkeiten liegt, oft also bei etwa mittlerer Gebäudehöhe. Durch z.B. das Öffnen von Fenstern kann die neutrale Zone freilich beliebig über die Gebäudehöhe verschoben werden, während die Neigung der Linien erhalten bleibt.

Rechts in Bild 3.5.1 ist das Selbe, jedoch als Differenzdruckdiagramm dargestellt. Bezug ist immer der Außendruck, sodass die Außendrucklinie (Differenzdruck = Null) immer

senkrecht steht, während die Innendrucklinie (als Überdruck) bei $\vartheta_a < \vartheta_i$ immer nach rechts geneigt ist.

Die Verfasser geben der letzteren Darstellungsart den Vorzug, da sie deutlicher ist. Sie wird im Weiteren ausschließlich verwendet.

Aus Bild 3.5.1 ist also abzulesen, dass in der oberen Gebäudehälfte positiver Differenzdruck ansteht (Innendruck > Außendruck, die Luft will aus dem Gebäude nach außen strömen), wobei der maximale Überdruck ganz oben herrscht. Umgekehrt herrscht in der unteren Gebäudehälfte Unterdruck (Außendruck > Innendruck, die Luft will von außen ins Gebäude strömen), wobei der maximale Unterdruck ganz unten ansteht.

Stellt man sich anstelle der in mittlerer Höhe angenommenen Undichtigkeit zwei gleich große Undichtigkeiten ganz unten und ganz oben vor, dann würde bei etwa gleich bleibender neutraler Zone oben Luft aus dem Gebäude heraus, unten in das Gebäude herein strömen.

Welche Luftmengen strömen, wird durch Differenzdruck und Öffnungsgröße bestimmt. In der Öffnung kommt es nach Bernoulli zu einer Umsetzung von Druckenergie in kinetische Energie. Bei homogener, vollständiger Ausfüllung der Öffnung mit gleichmäßig strömender Luft (Einlaufdüse etc.) würde die statische Druckdifferenz vollständig in kinetische Energie umgesetzt, der Staudruck der strömenden Luft wäre gleich der Druckdifferenz, der Volumenstrom gleich der Geschwindigkeit, multipliziert mit der vollen Querschnittsfläche der Öffnung,

also

$$\Delta p = \frac{\rho}{2} w_L^2 = \Delta p_{dyn} \tag{3.5.1}$$

mit
$$w_L = \sqrt{\frac{2}{\rho}\Delta p}$$
 (3.5.2)

und
$$\dot{V}_L = w_L \cdot A = A \sqrt{\frac{2}{\rho} \Delta p}$$
 (3.5.3)

Bei der realen Strömung durch i.A. kantige Öffnungen tritt eine Strahleinschnürung mit Wirbelbildung ein, die den effektiven Strahlquerschnitt reduziert. Dies wird durch einen Strömungsbeiwert C berücksichtigt, der zwischen 0,6 und 0,7 liegt. Im Folgenden wird C = 0,65 verwendet.

(Korrekterweise muss darauf hingewiesen werden, dass Undichtigkeiten erst bei ausreichend großen Reynoldszahlen – hier Öffnungsquerschnitten – der oben gezeigten quadratischen Abhängigkeit des Differenzdruckes von der Luftgeschwindigkeit genügen. Bei feinen Spalten z.B. kann der Exponent bis auf den Wert 1 (proportionale Abhängigkeit) zurückgehen. Dennoch soll hier – wie von anderen Autoren auch praktiziert – ausschließlich der quadratische Zusammenhang verwendet werden.)

Entgegen Bild 3.5.1 hat nun ein reales Hochhaus wenigstens geschossweise Unterteilungen und Undichtigkeiten in fast allen Bauteilen.



Bild 3.5.2: Undichtigkeiten, schematisch

Bild 3.5.2 veranschaulicht dies, wobei die – geschossweisen – Undichtigkeiten der Schächte alle in A_{Si} ("Schacht-innen") zusammengefasst seien. Davon unabhängig sind die Fassadenundichtigkeiten A_{io} ("innen-außen") und A_D ("Decken").

Die Druckverhältnisse hängen nun vom Verhältnis der Leckagequerschnitte untereinander ab:

Ein Gebäude ohne vertikale Undichtigkeiten (A_{Si} und A_D), also mit nur äußeren Undichtigkeiten würde die in Bild 3.5.3 gezeigten Druckverhältnisse aufweisen:



Bild 3.5.3: Druckverteilung mit nur äußeren Undichtigkeiten

Jedes Geschoss würde zwar entsprechend der höheren Innentemperatur einen stark geneigten Druckverlauf über die Geschosshöhe haben, dennoch würde der mittlere Innendruck – strichpunktierte Linie – dem Außendruck entsprechen. Zwischen den Stockwerken, beiderseits der Decken, würde der thermische Differenzdruck eines Geschosses anstehen. Die durchlaufende, geneigte Linie gibt den Druckverlauf in einem Schacht, der hinreichend reibungsfrei gedacht sei, wieder.

Sind nun äußere, aber auch vertikale Undichtigkeiten gegeben, dann ergeben sich Verknüpfungen, die von Tamura und Klote eingehend analysiert und behandelt werden. So ergeben sich nach Klote bei vernachlässigbarem A_D die Druckverhältnisse nach der Gleichung

$$\Delta p_{Si} = \frac{\Delta p_{So}}{1 + (A_{Si}/A_{io})^2}$$
(3.5.4)

Wobei die Indizes

S für Schacht, *i* für Innenraum und *o* für außen

stehen.

Bild 3.5.4 zeigt die Auswirkungen solcher Undichtigkeiten.

17



Bild 3.5.4: Druckverhältnisse bei äußeren und inneren Undichtigkeiten

Klote beziffert in [7] die Schwankungsbreite des Verhältnisses A_{SI}/A_{io} mit 1,7 bis 7,0. Diese noch mäßig zu nennende Schwankungsbreite überrascht angesichts der viel größeren Streubreiten der von Tamura in [6] angegebenen relativen Leckageflächen vieler Bauteile.

Berechnet man für diese Grenzwerte nach Gl. 3.5.4 die Druckverhältnisse, dann wird

- bei $A_{si}/A_{io} = 1,7$ $\Delta p_{Si} = 0,257 \cdot \Delta p_{So}$ und
- bei $A_{si}/A_{io} = 7,0$ $\Delta p_{Si} = 0,02 \cdot \Delta p_{So}.$

Die Sägezahnlinie für $A_{si}/A_{io} = 1,7$ ist in Bild 3.5.4 eingezeichnet, die für $A_{si}/A_{io} = 7,0$ konnte nicht mehr eingezeichnet werden, da sie praktisch mit der durchgehenden Linie des Schachtes zusammenfällt.

Bild 3.5.4 macht deutlich, dass bei den von Klote angegebenen Leckage-Verhältnissen der Druckverlauf in den Geschossen ("i") weitgehend mit dem Druckverlauf in Schächten übereinstimmt. Im Gebäudeinneren gibt es also keine großen Differenzdrücke. Dagegen weichen die Innendrücke z.T. erheblich vom Außendruck ab.

3.6 "Stairwell Pressurization" – die amerikanische Lösung

Der aufinerksame Leser wird bemerkt haben, dass der in Bild 3.5.4 gezeigte Fall, gekennzeichnet durch

- gute äußere Dichtigkeit und
- grobe vertikale, innere Undichtigkeiten

zu einem sehr interessanten Ergebnis führt: der Druckverlauf in den Geschossen liegt nahe bei dem in Schächten. Beide Verläufe sind entsprechend dem hier starken Stack Effect stark geneigt, weichen also stark vom Außendruck ab. Dennoch kann sich der Stack Effect innen praktisch nicht wesentlich auswirken, da keine Außenöffnungen (mit Ausnahme der geringen Leckageflächen) vorhanden sind.

Unter diesen Umständen kann es durchaus gelingen, mit mäßigen Differenzdrücken eine Überdruckbelüftung des Treppenraumes zu realisieren. Dies gilt insbesondere dann, wenn bei höheren Hochhäusern z.B. durch Mehrfacheinführung der Zuluft die Reibungsdruckabfälle klein gehalten werden.

Eine von Tamura durchgeführte Messung [13] zeigt dies beispielhaft in Bild 3.6.1 (allerdings in Absolutdruck-Darstellung).



Das ist der Kern der amerikanisch-kanadischen Lösung.

Da man kein Mittel kennt, den gefährlichen Stack Effect im Treppenraum, im Gebäudeinneren zu beherrschen, "sperrt man ihn weitgehend aus", indem man das Gebäude innen absichtlich undicht lässt, es aber außen gut dichtet. Damit lassen sich, so lange die äußere Dichtigkeit nicht verletzt wird, innen, quasi "in einer heilen, inneren Welt", durchaus ausreichende Druckverhältnisse herstellen.

Dabei nimmt man aber notgedrungen in Kauf, dass

- keine Außenöffnung zur Rauchableitung möglich ist,
- der Brandrauch durch die Überdruckbelüftung über die Schächte, die nach Tamura 95 % der vertikalen Undichtigkeiten ausmachen, in andere Gebäudebereiche, insbesondere die oberen Geschosse (siehe Brandereignisse) "verdrückt" wird,
- die Schleusendurchlüftung bei offenen Schleusentüren weit z.B. hinter den in den deutschen Hochhausrichtlinien geforderten Werten zurückbleibt (s.a. die folgende Anmerkung) und
- im Falle eines Scheibenbruches insbesondere bei einem Brand in einem der unteren Geschosse der Stack-Effect mit u.U. verheerenden Folgen wirksam wird.

(Anmerkung zum dritten Punkt: Messergebnisse werden zwar nicht explizit genannt. Tamura weist aber darauf hin, dass bei einer versuchsweisen Öffnung eines Brandraumfensters die Schleusendurchlüftung *wesentlich intensiviert* worden sei. Er führt weiter aus, dass diese Intensivierung durchaus *nicht erwünscht* sei, da sie zur Brandanfachung führe – eine Begründung, die nach Meinung der Verfasser keiner ernsthaften Analyse standhält.)

Welch hohen Stellenwert der "Stack Effect" in allen Überlegungen einnimmt und dass sich die Forscher der Schwächen ihres Lösungsansatzes durchaus bewusst sind, mögen folgende Zitate belegen:

- "This vertical flow reduces the effect of the indoor/outdoor temperature difference on the pressure profiles. Therefore it appears that a building without vertical flow is the most severe case in terms of maximum and minimum pressures". (Klote in [9]).
- "In a fire situation on lower floors, there is a tendency for smoke to move to upper floors via the vertical shaft, and for stairwells and corridors to become smoke-filled. This pattern of smoke movement, induced by stack action, must be regarded as one of the major problems in providing for fire safety in high-rise buildings".(Tamura in [6])
- "Smoke movement from the building fire can be dominated by stack effect This kind of smoke flow can have fatal consequences, as in the fires at the MGM Grand and other buildings". (Klote in [7]).

- "In the event of a window breakage in the fire room, the pressure difference across the exterior wall would be transferred to the corridor wall and, hence, a fire located on a lower floor is much more serious in terms of smoke contamination than one located on a upper floor". (Tamura in [10]).
- "This example illustrates that when the outside temperature is significantly lower than the stairwell temperature, a pressurized stairwell can fail to maintain positive pressurization for some of the lower floors." (Klote in [9])
- "The building stack effect has provided the driving force that has readily moved smoke into and out of the loosely constructed elevator hoistways" (NFPA [12]).

Die amerikanische Lösung lebt also von den Undichtigkeiten des Gebäudeinneren und der im Verhältnis dazu dichten Außenhülle. Auf diese Weise lässt sich der gefürchtete Stack Effect weitgehend "draußen halten", wenn auch mit erheblichen Konzessionen an die Wirksamkeit und ganz besonders die Sicherheit der Technik.

Aus diesem Lösungsansatz erklärt sich auch die überaus intensive Beschäftigung der Forscher mit Undichtigkeiten und ihren verketteten Wirkungen. Bei den erheblichen Unsicherheiten in der Vorhersage dieser Undichtigkeiten erscheint das Ganze als reichlich unsichere Planungsgrundlage. Bei allem Respekt vor der wissenschaftlichen Arbeit der Forscher kann dieser Lösungsweg letztlich nicht überzeugen. Es handelt sich um eine echte Notlösung, die nur damit zu rechtfertigen ist, dass eben kein Mittel gegen den Stack Effect bekannt war.

Die Veränderungen des Stack Effects während des Betriebes der Überdruckbelüftung finden in der englischsprachigen Literatur keine Beachtung. Sie werden in der vorliegenden Arbeit untersucht werden.

Wenig Beachtung finden in der überprüften Literatur auch die Reibungsdruckverluste bei der Durchströmung des Treppenraumes. So finden sich zwar einzelne Messergebnisse ohne ausreichende Angaben über die Randbedingungen, jedoch keine systematischen Untersuchungen für den Anwender.

Das Gemeinsame der englischsprachigen Forschung ist damit besprochen. Generell gilt aber für die Technik der Ausführung:

"There are still widely divergent opinions among the experts". (Klote in [11]).

So erklärt es sich auch, dass in

NFPA 92A Recommended Practice for Smoke Control Systems, 2000 Edition [12]



viele verschiedene Ausführungsarten – siehe die folgenden Bilder – vorgestellt werden, ohne dass eine für den Anwender hilfreiche Bewertung oder Zuordnung erfolgen würde.

Bild 3.6.2: Ausführungsbeispiele in NFPA 92 A [12]

Klote sagt dazu in [7]:

"It is impossible to provide detailed design methods for the almost infinite number of possible stairwell pressurization systems".

Dennoch hat die Literaturrecherche eine Fülle von Ergebnissen und Erkenntnissen gebracht, die für die vorliegende Arbeit wertvoll waren. Auch in den folgenden Kapiteln werden weitere Ergebnisse der Literaturrecherche behandelt, wo sie inhaltlich hingehören.

4 Sicherheitstreppenräume für Hochhäuser in Deutschland

4.1 Druckverteilung im Gebäude

Im vorigen Abschnitt war entwickelt worden, worauf es bei der amerikanischen Lösung, der amerikanischen "Philosophie" ankommt.

Bild 3.5.4 hatte gezeigt, wie diese Lösung funktioniert, mit einem innen sehr undichten Gebäude und einer – relativ dazu – dichten Außenhülle. Die Schächte für Aufzüge und Installationen hatten dort eine große Rolle gespielt.

Wollte man nun – ungeachtet aller herausgearbeiteten Mängel – dieses System übernehmen, dann müssten unsere Hochhäuser ähnliche Charakteristika haben.

Das ist aber aus mehreren Gründen nicht der Fall:

- a) Die in Deutschland auch bei größeren Höhen dominante Stahlbetonbauweise "aus einem Guss" hat a priori weniger Undichtigkeiten als die amerikanische Bauweise des bekleideten Stahlbaues mit seinen vielen Fugen. Das gilt insbesondere auch für die Schächte, die in Deutschland überwiegend auch aus Stahlbeton hergestellt werden. Dabei stellen freilich unsaubere Abmauerungen und Einmörtelungen von Leitungen, die die Schachtwandung durchbrechen, eine mögliche Schwachstelle in der Dichtigkeit dar.
- b) Die jenseits des Atlantik (s. Abschnitt 3) offenbar üblichen, grob undichten Türen entsprechen nicht deutscher Bautradition. RS-Türen nach DIN 18 095 haben Leckagen, die bei nur wenigen Prozent der dort üblichen Werte liegen.
- c) Die äußere Dichtheit der Gebäude wichtig für die amerikanische Philosophie dürfte in Deutschland trotz Energiesparmaßnahmen geringer geworden sein infolge der heute fast unverzichtbaren Öffenbarkeit der Fenster der Nutzräume und der oft zu beobachtenden Abkehr von zentralen Klimaanlagen, die durch dezentrale Geräte mit Außenluftanschlüssen, die durch die Fassade geführt werden, ersetzt werden.
- d) Von besonderer Bedeutung sind in diesem Zusammenhang Maßnahmen, die aus brandschutztechnischen Erwägungen zunehmend angewandt werden.

Die in Abschnitt 3 dargestellte Methode aus Übersee, Brandrauch aus dem Brandraum insbesondere über Schächte in andere Bereiche des Gebäudes, insbesondere die oberen Geschosse zu "verdrücken" konterkariert selbstverständlich vernünftige Brandschutzüberlegungen. Die Vermeidung solcher gefährlichen Brandrauch-Übertragungen muss Ziel fachgerechten Brandschutzes sein. So berichtet K. Tönnes [14] von Grundsätzen, die sich die Feuerwehr von Frankfurt/Main bei der Beurteilung von Hochhausplanungen zu Eigen gemacht hat:

- Aufzüge werden grundsätzlich über Vorräume erschlossen (automatisch schließende Türen, und damit "Herausnahme" aus dem relevanten Innenbereich),
- Elektroschächte müssen grundsätzlich in jeder Deckenebene mit 90 Minuten Feuerwiderstand geschottet werden,
- Durchgehende Installationsschächte für Heizung, Klima, Sanitär werden grundsätzlich nur über Vorräume erschlossen,
- Brandschutzklappen müssen bei Erkennung von Rauch automatisch schließen (gleichwertig ist natürlich das automatische Schließen aller in den Geschossabgängen eingebauten Brandschutzklappen im Brandfall).

Diese Grundsätze sind unbedingt sinnvoll und uneingeschränkt zu begrüßen (Sie scheinen sich auch zunehmend durchzusetzen. So war in *allen* mittlerweile bearbeiteten Hochhausobjekten die besonders wichtige luftraummäßige Abtrennung der Aufzüge im Brandfall bereits umgesetzt).

Alle diese Maßnahmen heben darauf ab, Schächte als die dominanten Rauchübertragungswege auszuschalten – und damit (sicher unbewusst) die Voraussetzungen für die amerikanische Lösung weiter zu verschlechtern!

Als Ergebnis all dieser Voraussetzungen und Maßnahmen ist festzustellen, dass die in Bild 3.5.4 dargestellte Druckverteilung im Gebäude stark verändert wird.

Exakte Werte für die Leckagen lassen sich hier natürlich ebensowenig angeben, doch wird die weitgehende Eliminierung von Schacht-Übertragungswegen auf jeden Fall zu wesentlich niedrigeren Leckageverhältnissen innen/außen führen. Bild 4.1.1 zeigt die Druckverteilung für wahrscheinliche Leckageverhältnisse

$$A_{si}/A_{io} = 1,0 \implies \Delta p_{Si} = 0,5 \cdot \Delta p_{So} \text{ und}$$

 $A_{si}/A_{io} = 0,3 \implies \Delta p_{Si} = 0,92 \cdot \Delta p_{So}$

Dabei ist jeweils nur die mittlere Druckverlaufslinie (strichpunktiert) eingetragen, da die Sägezahnkurven bei hier, in der Schemadarstellung gewählten nur 7 Geschossen, nur irritieren würden.



Bild 4.1.1: Druckverhältnisse bei geringen inneren Undichtigkeiten

Wesentliches Ergebnis der Veränderung gegenüber Bild 3.5.4 ist die Annäherung des Druckverlaufes an den Außendruck!

Eine drastische, grundsätzliche Abweichung von der amerikanischen Praxis ist ferner die Abführung der Brandgase aus dem Brandraum ins Freie. Die dazu verwendete Außenöffnung muss einen freien Öffnungsquerschnitt von mind. ca. 1,5 m² haben. Wird sie im Brandfall automatisch (also motorisch) geöffnet, dann wird das Brandgeschoss von selbst zur neutralen Zone, der Innendruck passt sich dem Außendruck an. Die nur noch schwach geneigte Innendruck-Linie wird also – je nach Lage des Brandgeschosses – parallel verschoben.

Daraus ergibt sich eine völlig andere Situation, als sie in USA zu erwarten ist – und dort angestrebt wird:

- Im Brandgeschoss liegt immer unabhängig von seiner Lage im Gebäude Außendruck vor (Differenzdruck 0),
- In den Geschossen darunter und darüber bleiben die Differenzdrücke gegen außen gering,
- Der Druckverlauf im Brandfall weicht von dem im "Normalbetrieb" (insbesondere Aufzüge als Schächte wirksam) ab. Die Änderung erfolgt spontan bei der Freigabe der Außenöffnung.
- Die Schleusendurchspülung bei offenen Schleusentüren wird wesentlich intensiviert.

25

4.2 Der Druckverlauf im Treppenraum

4.2.1 Allgemeines

Erklärtes Ziel der Arbeit der Verfasser war es von Anfang an, ein Berechnungsverfahren mit den dazu notwendigen Grundlagen zu schaffen, das es erlaubt, die Einsatzgrenzen verschiedener Systeme eindeutig abzustecken und das als sichere Planungsgrundlage für Überdruckbelüftungsanlagen von Sicherheitstreppenräumen dienen kann.

Auf dieser Basis können dann fundierte Empfehlungen für die notwendige Aktualisierung bauaufsichtlicher Richtlinien – hier natürlich der Hochhausrichtlinien – erarbeitet werden.

4.2.2 Der Sicherheitstreppenraum in Hochhäusern

Treppenräume in deutschen Hochhäusern sind in aller Regel in Stahlbetonbauweise erstellt. Die Umfassungswände dürfen im lüftungstechnischen Sinn als "dicht" gelten. Die einzigen Öffnungen in den Umfassungswänden sind im Allgemeinen die Zugänge zu den Schleusen. Sie werden mit rauchdichten Türen, z.B. T30RS-Türen nach DIN 18 095 abgeschlossen, die eine maximale Leckage von 20 m³/h bei 50 Pa haben dürfen.

Daneben gibt es natürlich noch Öffnungen für Zuluft und Fortluft sowie die ausgangsseitige Tür bzw. Schleuse, die hier, bei der Ermittlung des Druckverlaufes, keine Rolle spielen.

Aufgrund der minimalen Leckagen im Treppenraum ist es meist zulässig, die Leckagen zu vernachlässigen (wer es besonders genau machen will, der kann sie auch der Abström-Luftmenge in das Brandgeschoss zuschlagen und bleibt dabei auf der sicheren Seite).

4.2.3 Die Luftführung

Die Zulufteinführung erfolgt in Deutschland in aller Regel unten. Neben dem Vorteil der dann grundsätzlich von unten nach oben gerichteten Strömung hat diese Lösung den Nachteil, dass dann besonders große Luftverluste bei offener Ausgangstür(en) auftreten (s.a. Kapitel 6.3). Oft ist deshalb eine zumindest teilweise weiter oben erfolgende Zulufteinführung sinnvoll.

Unabhängig von der jeweiligen Lösung ist aber der gesamte Treppenraum durchströmt, wobei der Luftvolumenstrom in verschiedenen Höhen gegebenenfalls recht unterschiedlich groß sein kann (z.B. Abströmung ins Brandgeschoss). Die Luft erfährt bei ihrer Durchströmung des Treppenraumes Veränderungen des Differenzdruckes gegenüber dem Außendruck durch zwei physikalische Phänomene:

- Druckverluste durch Reibung und
- Druckgewinne durch den Stack-Effect in Winter- und Übergangszeit (ϑ_a<ϑ_i) bzw.
 Druckverluste durch den Stack-Effect im Hochsommer (ϑ_a>ϑ_i).

Gleichzeitig findet zwischen Betonoberflächen und Luft ein Wärmeaustausch statt, der die Lufttemperatur verändert.

4.2.4 Druckverluste durch Reibung

Strömungsvorgänge führen zu Druckverlusten. Im Treppenraum werden sie insbesondere durch die Hindernisse Treppenpodeste, Treppenläufe und Treppengeländer verursacht.

Die bei üblichen Überdruckbelüftungsanlagen relativ niedrigen mittleren Aufwärtsgeschwindigkeiten von weniger als 0,5 m/s dürfen nicht darüber hinweg täuschen, dass die Reibungsdruckverluste – natürlich besonders bei hohen Hochhäusern – sehr wohl einen limitierenden Faktor darstellen.

Treppenräume sehen in Deutschland im Allgemeinen recht ähnlich aus. Aus Platzgründen wird diesem, nur im Krisenfall wichtigen Funktionsbereich meist nur die dringend notwendige Grundrissfläche eingeräumt:

Entsprechend der Mindest-Laufbreite von 1,25 m werden Läufe und Podeste bei weitgehend festen Stufenmaßen (z.B. 28 cm Trittstufe, 17,5 cm Setzstufe) bemessen, die Augenbreite beträgt oft nur 15 cm, gerade genug, ein "Filigrangeländer" unterzubringen, also ein "Minimalgeländer" (kostenmäßig), bestehend aus Handlauf und meist 6 bis 7 parallel geführten, dünnen Rundstangen (z.B. 12 mm; zur Erfüllung der 12 cm-Kinderkopf-Regel).

Daraus scheint es naheliegend, abzuleiten, dass der Druckabfall-Koeffizient immer ähnlich sein muss.

Dieser Schein trügt!

Abweichungen in der Geschosshöhe, gegebenenfalls Laufbreite, Podesttiefe, Geländerausführung(!), aber auch eventuelle Bypässe bedingen Druckabfälle, die, bei gleichem Luftvolumenstrom, allemal 1:3 auseinanderklaffen.

Eine seriöse Berechnung verlangt natürlich eine Vorausbestimmung, da Bezug und Nutzung eines Gebäudes selbstverständlich die Funktionstüchtigkeit der Überdruckbelüftung der Sicherheitstreppenräume voraussetzen! Die Verfasser haben deshalb systematisch angelegte Versuchsreihen durchgeführt, um allein aus den Zeichnungen des Treppenraumes heraus eine hinreichend genaue Vorhersage des zu erwartenden Verlustbeiwertes machen zu können.

Hierzu wurden Modellversuche an einem maßstäblich genauen Modell im Maßstab 1:6 durchgeführt (siehe hierzu die folgenden Bilder 4.2.4.1 und 4.2.4.2). Solche Versuche liefern wissenschaftlich korrekte Ergebnisse, wenn die Abbildung in allen Einzelheiten maßstäblich korrekt ist und die Reynoldszahlen von Vorbild und Modell übereinstimmen. Diese Kennzahl beschreibt das Verhältnis von Trägheits- zu Zähigkeitskräften, das die Strömungsform bestimmt. Der große Maßstab 1:6 wurde auch gewählt, weil er neben einer sauberen Angleichung der Reynoldszahl zu beherrschbaren und messtechnisch gut erfassbaren Geschwindigkeiten (in Modell gegenüber der Realität die 6-fache Geschwindigkeit) und Drücken (im Modell die $6^2 = 36$ -fachen Drücke) führt.

Die Versuche wurden mit zunehmender Luftleistung, mindestens aber bis zur Reynoldszahl des Vorbildes durchgeführt. Erwartungsgemäß ergeben sich in Nähe der richtigen Reynoldszahl keine Veränderungen des Verlustbeiwertes mehr.

Im Modell wurden jeweils 7 Geschosse nachgebaut, da

)

ł

- sich die richtige Strömungsform erst nach einem gewissen "Anlauf" einstellt und
- die vorkommenden dynamischen Drücke sehr groß sind und bis zu ca. 50 % des Druckabfalls je Geschoss ausmachen.

Deshalb wurden zwar alle Druckabfälle von Geschoss zu Geschoss gemessen, aber nur die drei mittleren Geschosse ausgewertet, wenn sie untereinander und mit dem ebenfalls gemessenen Summenwert der drei Geschosse hinreichend gut zusammenstimmten.

Der über Frequenzumformer variable Volumenstrom des Doppel-Axiallüfter-Aggregates (siehe Bild 4.2.4.1) wurde über eine Einlaufdüse, ebenfalls über hochgenaue Druck-Transmitter gemessen.





29



Bild 4.2.4.2

Die Versuchsergebnisse – im Folgenden wiedergegeben – haben durchaus einige Überraschungen gebracht. Die Messergebnisse mit vergrößerten Treppenaugen bzw. Bypässen sind nicht zuletzt insofern wichtig, als der "Regel-Treppenraum" bei großen Gebäudehöhen zu wenig "durchlässig" wird, d.h., die Reibungsdruckverluste werden zu hoch. Dann sollen – so sah es das "Pflichtenheft" vor – dem planenden Architekten verschiedene Lösungsvorschläge als Alternativen vorgelegt werden können, z.B. größeres Treppenauge oder Bypass oder mittlerer Auslass mit parallel geführtem Kanal usw..

Im Folgenden wird die Durchlässigkeit eines Treppenraumes durch die Kenngröße A_{eff} [m²] angegeben, wie es in Entrauchungsfragen vielfach üblich und zudem bildhaft ist. Die Fläche A_{eff} als "Effektivfläche" ist eine fiktive Fläche, die bei der homogenen Durchströmung mit einer bestimmten Luftmenge den gleichen Druckabfall zur Folge hat wie ein Geschoss der Treppe. Ein hohes A_{eff} kennzeichnet also einen durchlässigen Treppenraum, ein niedriges einen "engen".

Bei der Berechnung des Reibungsdruckverlustes eines Geschosses gilt dann:

$$\Delta p_{R,Gesch.} = \frac{\rho}{2} w_L^2 = \frac{\rho}{2} \frac{\dot{V}_L^2}{A_{eff}^2}$$
(4.2.4.1)

Die Effektivfläche A_{eff} geht also quadratisch in den Druckabfall ein.

Die folgenden Messergebnisse (eine Messreihe ergibt nur einen Punkt) gelten meist für Laufbreiten von 1,25 m, da diese Laufbreite den durch die Bauordnung nahegelegten Regelfall darstellt.

Verblüffend ist insbesondere, dass lt. Bild 4.2.4.4 ein Geländer die Durchlässigkeit erhöht, und zwar um so mehr, je geschlossener die Fläche zwischen Handlauf und Treppenlauf ausgebildet wird. Offenbar beruhigt die partielle Führung der Luft in der Vertikalen die Strömung, sodass der Widerstand geringer wird. Diese Beruhigung war – diesen Eindruck hatte man zumindest – auch bei den Versuchen zu spüren.

Selbst eine durchgehende Wandscheibe im Treppenauge (in den Bildern nicht dargestellt) führt zu etwa dem gleichen Widerstand wie die Treppe mit dem scheinbar so durchlässigen Filigrangeländer. Die Wandscheibe hätte jedenfalls den Vorteil, dass der Treppenraum gleichmäßiger, ohne wesentliche "Totzonen" durchspült würde, sodass im Falle eines Raucheintrages sich weniger hartnäckige Rauchnester ausbilden könnten.

Die Bypässe für Bild 4.2.4.5 waren stirnseitig zwischen Treppenpodest und Treppenraumwand als über die Treppenraumbreite führender, schlanker Schlitz ausgebildet. Im Sinne eines möglichst geringen Widerstandes waren sie so ausgeführt, dass die aufwärts strömende Luft sich an der Treppenraumwand anlegen konnte, während das Podest zum Bypass hin unterseitig angeschrägt war (45°, ca. 150 mm), um am Einlauf die Wirbelbildung zu reduzieren. Als Durchtrittssicherung dienen schlanke, vertikale Eisenstäbe (z.B. 4×50 mm) in 40 mm Abstand.

Wie Bild 4.2.4.5 zeigt, führen 1,05 m² Bypass $(0,39 \times 2,70 \text{ m})$ zu etwa 0,9 m² Zusatz-A_{eff}.

Bild 4.2.4.6 zeigt, dass eine Verbreiterung des Auges von 0,15 auf 0,56 m bei $9 \times 0,28 = 2,52$ m Augenlänge, also eine Freiflächenvergrößerung von 1,033 m², zu ca. 1,6 m² Zusatz- A_{eff} führt. Der Gewinn an Durchlässigkeit, bezogen auf die zusätzliche Freifläche, ist also erheblich größer als bei den stirnseitigen Bypässen. Bei größerem Treppenauge wird aber der Gesamtgrundriss des Treppenraumes auch durch die dann notwendigerweise größer werdenden Treppenpodeste vergrößert. Insgesamt steigt dabei der Flächenbedarf auf ca. 1,30 m² Grundfläche pro m² Zusatz- A_{eff} (während der Bypass mit etwa 1,17 m²/m² auskommt).







Bild 4.2.4.4: $A_{eff} = f$ (Geländerfüllung)



Bild 4.2.4.5: $A_{eff} = f$ (Beipass-Fläche)



Bild 4.2.4.6: $A_{eff} = f$ (Augenbreite)

UNIV.-PROF. DR.-ING. DIETER OSTERTAG

4.2.5 Druckgewinn durch Thermik

Der thermische Auftrieb – Stack Action – ist, wie in Kapitel 3 behandelt, eine große Gefahr für die Druckverhältnisse in Sicherheitstreppenräumen von Hochhäusern.

Gl. 3.4.1 erlaubt auf einfache Weise die Berechnung z.B. des geschossweisen thermischen Auftriebes, wenn Außen- und Innentemperatur bekannt sind. Das ist vor Einschaltung der Überdruckbelüftung sicher der Fall, die "Ruhethermik", dargestellt auch in Bild 3.4.1, ist eine einfach zu bestimmende Größe.

Was passiert aber, wenn die Überdruckbelüftung eingeschaltet wird? Dann wird (im Winter) kalte Außenluft in den Treppenraum eingeführt. Die oft gehörte Vorstellung, dass dann die Lufttemperatur im Treppenraum schnell auf Außentemperaturniveau gedrückt würde, so dass die Thermik ohnehin rasch abklingt und verschwindet, ist irrig. Wäre es so, dann bräuchte man jenseits des Atlantik keine solchen "Verrenkungen" zu machen, nur um die Stack Action aus dem Gebäude herauszuhalten.

Die Betonoberflächen eines normalen Treppenraumes betragen je Geschoss ca. 90 m²! Hierin sind die Umfassungswände, sowie Läufe und Podeste, letztere unten und oben, enthalten. Die dahinter befindlichen Betonmassen sind warm (innenliegender Treppenraum). Berechnet man den Wärmeinhalt dieser Betonmassen, z.B. mit einer natürlich knapp angenommenen mittleren Bauteildicke von 20 cm, dann ergibt sich bei einem 150 m hohen Hochhaus ein Wert, der ausreichend wäre, 20 000 m³/h Luftdurchströmung volle 64 Stunden lang auf Raumtemperatur aufzuwärmen! Diese Wärme ist dank der hohen Wärmeleitfähigkeit von Beton und der großen Oberflächen recht gut verfügbar.

Es wird also zu einer Erwärmung der zunächst kalt eingeführten Zuluft kommen, wobei es sich natürlich um einen instationären Vorgang handelt, bei dem neben der guten Wärmeleitung im Beton auch die Intensität des Wärmeüberganges eine große Rolle spielt. Da jedoch die Strömungsform im Treppenraum kaum definierbar ist, und somit auch die Fachliteratur (z.B. VDI-Wärmeatlas [15]) nur vage Anhaltspunkte für die anzusetzende, mittlere Wärmeübergangszahl α geben konnte, wurden zunächst die Berechnungen für verschiedene α durchgeführt (Erläuterung des Berechnungsgangs s. Abschnitt 4.2.6).

Beispielhaft seien die Ergebnisse für $\alpha = 15$ und $\alpha = 5$ W/(m²K) für einen 150 m hohen Treppenraum bei Durchströmung mit 18 000 m³/h Luft gezeigt. Die Bildseiten 4.2.5.1 und 4.2.5.2 zeigen jeweils oben die Luft- und Betonoberflächentemperaturen für die Zeitpunkte 0, 2, 5, 15, 30, 60 und 120 Minuten nach dem Einschalten, unten das Abklingen der Thermik über der Zeit.

Das obere Bild zeigt den recht schnellen Anstieg der Lufttemperatur über der Gebäudehöhe. So ist in Bild 4.2.5.1 ($\alpha = 15$) nach Durchströmung von 10 Geschossen der weit überwiegende Teil des Temperaturanstiegs bereits erfolgt. Mit zunehmender Betriebszeit werden die Temperaturkurven nur recht langsam etwas flacher, erreichen oben aber noch immer problemlos die Raumtemperatur.

Die untere Hälfte des Bildes zeigt eindrucksvoll, dass die Thermik zwar zunächst etwas abfällt – das ist der Zeitraum des ersten Austausches der Luft. Danach bleibt die Thermik aber auf hohem Niveau, hier etwa 85 % der Ruhethermik "hängen" und nimmt innerhalb von 2 vollen Stunden kaum nennenswert ab.

Ein gewissenhafter Planer wird also wenigstens die Thermik nach dem Luftaustausch seinen weiteren Überlegungen zu Grunde legen.

Bild 4.2.5.2 zeigt das Gleiche, jedoch für $\alpha = 5$ W/m²K. Der Temperaturanstieg erfolgt selbstverständlich weniger rasant, dennoch verbleiben nach Luftaustausch noch ca. 65 % der Ruhethermik.

Auf der intensiven Suche nach dem richtigen α - Wert kam den Verfassern schließlich Hilfe – wiederum aus Übersee! Tamura hat in [13] umfangreiche Messungen an zwei Treppenräumen vorgenommen und die nach Kenntnis der Verfasser ersten und bisher einzigen wissenschaftlichen Messungen des Temperaturprofils in durchströmten Treppenräumen veröffentlicht. Sie sind in den Bildern 4.2.5.3 und 4.2.5.4 wiedergegeben.

Tamura kommentiert diese Messungen:

".... dass die Lufttemperatur am Ort der Luftzufuhr der Außentemperatur sehr ähnlich war, mit zunehmender Entfernung vom Einblasungsort aber sehr rasch anstieg und sich in einem Abstand von etwa 10 Stockwerken der Innentemperatur annäherte...."






Luft- und Wandoberflächentemperaturen im Treppenraum im



UNIV.-PROF. DR.-ING. DIETER OSTERTAG

Der Vergleich dieser Messkurven mit den Ergebnissen der instationären Berechnung zeigt, dass ein α - Wert von 15 W/(m²K) keineswegs überhöht ist und für eine sichere Auslegung nicht unterschritten werden sollte.

Nach Abfall der Ruhethermik während des ersten Luftaustausches auf das verbleibende Niveau verändert sich so wenig, dass es im Sinne der Aufwandsbegrenzung akzeptabel erscheint, mit den Temperatur- und Thermikwerten für den Zeitpunkt 5 Minuten nach dem Einschalten der Überdruckbelüftung quasistationär zu rechnen.

In Bild 4.2.5.5 ist diese Temperaturkurve ($\alpha = 15$ W/(m²K), 5 Minuten nach dem Einschalten) nochmals dargestellt, allerdings als Kurve $\vartheta = f(h)$.

Die Thermik ist proportional der Höhe und der Temperaturdifferenz $\vartheta_i - \vartheta_a$. Da der Abszisse die Höhe zugeordnet ist, der Ordinate die Temperatur ϑ_i , beginnend bei ϑ_a , ist das Integral, die Fläche zwischen Kurve und Abszisse, ein Maß für die Thermik. Die Fläche des Rechteckes aus Höhe und Temperaturdifferenz steht für die Ruhethermik. Die Fläche unterhalb der Temperaturkurve steht für die verbleibende Thermik nach 5 Minuten Lauf.

Damit lässt sich sehr anschaulich das Verhältnis verbleibende Thermik/Ruhethermik ablesen. Bei 150 m Höhe eben die erwähnten etwa 85 %, bei geringerer Gebäudehöhe sinkt dieses Verhältnis weiter ab.

Ebenfalls in Bild 4.2.5.5 eingetragen sind die berechneten Werte der Ruhethermik und der verbleibenden Thermik.

Bild 4.2.5.5 ist berechnet für –10°C außen und 20°C innen, also 30 K Temperaturdifferenz.

Bild 4.2.5.6 zeigt die analogen Werte für -16/+22°C, also 38 K Temperaturdifferenz und wird in vielen Fällen die richtigere Wahl sein, nicht zuletzt, weil es bei der Thermik keinen "time lag" (keine Abschwächung von Temperaturspitzen) gibt, sondern spontane Auswirkung in voller Höhe.



Bild 4.2.5.5: Temperaturverlauf und Thermik über der Höhe

h m	v °C	∆р _{тћ,0} Ра	∆р_{тћ,5} Ра	h m	v∂ °C	∆р _{ть,0} Ра	∆р _{тһ,5} Ра	h m	v∂ °C	∆р _{тћ,0} Ра	∆р _{тћ,5} Ра	h m	v °C	∆ р _{Тһ,0} Ра	∆p _{īh,5} Pa
0	-10,0	0,0	0,0	50	17,8	67,4	44,6	100	19,8	134,7	110,4	150	20,0	202,1	177,7
2	-7,0	2,7	0,2	52	18,0	70,1	47,2	102	19,9	137,4	113,1	152	20,0	204,8	180,4
4	-4,3	5,4	0,6	54	18,2	72,8	49,7	104	19,9	140,1	115,8	154	20,0	207,5	183,1
6	-1,9	8,1	1,2	56	18,4	75,5	52,3	106	19,9	142,8	118,5	156	20,0	210,2	185,8
8	0,2	10,8	2,1	58	18,5	78,1	54,8	108	19,9	145,5	121,2	158	20,0	212,9	188,5
10	2,2	13,5	3,2	60	18,7	80,8	57,4	110	19,9	148,2	123,9	160	20,0	215,6	191,2
12	4,0	16,2	4,5	62	18,8	83,5	60,0	112	19,9	150,9	126,5	162	20,0	218,3	193,8
14	5,6	18,9	5,9	64	18,9	86,2	62,6	114	19,9	153,6	129,2	164	20,0	221,0	196,5
16	7,0	21,6	·7,4	66	19,0	88,9	65,2	116	19,9	156,3	131,9	166	20,0	223,7	199,2
18	8,3	24,3	9,1	68	19,1	91,6	67,9	118	19,9	159,0	134,6	168	20,0	226,4	201,9
20	9,4	26,9	10,8	70	19,2	94,3	70,5	120	19,9	161,7	137,3	170	20,0	229,1	204,6
22	10,5	29,6	12,7	72	19,3	97,0	73,1	122	19,9	164,4	140,0	172	20,0	231,8	207,3
24	11,4	32,3	14,6	74	19,4	99,7	75,8	124	20,0	167,1	142,7	174	20,0	234,4	210,0
26	12,3	35,0	16,6	76	19,4	102,4	78,4	126	20,0	169,8	145,4	176	20,0	237,1	212,7
28	13,0	37,7	18,7	78	19,5	105,1	81,1	128	20,0	172,5	148,1	178	20,0	239,8	215,4
30	13,7	40,4	20,9	80	19,5	107,8	83,7	130	20,0	175,2	150,8	180	20,0	242,5	218,1
32	14,4	43,1	23,1	82	19,6	110,5	86,4	132	20,0	177,9	153,4	182	20,0	245,2	220,8
34	14,9	45,8	25,3	84	19,6	113,2	89,0	134	20,0	180,6	156,1	184	20,0	247,9	223,5
36	15,4	48,5	27,6	86	19,7	115,9	91,7	136	20,0	183,2	158,8	186	20,0	250,6	226,2
38	15,9	51,2	30,0	88	19,7	118,6	94,4	138	20,0	185,9	161,5	188	20,0	253,3	228,9
40	16,3	53,9	32,3	90	19,7	121,3	97,0	140	20,0	188,6	164,2	190	20,0	256,0	231,6
42	16,7	56,6	34,8	92	19,8	124,0	99,7	142	20,0	191,3	166,9	192	20,0	258,7	234,3
44	17,0	59,3	37,2	94	19,8	126,7	102,4	144	20,0	194,0	169,6	194	20,0	261,4	237,0
46	17,3	62,0	39,7	96	19,8	129,4	105,1	146	20,0	196,7	172,3	196	20,0	264,1	239,7
48	17,6	64,7	42,1	98	19,8	132,0	107,7	148	20,0	199,4	175,0	198	20,0	266,8	242,3
50	17,8	67,4	44,6	100	19,8	134,7	110,4	150	20,0	202,1	177,7	200	20,0	269,5	245,0

41



Bild 4.2.5.6: Temperaturverlauf und Thermik über der Höhe

h m	v∂ °C	∆р _{ть,0} Ра	∆р _{Тһ,5} Ра	h m	t≎ °C	∆р _{ть,0} Ра	∆р ть,₅ Ра	h m	v∂ °C	∆р _{тн,0} Ра	∆р_{тһ,5} Ра	h m	v °C	∆р _{тһ,0} Ра	∆р _{ть,5} Ра
0	-16,0	0,0	0,0	50	19,0	86,7	57,3	100	21,8	173,5	141,9	150	22,0	260,2	228,6
2	-12,3	3,5	0,2	52	19,3	90,2	60,6	102	21,8	176,9	145,4	152	22,0	263,7	232,0
4	-9,0	6,9	0,7	54	19,6	93,7	63,9	104	21,8	180,4	148,8	154	22,0	267,1	235,5
6	-6,0	10,4	1,6	56	19,8	97,1	67,1	106	21,8	183,9	152,3	156	22,0	270,6	239,0
8	-3,3	13,9	2,8	58	20,0	100,6	70,4	108	21,8	187,3	155,8	158	22,0	274,1	242,5
10	-0,8	17,3	4,1	60	20,2	104,1	73,8	110	21,9	190,8	159,2	160	22,0	277,6	245,9
12	1,4	20,8	5,8	62	20,4	107,6	77,1	112	21,9	194,3	162,7	162	22,0	281,0	249,4
14	3,4	24,3	7,6	64	20,5	111,0	80,4	114	21,9	197,8	166,1	164	22,0	284,5	252,9
16	5,2	27,8	9,5	66	20,7	114,5	83,8	116	22,0	201,2	169,6	166	22,0	288,0	256,3
18	6,8	31,2	11,7	68	20,8	118,0	87,2	118	22,0	204,7	173,1	168	22,0	291,4	259,8
20	8,3	34,7	13,9	70	20,9	121,4	90,6	120	22,0	208,2	176,5	170	22,0	294,9	263,3
22	9,6	38,2	16,3	72	21,0	124,9	93,9	122	22,0	211,6	180,0	172	22,0	298,4	266,7
24	10,8	41,6	18,8	74	21,1	128,4	97,3	124	22,0	215,1	183,5	174	22,0	301,8	270,2
26	11,9	45,1	21,4	76	21,2	131,8	100,7	126	22,0	218,6	186,9	176	22,0	305,3	273,7
28	12,9	48,6	24,1	78	21,3	135,3	104,2	128	22,0	222,0	190,4	178	22,0	308,8	277,1
30	13,8	52,0	26,8	80	21,4	138,8	107,6	130	22,0	225,5	193,9	180	22,0	312,2	280,6
32	14,6	55,5	29,7	82	21,4	142,2	111,0	132	22,0	229,0	197,4	182	22,0	315,7	284,1
34	15,3	59,0	32,6	84	21,5	145,7	114,4	134	22,0	232,4	200,8	184	22,0	319,2	287,6
36	15,9	62,4	35,5	86	21,5	149,2	117,8	136	22,0	235,9	204,3	186	22,0	322,7	291,0
38	16,5	65,9	38,5	88 .	21,6	152,7	121,3	138	22,0	239,4	207,8	188	22,0	326,1	294,5
40	17,1	69,4	41,6	90	21,6	156,1	124,7	140	22,0	242,9	211,2	190	22,0	329,6	298,0
42	17,5	72,9	44,6	92	21,7	159,6	128,2	142	22,0	246,3	214,7	192	22,0	333,1	301,4
44	18,0	76,3	47,8	94	21,7	163,1	131,6	144	22,0	249,8	218,2	194	22,0	336,5	304,9
46	18,4	79,8	50,9	96	21,7	166,5	135,0	146	22,0	253,3	221,6	196	22,0	340,0	308,4
48	18,7	83,3	54,1	98	21,7	170,0	138,5	148	22,0	256,7	225,1	198	22,0	343,5	311,8
50	19,0	86,7	57,3	100	21,8	173,5	141,9	150	22,0	260,2	228,6	200	22,0	346,9	315,3

42

4.2.6 Berechnungen

Mit den Diagrammen aus Abschnitt 4.2.5 und den A_{eff} -Werten aus Abschnitt 4.2.4 lassen sich nun recht gut die Grenzen gängiger Systeme von Überdruckbelüftungsanlagen für den Winterfall ermitteln.

Daneben muss aber auf jeden Fall der Sommerfall überprüft werden. In diesem Fall kehrt sich die Thermik um ("reverse stack effect"), bleibt aber zahlenmäßig weit hinter der des Winters zurück.

Mit +32°C außen und +22°C innen (10 K Temperaturdifferenz) kann die – umgekehrte – Thermik näherungsweise aus Bild 4.2.5.5 (-10/+20°C, 30 K Temperaturdifferenz) durch Dritteln der Werte gefunden werden.

Bei einfachen Systemen mit nur einem Regelkreis (Abluftklappe) kann die Berechnung, ausgehend vom Sollwert des Regelkreises (im Allgemeinen Soll-Überdruck an der Abluftklappe), sehr einfach für den ganzen Treppenraum erfolgen.

Sollen bei komplexeren Systemen Druckverläufe über die Gebäudehöhe berechnet werden, dann erfolgt diese Berechnung sinnvollerweise geschossweise, wobei die Temperaturerhöhung durch Wärmeübertragung ebenfalls geschossweise berechnet wird. Um den hohen Aufwand der instationären Berechnung zu vermeiden, erscheint es zulässig, die Berechnung mit einer konstant angenommenen Beton-Oberflächentemperatur = Innentemperatur durchzuführen und die tatsächlich niedriger liegenden Betonoberflächentemperaturen (siehe Bild 4.2.5.1) durch einen reduzierten α - Wert von etwa 12,5 W/(m²K) zu kompensieren (die Kurven des Temperaturverlaufes sind praktisch deckungsgleich). Soweit die Luftleistungen die übliche Größe von ca. 20000 m³/h erheblich überschreiten, sollte (höhere Luftgeschwindigkeit) zum alten Wert α = 15 zurückgekehrt werden.

Im Folgenden wird der Rechengang (PC, Excel-Tabellen) kurz beschrieben:

Berechnung des Druckverlaufs in hohen Treppenräumen bei Durchströmung mit Außenluft

Es wird folgendes Modell angesetzt:



oder vereinfacht:



Berechnung im Einzelgeschoss

Bei der Durchströmung des Treppenraumes erfährt die strömende Außenluft einen Wärmeaustausch mit den Wänden, einen Druckverlust infolge Reibung sowie einen Druckgewinn durch den thermischen Auftrieb (im Winter).

Reibungsdruckverlust

Der Reibungsdruckverlust wird angesetzt mit

$$\Delta p_R = \frac{\rho}{2} \cdot w^2$$
$$= \frac{\rho_i}{2} \cdot \left(\frac{\dot{V_i}}{A_{eff,i}}\right)^2$$

wobei hier (im Gegensatz zur nachfolgenden Wärmeaustauschrechnung) die Luftdichte ρ_k als konstant für ein Geschoss k angenommen wird.

Wärmeaustausch

Der Wärmeaustausch wird vereinfacht angesetzt:

- in Längsrichtung (x-Richtung = Höhenkoordinate) Temperaturerhöhung infolge des Zuströmens von Wärme aus der Wand.
- in Querrichtung ideal gerührter Behälter (keine Temperaturunterschiede),
- Die Wandtemperatur wird als konstant und gleich der Innentemperatur angenommen (v⁰_w = v⁰_i; vgl. hierzu die Bemerkung oben (Seite 43), sowie unten der Abschnitt "Instationäre Berechnung" (Seite 48)).

Die für die Berechnung nötigen Formeln werden folgendermaßen abgeleitet:

Es wird ein Streifen der Dicke dx aus dem Geschoss herausgeschnitten (x ist die Höhenkoordi-

nate). Der Streifen hat den Umfang $U = \frac{A_{Oherfläche}}{H_{geschoss}}$. Von der Wand strömt die Wärmernenge

$$dQ_{W} = \alpha \cdot U \cdot dx \cdot (\vartheta_{W} - \vartheta)$$

(mit $\vartheta = \vartheta(x)$ = Temperatur der Luft) dem Luftstrom zu und erwärmt diesen:

$$dQ_L = \dot{m} \cdot c \cdot d\vartheta$$

Es gilt:

$$dQ_{L} = dQ_{W}$$
$$\dot{m} \cdot c \cdot d\vartheta = \alpha \cdot U \cdot (\vartheta_{W} - \vartheta) \cdot dx$$

Aus

$$y = \vartheta_w - \vartheta$$

(v = Hilfsvariable) folgt

$$dy = -d\vartheta$$

und

$$-\dot{m} \cdot c \cdot dy = \alpha \cdot U \cdot y \cdot dx$$
$$\frac{dy}{y} = -\frac{\alpha \cdot U}{\dot{m} \cdot c} \cdot dx$$
$$\frac{dy}{y} = -K \cdot dx$$
$$\int \frac{dy}{y} = -K \int dx$$
$$\ln y = -K \cdot x + C$$
$$e^{-K \cdot x + C} = y = t^2 - t^2$$

$$\vartheta = \vartheta_w - e^{-Kx} e^C$$

Mit der Anfangsbedingung (Anfangswerte bei Geschoss k)

$$x = 0 \implies \vartheta = \vartheta_0$$

kann die Konstante C bestimmt werden:

$$\vartheta_k = \vartheta_w - e^C$$
$$e^C = \vartheta_w - \vartheta_k$$

Somit wird der Temperaturverlauf der Luft als Funktion der Höhe (Koordinate x)

$$\vartheta = \vartheta_{w} - e^{-Kx} \cdot \left(\vartheta_{w} - \vartheta_{0}\right)$$
$$\vartheta - \vartheta_{0} = \left(\vartheta_{w} - \vartheta_{0}\right) - e^{-Kx} \cdot \left(\vartheta_{w} - \vartheta_{0}\right)$$
$$\Delta \vartheta = \left(\vartheta_{w} - \vartheta_{0}\right) \cdot \left(1 - e^{-Kx}\right)$$

Mit der Geschosshöhe H ergibt sich für die gesamte Temperaturerhöhung im Geschoss k (d.h. von Geschoss k bis Geschoss k+1)

$$\Delta \vartheta_{i} = \vartheta_{i+1} - \vartheta_{i} = (\vartheta_{w} - \vartheta_{i}) \cdot (1 - e^{-\kappa H})$$
$$= (\vartheta_{w} - \vartheta_{i}) \cdot \left(1 - e^{-\frac{\alpha \cdot U}{\dot{m}_{i} \cdot c} \cdot H}\right)$$

Der dabei übertragene Wärmestrom ist

$$\dot{Q} = \int_{x=0}^{H} d\dot{Q}_{L} = \int_{x=0}^{H} \dot{m} \cdot c \cdot d\vartheta$$
$$= \dot{m} \cdot c \cdot \int_{x=0}^{H} d\vartheta$$

Es ist

$$d\vartheta = -(\vartheta_w - \vartheta_k) \cdot (-K) \cdot e^{-\kappa x} dx$$
$$= K \cdot (\vartheta_w - \vartheta_k) \cdot e^{-\kappa x} dx$$

und somit

$$\begin{split} \dot{Q} &= \dot{m} \cdot c \cdot \int_{x=0}^{H} (\vartheta_{w} - \vartheta_{k}) \cdot K \cdot e^{-\kappa x} dx \\ &= \dot{m} \cdot c \cdot (\vartheta_{w} - \vartheta_{k}) \cdot K \cdot \int_{x=0}^{H} e^{-\kappa x} dx \\ &= \dot{m} \cdot c \cdot (\vartheta_{w} - \vartheta_{k}) \cdot K \cdot \frac{1}{-K} \cdot e^{-\kappa x} \Big|_{0}^{H} \\ &= -\dot{m} \cdot c \cdot (\vartheta_{w} - \vartheta_{k}) \cdot (e^{-\kappa H} - 1) \\ &= \dot{m} \cdot c \cdot (\vartheta_{w} - \vartheta_{k}) \cdot (1 - e^{-\kappa H}) \end{split}$$

oder

$$\dot{Q}_{k} = \dot{m}_{k} \cdot c \cdot \left(\vartheta_{w} - \vartheta_{k}\right) \cdot \left(1 - e^{-\frac{\alpha \cdot U}{\dot{m}_{k} \cdot c}H}\right)$$

Thermischer Auftrieb

 τ

Der thermische Auftrieb für ein Geschoss errechnet sich zu

$$\Delta p = \int_{0}^{H} (\rho_a - \rho(x)) \cdot g \cdot dx$$

$$\begin{aligned} \text{Mit } \rho(x) &= \rho_0 \cdot \frac{T_0}{T_0 + \vartheta} \ (\rho_0 = 1,293 \text{ kg/m}^3, T_0 = 273,15 \text{ K}, \text{ gültig für } \rho_0 = 760 \text{ Torr}) \text{ wird} \\ \Delta p &= \iint_0^H \left(\rho_u - \rho_0 \frac{T_0}{T_0 + \vartheta} \right) \cdot g \cdot dx \\ &= \rho_a \cdot g \cdot \frac{T_0}{\theta} \frac{1}{\theta} dx - \rho_0 \cdot g \cdot T_0 \cdot \int_0^H \frac{dx}{T_0 + \vartheta} \\ &= \rho_a \cdot g \cdot H - \rho_0 \cdot g \cdot T_0 \cdot \int_0^H \frac{dx}{T_0 + \vartheta_w} - \left(\frac{\vartheta_w}{\theta_w} - \vartheta_0 \right) \cdot e^{-Kx} \\ &= \rho_a \cdot g \cdot H - \rho_0 \cdot g \cdot T_0 \cdot \left[\frac{x}{T_0 + \vartheta_w} - \frac{1}{-K(T_0 + \vartheta_w)} \cdot \ln(T_0 + \vartheta_w - (\vartheta_w - \vartheta_0) \cdot e^{-Kr}) \right]_0^H \\ &= \rho_a \cdot g \cdot H - \rho_0 \cdot g \cdot T_0 \cdot \left[\frac{H}{T_0 + \vartheta_w} + \frac{1}{K(T_0 + \vartheta_w)} \cdot \ln(T_0 + \vartheta_w - (\vartheta_w - \vartheta_0) \cdot e^{-KH}) - \frac{-\frac{1}{K(T_0 + \vartheta_w)} \cdot \ln(T_0 + \vartheta_w - (\vartheta_w - \vartheta_0) \cdot e^{-KH}) - \frac{1}{K(T_0 + \vartheta_w)} \cdot \ln(T_0 + \vartheta_w - (\vartheta_w - \vartheta_0) \cdot e^{-KH}) \right] \end{aligned}$$

Anmerkung: Die Änderung der Luftdichte $\rho = \rho(x)$ wird hier allein als Funktion der Temperaturänderung angesetzt. Der Einfluss der Höhenänderung wird vernachlässigt (vgl. Anmerkung zur Gleichung 3.4.1 auf Seite 12) (auch für die Außenluft wird die Luftdichte nur als Funktion der Temperatur angesetzt).

Gesamtberechnung

Die Berechnung erfolgt geschossweise.

Der – mit Außentemperatur – eingeblasene Volumenstrom \dot{V}_k wird für jedes Geschoss k angegeben; der Massenstrom ist dann $\dot{m}_{zu,k} = \rho_a \cdot \dot{V}_{zu,k}$. Die Lufttemperatur im Geschoss k errechnet sich aus der Aufwärmung (siehe oben) der Luft, die aus dem Vorgeschoss zuströmt, und der Mischung mit der Zuluft:

$$\dot{m}_{k-1} \cdot c \cdot \left(\vartheta_{k-1} + \Delta \vartheta_{k-1} \right) + \dot{m}_{zu,k} \cdot c \cdot \vartheta_a = \left(\dot{m}_{k-1} + \dot{m}_{zu,k} \right) \cdot c \cdot \vartheta_k$$

zu

$$\vartheta_{k} = \frac{\dot{m}_{k-1} \cdot \left(\vartheta_{k-1} + \Delta \vartheta_{k-1}\right) + \dot{m}_{zu,k} \cdot \vartheta_{a}}{\dot{m}_{k-1} + \dot{m}_{zu,k}}$$

Daraus folgt die Luftdichte

$$\rho_k = \rho_0 \cdot \frac{T_0}{T_0 + \vartheta_k} \quad \text{(Gasgesetz)}$$

mit $\rho_0 = 1,293 \text{ kg/m}^3$.

Im Geschoss k zweigt der Volumenstrom ins Brandgeschoss $V_{ab,k}$ ab, sodass der ins nächste Geschoss weiterströmende Volumenstrom

$$\dot{V}_{k} = \frac{\dot{m}_{k-1} + \dot{m}_{zu,k}}{\rho_{k}} - \dot{V}_{ab,k}$$

bzw. der Massenstrom

$$\dot{m}_{k} = \dot{m}_{k-1} + \dot{m}_{zu,k} - \rho_{k} \cdot V_{ab,k}$$

ist.

Die Durchführung der Berechnung erfolgt in einer Excel-Tabelle. Für jedes Geschoss wird mit obigen Formeln der Druckverlust, der thermische Auftrieb und die Temperaturänderung der Luft berechnet. Damit ergibt sich ein Druckverlauf durch den Treppenraum von unten nach oben. Als Anfangswert im untersten Geschoss wird ein Druck p_{uuten} vorgegeben.

Die Berechnung wird mit wechselnden Volumenströmen $V_{zn,k}$ so lange wiederholt (lteration), bis sich der angestrebte (bzw. der max. erreichbare) Druck p_{oben} im obersten Geschoss einstellt.

Instationäre Berechnung

Der oben angegebene Berechnungsgang stellt eine stationäre Berechnung dar, d.h. einen fiktiven Zustand, bei dem der gesamte Treppenraum von der durchströmenden Außenluft gefüllt ist, und bei dem sich die Temperaturen zeitlich nicht ändern. Um den tatsächlichen Vorgang darzustellen, müssen noch weitere Einflüsse in das Rechenmodell eingebaut werden. Hier sind vor allem zwei Punkte zu berücksichtigen:

- 1. Die Wandtemperatur sinkt wegen des Wärmeaustausches mit der Luft allmählich ab, und
- der Treppenraum enthält bei Beginn Luft mit Innentemperatur, die nach und nach von der unten einströmenden Außenluft nach oben verdrängt wird (ein Vorgang, der durchaus einige Minuten dauert)

Diese beiden Vorgänge wurden im erweiterten Rechenmodell berücksichtigt:

Zu Punkt 1:

Um das Absinken der Wandtemperatur zu erhalten, wurde die Wärmeleitung in der Wand berechnet.

Als Rechenverfahren für die numerische Lösung der instationären Wärmeleitungsgleichung (Fourier-Gleichung [16] haben sich die Verfasser für das implizite Differenzenverfahren nach Crank-Nicolson [17] entschieden. Dieses Verfahren wurde verifiziert anhand einiger von Grigull [18] ausgewerteter analytischer Lösungen der Wärmeleitungsgleichung.

Es wurde eindimensional gerechnet und die Wand in einer Tiefe von 20 cm als adiabat angenommen (das ist zulässig; in dieser Tiefe ergaben sich im untersten (= kältesten) Geschoss noch nach 120 Minuten nur Temperaturänderungen von ca. 1°C).

Die Wandtemperatur wurde für jedes Geschoss einzeln berechnet und in den oben beschriebenen Rechengang eingesetzt (also nicht mehr $\vartheta_w = \vartheta_i$, sondern $\vartheta_w = \vartheta_{w,k} = f(Zeit)$).

Zu Punkt 2:

Es wird angenommen, dass die im Treppenraum vorhandene Luft mit Innentemperatur von der unten einströmenden Außenluft in Art einer Kolbenströmung nach oben verdrängt und ausgeschoben wird. Aus den Volumenströmen ergibt sich eine (fiktive) vertikale Luftgeschwindigkeit im Treppenraum, mit welcher die Bewegung der Grenzfläche zwischen "alter" und "neuer" Luft verfolgt werden kann.

Oberhalb dieser Grenzfläche erfolgt kein Wärmeaustausch (Lufttemperatur = Wandtemperatur); erst unterhalb dieser im zeitlichen Verlauf nach oben wandernden Grenzfläche findet ein Wärmeaustausch mit der Wand statt.

Der erweiterte Rechengang:

Der gesamte, oben angegebene, stationäre Rechengang wird jetzt nur als einzelner Zeitschritt betrachtet (aus dem Wärmeaustausch mit der Wand ergeben sich die zeitlichen Temperaturänderungen; Crank-Nicolson-Verfahren ergibt neue Wandtemperatur für nächsten Zeitschritt). Der Rechengang wird also nochmals in einer Schleife (= Zeitschritt) wiederholt. Dabei wird das "Herausschieben" der warmen Luft verfolgt und die Wärmeaustauschrechnung nur für die Geschosse durchgeführt, die unterhalb der "Grenzfläche" liegen.

5 Grenzen der üblichen Technik

5.1 Die übliche Technik

Unter "üblicher Technik" verstehen die Verfasser die Überdruckbelüftung mit am Fuß des Treppenraumes eingeführtem Konstant-Volumenstrom von 18000 m³/h und am Kopf des Treppenraumes eingebauter Überdruckklappe, die dort – am Kopf – den Überdruck gegenüber außen auf einem vorgegebenen Wert (z.B. 50 Pa) halten kann.

5.2 Ein Beispiel

Das hier angeführte Beispiel ist authentisch. Es handelt sich um das schon in der Einleitung angesprochene Bauvorhaben, dessen brandschutztechnische Planung durch die Verfasser geprüft wurde und das Anlass zu besonders intensiver Beschäftigung mit dieser Thematik war.

Das Gebäude und seine 4 Sicherheits-Treppenräume sind ca. 150 m hoch. Die Treppenräume sind mit A_{eff} = 2,84 m² bei ca. 3,70 m Geschosshöhe recht "durchlässig".

Von Anfang an war vorgesehen, im Brandfall die motorisierten Fenster des Brandraumes automatisch zu öffnen, alle anderen aber gleichzeitig zu schließen. Diese Schaltung wurde auf Wunsch der Feuerwehr nach Entrauchung über die Fenster ohne Raucheintragung in andere Räume gewählt (das Gebäude ist mit einer zweischaligen Fassade mit großflächig durchgehenden Zwischenräumen ausgestattet). Der Brandschutz-Planer hatte gegen diese im Brandraum freigegebene Außenöffnung zumindest keine Einwendungen erhoben. Die Annahme liegt nahe, dass er sich über die Auswirkungen durchaus *nicht* im Klaren war.

Im Folgenden soll nun gezeigt werden, welche Druckverhältnisse unter diesen Voraussetzungen im Brandfall zu erwarten gewesen wären, hätte man die Überdruckbelüftungsanlagen so ausgeführt, wie sie geplant waren:

Auch hier, bei der Prüfung einer bestimmten Konstellation, müssen immer zumindest 2 Fälle betrachtet werden:

- der extreme Winterfall (Auslegungsfall) und
- der extreme Sommerfall (ebenfalls Auslegungsfall).

Der Winterfall sei hier mit –10/+20°C angenommen, eine (Standort: Bonn) ausgesprochen moderate Annahme (die sichere Funktion muss – da kein "time-lag" – auch bei niedrigeren Temperaturen noch gewährleistet sein).

.

Der Sommerfall ist mit +32/+22°C angenommen, ganz sicher auch keine "scharfe" Annahme.

In Bild 5.2.1 ist nun entwickelt, mit welchen Betriebszuständen gerechnet werden muss:

In diesem Diagramm ist auf der Abszisse der Druck gegen außen, auf der Ordinate die Gebäudehöhe aufgetragen. Die schraffierte, schmale Säule gibt den engen Druckbereich wieder, der durch Bauordnung (Δp_{max}) und notwendigen Überdruck für die Ableitung der Brandgase ins Freie definiert wird (Δp_{min}).

Stellt man sich vor, dass die in den Hochhausrichtlinien geforderte RWA-Öffnung (>1 m²; sie muss von jedem Geschoss aus von jedermann geöffnet werden können!) offen sei, dann wird sich dort natürlich Druckgleichheit zwischen außen und innen einstellen. Im Winterfall wird aber im Treppenrauminneren der Druck (gegen außen) immer mehr abfallen, je weiter man nach unten geht, da die Thermik den Druck von unten nach oben erhöht.

Aus Bild 4.2.5.5 ist nun für 150 m Höhe eine Ruhethermik von ca. 202 Pa ablesbar. Es stellt sich also über die Treppenraumhöhe die nach rechts geneigte, strichlierte Linie A ein, die am Fuß des Treppenraumes immerhin 202 Pa *Unterdruck* ausweist (siehe hierzu auch Kap. 6.6).

Ist nun statt der RWA-Öffnung am Kopf des Treppenraumes die Regelklappe in Funktion, dann wird die strichlierte Linie parallel nach rechts verschoben. Die neue Linie B stellt die Ruhethermik im Treppenraum dar und liegt am Fuß des Treppenraumes noch immer bei -152 Pa. Wird nun der Treppenraum durchströmt, dann wird nach erstmaligem Luftaustausch (das dauert hier etwa 6 Minuten) nur noch die Restthermik wirksam, die nach Bild 4.2.5.5 mit ca. 174 Pa anzusetzen ist. Da der Druck am Kopf des Treppenraumes entsprechend dem eingestellten Sollwert der Regelklappe mit z.B. +50 Pa festliegt, muss nun "rückwärts" ermittelt werden. Also zunächst von den +50 Pa um 174 Pa nach links zu – 124 Pa und von dort, jeweils nach rechts aufgetragen, die Größe der verbleibenden Thermik für die verschiedenen Höhen nach Bild 4.2.5.5. Es entsteht so die strichlierte Linie C "ohne Reibungsdruckverluste".

Die Reibungsdruckverluste können hier in erster Näherung mit

$$\dot{V} = 5 \frac{m^3}{s}$$
 und $\rho = 1,20 \frac{kg}{m^3}$

als über die Höhe konstant angenommen werden. Sie ergeben sich je Geschoss zu

$$\Delta p_R = \frac{\rho}{2} \left(\frac{\dot{V_L}}{A_{eff}} \right)^2 = 1,91 \text{ Pa} \quad \text{und je m:} \quad \Delta p_{R_w} = \frac{1,91}{3,7} = 0,52 \text{ Pa/m.}$$



Bild 5.2.1: Für das Beispiel:

Theoretischer Druckverlauf über die Gebäudehöhe

- bei geschlossenen Schleusentüren
 - (also vollständige Durchströmung) Linie D
- bei Brand in 30 m Höhe
 (dort also Abströmung der Luft ins Brandgeschoss) Linie D₃₀

Diese Reibungsdruckverluste erhöhen natürlich die Drücke im Treppenraum, da ja der obere Druck festgehalten wird. So entsteht Kurve D "mit Reibungsdruckverlusten", die den *bei voller Durchströmung* über die volle Höhe (keine Abströmung ins Brandgeschoss) gegebenen Druckverlauf beschreibt.

Werden nun die beiden Schleusentüren des Brandgeschosses geöffnet, dann "sollte" die gesamte Luftleistung in das Brandgeschoss abströmen. Oberhalb des Brandgeschosses folgt die Druckkurve dann der Kurve B (Ruhethermik). Unterhalb des Brandgeschosses werden dagegen abgeschwächte Thermik und Reibung wirksam, der Kurvenverlauf "ohne Reibungsdruckverluste" C_{30} entspricht also C, jedoch parallel verschoben. Der Druckverlauf "mit Reibungsdruckverlusten" D_{30} entsteht aus C_{30} durch Addition der Reibungsdruckverluste im durchströmten, unteren Treppenraumteil.

Die theoretischen Druckwerte des Brandgeschosses liegen also auf der Linie B, der Ruhethermik!

Selbstverständlich wird die "planmäßige", unterstellte Abströmung in das Brandgeschoss dann *nicht* erfolgen, wenn – wie hier – im Treppenraum Unterdruck gegenüber der Atmosphäre herrscht. *Die Planung versagt*, die Luftmenge strömt dann trotz offener Schleusentüren nach oben zum Kopf des Treppenraumes. Der Druckverlauf würde dann natürlich der Linie D folgen, die aber bei dem vorliegenden Beispiel bis ca. 90 m Höhe noch immer im *Unterdruck*bereich liegt. Liegt das Brandgeschoss unterhalb dieser Grenze, dann werden bei offenen Schleusentüren Brandgase aus dem Brandgeschoss heraus in den Treppenraum gesaugt, wo sie, ganz analog wie in einem Schornstein, nach oben strömen.

Diese Situation bedeutet selbstverständlich höchste Lebensgefahr für die Flüchtenden!

Diese Situation tritt dann sofort ein, wenn die Personen aus dem Brandgeschoss fliehen. Die automatisch freigegebenen Außenöffnungen lassen den – höheren – Atmosphärendruck im Brandraum wirksam werden. Das Druckgefälle zum Treppenraum hin besorgt das Einströmen in den Treppenraum. Die Türen, jetzt *mit* dem Druckgefälle geöffnet, werden nicht mehr schließen. Die Thermik im Treppenraum wird durch die Brandgase noch intensiviert ... s. Bild 5.2.2.

Hier ist besonders darauf hinzuweisen, dass dieses Horrorszenario sich völlig unabhängig von irgendwelchen Gebäude-Undichtigkeiten einstellt, völlig unabhängig von der Ausführung der Schleusen und ihren Türen und Überströmöffnungen etc, bei "planmäßiger Funktion" der Überdruckbelüftung. Allein aufgrund der enormen thermischen Auftriebskraft der 150 m hohen Luftsäule!



Bild 5.2.2

Aus dieser Erkenntnis werden auch die nicht übersetzten Zitate aus Abschnitt 3.6 noch besser verständlich. Dort war freilich durch Glasbruch das entstanden, was hier absichtlich erzeugt wurde, nämlich die Öffnung nach außen.

Angesichts dieser vordergründigen Gefahren für Leib und Leben sei hier darauf verzichtet, die sich bereits bei geringerer Winterthermik einstellenden Fehlfunktionen zu beleuchten.

Zu prüfen ist jedoch der Sommerfall. Hier addieren sich die umgekehrte, wenn auch größenmäßig reduzierte Thermik und die Reibungsdruckverluste. So ergibt sich am Fuß des Treppenraumes ein maximaler Überdruck gegen außen von ca. 184 Pa!

Bei Brand in einem der unteren Geschosse würde sich also an den Schleusentüren dieser Überdruck einstellen, den die Fliehenden möglicherweise nicht mehr überwinden könnten. Sie wären im Brandraum eingeschlossen!

Auch das wäre nur das Szenario bei völlig "planmäßiger Funktion" der Überdruckbelüftung!

Um zu verdeutlichen, welch elementaren Einfluss die "Durchlässigkeit" des Treppenraumes hat, sei an Stelle des tatsächlichen, relativ durchlässigen Treppenraumes das Ergebnis für einen "engen" Treppenraum (A_{eff} = 2,0 m²) skizziert:

So lange der Treppenraum über seine volle Länge von der Soll-Luftleistung durchströmt wird (keine Schleuse offen), gibt es nirgendwo Unterdruck (freilich über weite Strecken zu niedrige Überdrücke)! Bei Brand unten im Winterfall gibt es zwar keinen Unterdruck, aber auch keine Abströmung ins Brandgeschoss, wie sie von den Hochhausrichtlinien gefordert wird. Der Sommer-Auslegungsfall führt aber auf einen maximalen Überdruck (unten) von ca. 260 Pa!

5.3 Die Grenzen des üblichen Systems

Im vorangegangenen Beispiel des Abschnittes 5.2 waren Gefahren für Leib und Leben der Benutzer des Treppenraumes dadurch entstanden, dass sich im Treppenraum trotz laufender "Überdruckbelüftung" massiver *Unterdruck* eingestellt hat.

Fehlfunktionen können aber schon früher eintreten:

Der Planer geht im Regelfall davon aus, dass mit Öffnung einer Schleuse die gesamte Luftmenge in den Brandraum strömt, während die Klappe am Kopf des Treppenraumes schließt.

Dies ist aber keineswegs a priori der Fall: Um die volle Luftleistung durch die Schleuse und Luft bzw. Brandgase durch die etwa 1,5 m² große Außenöffnung ins Freie zu drücken, sind etwa 25 Pa Überdruck nötig. Steigt dabei durch thermischen Druckgewinn der Überdruck am Kopf aber über den Sollwert der Regelklappe (z.B. 50 Pa) an, dann beginnt die Regelklappe zu öffnen und ein Teil der Luft geht nach oben verloren. Er steht damit für die Schleusen-Abschirmung nicht mehr zur Verfügung! Die Maßgaben der Hochhausrichtlinien werden verfehlt!

Der *Beginn* dieser Erscheinung liegt also bei 50 Pa oberem Sollwert bei einer hier maßgebenden *Ruhethermik* von 25 Pa. Die stellt sich bei -10/+20 °C bei einer Höhe von 18,3 m, also noch nicht einmal Hochhausgrenze, ein! (Dieses Ergebnis kann übrigens auch aus Bild 5.2.1 abgelesen werden).

Ohne

- gewisse Konzessionen in den Anforderungen und/oder
- konstruktive Verbesserungen der Technik

sind also die üblichen Überdruckanlagen für Hochhäuser selbst bei mäßigen Höhen nicht tauglich!

Die starke Diskrepanz zwischen diesen außerordentlich negativen Ergebnissen und der "Erfahrung" vieler Experten hat viel ungläubiges Staunen und auch Ablehnung (wenn auch ohne sachliche Begründung) hervorgerufen.

Die "Erfahrung" besteht freilich aus den Ergebnissen von Abnahmeversuchen und wiederkehrenden Prüfungen an Überdruckbelüftungsanlagen, die von falschen Voraussetzungen und auch falschen Aufgaben der Überdruckbelüftung ausgehen. Den Verfassern liegen zahlreiche Messprotokolle solcher Versuche vor: gemessen werden offenbar "traditionell" Differenzdrücke an Türen von Schleusen in allen möglichen Höhenbereichen des Gebäudes. Außenöffnungen zur Brandrauch-Abströmung ins Freie gibt es dabei offensichtlich keine (zumindest wird darüber nichts berichtet). Die Außentemperatur – via Stack Effect die dominante Größe – wird nicht einmal festgehalten!

Unter diesen Voraussetzungen ist es freilich kein Wunder, dass durch überwiegend unkritische Ergebnisse die Funktionstüchtigkeit der Anlage anscheinend "bewiesen" wird (siehe hierzu auch die Messungen von Tamura in Bild 3.6.1).

Würde man, wie es entsprechend der Aufgabenstellung von Überdruckbelüftungsanlagen notwendig wäre, die durch offene Schleusen ins Brandgeschoss strömende Luftmenge messen, dann würde die Nicht-Erfüllung der Anforderungen der Hochhausrichtlinien sofort offen zu Tage treten.

Hätte man jemals bei niedrigen Außentemperaturen einen Brand unten im Gebäude mit geöffnetem Fenster simuliert, dann wären bei manchem Hochhaus die Gefahren für Leib und Leben sofort ins Auge gesprungen!

6 Besondere Problempunkte

Bevor weitere Überlegungen zur Behebung der Diskrepanz zwischen

- den Anforderungen der Hochhausrichtlinien und
- der üblichen Anwendung unzureichender Technik

angestellt werden, sollen einige Problempunkte behandelt werden, die beachtet werden müssen, um im Brandfall mit seinen Imponderabilien – und nur für ihn werden die Anlagen schließlich gebaut – die notwendige Sicherheit zu gewährleisten.

6.1 Zulässiger Differenzdruck an Türen – Türöffnungskräfte

Die Begrenzung des Differenzdruckes an Türen, z.B. Schleusentüren, ist natürlich kein Selbstzweck. Vielmehr soll die Türöffnungskraft am Griff so weit begrenzt werden, dass auch schwächere Personen die Tür öffnen können und nicht der Eindruck entsteht, die Tür sei verschlossen (Vermeidung von Panik-Reaktionen).

Mit der Türöffnung muss aber nicht nur der anstehende Differenzdruck überwunden werden, sondern auch der Widerstand des Türschließers, der freilich variabel ist.

In den Hochhaus-Richtlinien ist ein maximaler Differenzdruck von 50 Pa festgelegt, ohne dass der Türschließer in die Überlegungen mit einbezogen würde. 50 Pa sind freilich ein außerordentlich schwacher Differenzdruck – man könnte fast sagen, nur ein Hauch. So haben die Berechnungen des Abschnittes 5 auch schnell gezeigt, dass damit kaum auszukommen ist.

Die Literaturrecherche in der englischsprachigen Literatur liefert auch hier weiterreichende Untersuchungen. So hat man sich nach ursprünglich höher angesetzten Türöffnungskräften aufgrund eingehender Versuche mit verschiedenen Personengruppen schließlich auf 30 lbf = 133 N maximal zulässige Türöffnungskraft geeinigt.

Klote und Milke [7] geben u.a. die Ergebnisse der Versuche mit Personen von 5 bis 6 Jahren Alter (also Kinder) und von 60 bis 75 Jahren (also Senioren) wieder- Tabellen 6.1.1 und 6.1.2. Auffallend sind dabei die extremen Streubreiten zwischen verschiedenen Personen.

Tabelle 6.1.3 gibt die zulässigen Differenzdrücke, abhängig von Türgröße und Kraft des Türschließers wieder. In den USA sind offensichtlich Türen schon ab 81 cm Breite zulässig, während das deutsche Baurecht 1,10 m Breite fordert. Für diese Breite beträgt der maximal zulässige Differenzdruck 85 Pa, wenn ein Türschließer mit nur 26,7 N (6 lbf) eingesetzt wird. Bei Schleusentüren, die vom Überdruck im Treppenraum zugedrückt werden, gibt es freilich keinen Grund, stärkere Türschließer zu verwenden.

Die Werte der Tabelle 6.3.1 kehren im Übrigen auch in NFPA 92 A [12] wieder und sind deshalb als in den USA/Kanada allgemein anerkannte Regel der Technik zu betrachten.

Die Festlegung von maximal zulässigen 75 Pa an normal breiten Türen (1,10 m) ist deshalb sicher sachgerecht.

		721.011				
		Mean	Maximum	Minimum	F1MD Percentile	
Function	Gender	lb (N)	lb (N)	lb (N)	lb (N)	
Push	М	20 (90)	26 (155)	7.2 (32)	8.1 (36)	
	F	16 (73)	28 (126)	10 (46)	6.5 (29)	
Pull	М	27 (120)	41 (184)	18 (82)	17 (77)	
	F	19 (86)	32 (141)	11 (48)	8.7 (39)	

Functional Strength Values for Age Group 5 to 6 Years¹

1. Note: Adapted from Read and Shipp (1979). Subjects used only one hand. Suddenly applied "jerk" pushes and pulls or two-handed forward leaning pushes would have resulted in greater forces.

Tabelle 6.1.1: maximale Türöffnungskraft für Personen von 5 bis 6 Jahren

		······			Fifth
		Mean,	Maximum,	Minimum,	Percentile,
Function	Gender	lb (N)	lb (N)	lb (N)	lb (N)
Push	M	53 (237)	121 (540)	21 (92)	23 (101)
	F	36 (162)	70 (309)	19 (83)	20 (91)
Pull	М	69 (306)	177 (786)	23 (102)	23 (102)
	F	45 (201)	91 (407)	22 (100)	21 (95)

Functional Strength Values for Age Group 60 to 75 Years¹

Note: Adapted from Read and Shipp (1979). Subjects used only one hand. Suddenly applied "jerk" pushes and pulls or two-handed forward-leaning
pushes would have resulted in greater forces.

Tabelle 6.1.2: maximale Türöffnungskraft für Personen von 60 bis 75 Jahren

Door Closer					· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·				
Force,	Door Width, in. (m)								
lb (N)	32 (0.813)	36 (0.914)	40 (1.02)	44 (1.12)	46 (1.17)				
6 (26.7)	0.45 (112.)	0.40 (99.5)	0.37 (92.1)	0.34 (84.6)	0.31 (77.1)				
8 (35.6)	0.41 (102.)	0.37 (92.1)	0.34 (84.5)	0.31 (77.1)	0.28 (69.7)				
10 (44.5)	0.37 (92.1)	0.34 (84.5)	0.30 (74.6)	0.28 (69.7)	0.26 (64.7)				
12 (53.4)	0.34 (84.5)	0.30 (74.6)	0.27 (67.2)	0.25 (62.2)	0.23 (57.2)				
14 (62.3)	0.30 (74.6)	0.27 (67.2)	0.24 (59.7)	0.22 (54.7)	0.21 (52.2)				

1. Note: Adapted from NFPA (2000a). Total door opening force is 30 lb (133 N), and the door height is 7 ft (2.13 m).

Tabelle 6.1.3: zulässiger Differenzdruck an Türen

Bei Schleusen mit ihren beiden hintereinander angeordneten Türen darf freilich der gesamte Differenzdruck nicht höher sein, da selbst bei geöffneter erster Tür die zweite Tür öffenbar sein muss (gleichzeitige Flucht mehrerer Personen).

6.2 Automatische Außenöffnungen in den Geschossen

Von den Hochhausrichtlinien "eigentlich" verlangt, werden Abströmöffnungen für Brandgase in den Geschossen kaum realisiert. Erst John [2], Ostertag und Zitzelsberger [3] fordern Abströmöffnungen als Grundvoraussetzung für das Funktionieren einer Überdruckbelüftung im Sinne der Hochhausrichtlinien.

Für das Abströmen der Brandgase ins Freie kommen folgende Lösungen in Frage, die letztlich alle in den Hochhausrichtlinien "angesprochen", nicht aber bewertet oder letztlich gefordert werden:

- Fassadenöffnungen,
- Abströmkanäle (horizontal) zur Fassade und
- Abströmschächte (vertikal) über Dach, mit oder ohne Ventilatoren.

Alle diese Varianten müssen bei Brandmeldung des Geschosses automatisch aktiviert werden, sonst ist die beste Überdruckbelüftung nicht im Stande, den Sicherheitstreppenraum zu schützen!

6.2.1 Fassadenöffnungen

Um geforderte 18000 m³/h Schleusen-Spülluft trotz Aufwärmung im Brandraum auf ca. 200°C (Sprinklerung) mit nur 25 Pa Überdruck ins Freie zu befördern, sind Außenöffnungen mit mind. ca. 1,5 m² Querschnitt nötig.

Solche Öffnungsquerschnitte sind also je Geschoss und Treppenraum nötig, wobei eine luftraummäßige Verbindung zur geschossseitigen Schleusentür bestehen muss, oder gegebenenfalls über sich öffnende Türen/Klappen indirekt herzustellen ist.

Wie in Abschnitt 6.4 erläutert, ist es als Schutzmaßnahme gegen eventuellen Winddruck sinnvoll, die Querschnitte jeweils auf wenigstens 2 Teilöffnungen in entgegengesetzten Fassadenseiten aufzuteilen. Dabei ist es natürlich gleichgültig, ob hierzu motorisch bewegte Fenster oder andere Fassadenöffnungen verwendet werden. Ohnehin motorisch betätigte Fenster in jedem Büro lassen natürlich auch eine gezielte Steuerung im Brandfall zu. Innenhöfe, gegebenenfalls auch entrauchte Atrien würden sich für eine Brandrauch-Abströmung wegen der geringen Windanfälligkeit besonders anbieten.

6.2.2 Abströmkanäle (horizontal)

Abströmkanäle müssten bei guter Einströmung, geradliniger Führung von der geschossseitigen Schleusentüre bis zur Fassade ebenfalls etwa 1,5 m² lichten Querschnitt haben. Stellt man sich diesen Querschnitt wieder auf 2 Teilquerschnitte (zu unterschiedlichen Fassadenrichtungen) vor, dann ergäben sich Kanäle von z.B. 1900 × 400 mm, die, soweit die Flurwände eine Feuerwiderstandsdauer haben müssen (> 400 m²), ebenfalls feuerwiderstandsfähig ausgeführt sein müssten. Das Außenmaß läge dann bei knapp 2000 × 500 mm!

Wo der dafür notwendige Platz zur Verfügung gestellt werden kann, sicher eine gute Lösung!

6.2.3 Abströmschächte über Dach, mit oder ohne Ventilatoren

Was auf den ersten Blick vielleicht als Lösung aller Probleme mit Windanfall und dem gefährlichen Stack Effect erscheint, erweist sich bei näherem Hinsehen schnell als Irrweg, der vom Regen in die Traufe führt:

- die Vorstellung, man sei damit den Windeinfluss los, ist falsch. An der Mündung des Schachtes über Dach sind u.U. sogar besonders hohe Unterdruckwerte zu erwarten, die den Brandraum unter massiven Unterdruck setzen und damit das Öffnen der Schleusentüren des Brandgeschosses erschweren bzw. unmöglich machen!
- Ein Schacht ohne Ventilator müsste riesige Abmessungen (je nach Höhe um 3 m²) und riesige Klappen (mind. 1,5 m²) haben, um mit dem zur Verfügung stehenden Überdruck (25 Pa) normal temperierte Luft aus dem Brandraum ins Freie abführen zu können.

Steigt die Temperatur im Brandraum jedoch kräftig an (auch bei Sprinklerung muss im deckennahen Bereich mit 200°C gerechnet werden), dann entstünde im Schacht ein thermischer Auftrieb von ca. 4,5 Pa/m, der nach oben nur langsam abnimmt. Durch Brandraum-Unterdruck würde auch hier der überwindbare Differenzdruck an den Schleusentüren schnell überschritten.

• Ein Schacht mit Ventilator und Entrauchungsklappen in den Geschossen würde bei geschlossenen Schleusentüren (fast Null-Förderung) seine maximale Druckdifferenz als Unterdruck dem Brandraum aufprägen. Personen im Brandraum hätten keine Chance, die Tür zu öffnen!

Theoretisch denkbar wäre, die Entrauchungsklappen abhängig von der Türstellung zu steuern. Jenseits des großen Aufwandes (schnelle Motoren nötig, voraussichtlich nur mit Pneumatik zu lösen, Einbau der Antriebe in brandgeschütztem Bereich – ?) würde ein Versagen dieser Steuerung wiederum die Menschen im Brandraum einsperren.

Aus diesen einfachen Überlegungen ergibt sich eindeutig, dass die vertikale Ableitung der Brandgase neue, nicht beherrschbare Probleme mit sich bringt, so dass die horizontale Abführung durch die Fassade (keine thermischen Einflüsse) trotz des verbleibenden Windeinflusses – der zumindest abgeschwächt werden kann – unbedingt vorzuziehen ist.

Wenn dennoch immer wieder versucht wird, die vertikale Lösung als "Problemlöser" anzuwenden, erklärt sich das nur daraus, dass Überdruckanlagen als scheinbar simple Technik nicht ausreichend durchdacht werden. Die Seltenheit von Brandfällen bringt es mit sich, dass solche Sorglosigkeit selten erkannt wird.

Übrigens:

Ein wesentlicher Vorteil der mit der Brandmeldung gezielt im richtigen Geschoss freigegebenen Außenöffnung ist auch die selektive Funktion, bezogen eben nur auf das Brandgeschoss. Werden andere Schleusentüren gleichzeitig mit denen des Brandgeschosses geöffnet, dann wird die Schleusen-Spülluft dennoch fast ausschließlich in das Brandgeschoss strömen, weil der in den anderen Geschossen infolge des Fehlens von Abströmöffnungen sich sofort aufbauende Überdruck die Strömung blockiert!

Stehen freilich in den anderen Geschossen Fenster offen, dann wird es zu temporären Luftverlusten im Brandgeschoss kommen. Sind alle Außenfenster motorisiert, dann kann durch gezielte Ansteuerung (Schließen aller Nicht-Brandraumfenster) dieser Fall verhindert werden.

6.3 Ausgang ins Freie

Die Flucht über Treppenräume führt natürlich über Türen üblicherweise ins Freie.

Die Hochhausrichtlinien erwähnen diese Türen mit keinem Wort, obwohl sie mit den größten Schwachpunkt des Sicherheitstreppenraumes darstellen:

Die Schleusentüren in den Geschossen werden durch den Überdruck im Treppenraum zugedrückt. Sie schließen (Türschließer) somit problemlos und selbsttätig.

Die Ausgangstüre dagegen öffnet zwangsläufig in *Richtung des Druckgefälles*. Von einem Fliehenden kann selbstverständlich nicht erwartet werden, dass er die aufgestoßene Tür auch sorgsam wieder schließt. Ohne besondere Maßnahmen wird die Tür also offen bleiben. Dies hätte aber schlimme Folgen, da die Druckhaltung im Treppenraum ganz oder weitgehend verloren ginge – und bliebe.

Reale Planungen sehen die Zulufteinführung oft ganz unten, z.B. im EG, manchmal in unmittelbarer Nähe der Außentür vor! Bei Lauf der Überdruckbelüftung wird die eingeführte Zuluft natürlich den Weg des geringsten Widerstandes nehmen – und das ist eindeutig der durch das über 2 m² große "Loch" der Ausgangstür. Hier muss also gleich Mehreres getan werden, um die Funktion der Überdruckbelüftung nicht zu untergraben:

- Es muss dafür gesorgt werden, dass nach der Benutzung durch Fliehende der Raumabschluss wieder hergestellt wird. Die Verfasser haben bei den betreuten Objekten durchgängig durchgesetzt, dass statt der nur einen Tür durch eine zusätzliche Tür eine Schleuse gebildet wird.
- Beide Türen müssen Türschließer erhalten, die so stark sind, dass sie gegen 50 Pa die Tür zu schließen imstande sind. Durch die Hintereinanderschaltung der Türen können dann auch 85 Pa (s. Abschnitt 6.1) noch abgefangen werden. Die Sorge, dass diese Türen schwer zu öffnen seien, ist unbegründet, da sie nicht gegen, sondern mit dem Überdruck öffnen.
- Schr zu empfehlen sind dabei Schlösser, die sicherstellen, dass im Brandfall die Türen nach dem Öffnen nicht mehr "ins Schloss fallen", sondern nur ganz oder fast ganz schließen. Die Flucht wird durch solche Türen, die nur aufgestoßen zu werden brauchen, zweifellos flüssiger ablaufen.

Soweit die Lufttechnik dazu ausreichend dimensioniert ist, können diese Türen auch als "Überdruckventile" mit ständigem, aber begrenzten Luftverlust dienen. Unvermeidliche Druckstöße, die durch das Öffnen und Schließen von Schleusentüren entstehen, können damit etwas abgepuffert werden. Die Zulufteinführung gehört möglichst weit weg vom Ausgang ins Freie. Da der Ausgang aus dem Erdgeschoss ins Freie i.A. über getrennte Wege erfolgt, wird dort ohnehin keine Luft gebraucht. Eine Einführung, z.B. 50:50 aufgeteilt auf 1. und 2. Obergeschoss verbessert die Verhältnisse schon wesentlich. Dies ist insofern von großer Bedeutung, als die Ausgangstüren von den Fliehenden aller Geschosse benutzt werden. Sie werden also oft – auch beide gleichzeitig – offen stehen.

6.4 Windeinfluss

Windanfall ist zweifellos ein ernstes Problem bei Überdruckbelüftungsanlagen. Man muss sich dabei vor Augen halten, dass die angewandten Drücke, bedingt durch die notwendige Begrenzung der Türöffnungskräfte, außerordentlich klein sind. Winddruck auf Öffnungen kann sehr unangenehme Folgen haben und muss deshalb beachtet werden.

6.4.1 Windeinfluss bei Außenöffnungen des Brandraumes

Winddruck auf ein offenes Brandraumfenster kann bei offenen Schleusentüren die Schleusendurchspülung unterbinden und sogar Brandgase in den Treppenraum drücken. Dabei spielt es natürlich keiner Rolle, ob dieses Fenster – öffenbare Fenster gehören heute zum Standard – schon vor dem Brand manuell geöffnet worden war oder erst im Brandfall zur Rauchableitung automatisch oder auch manuell von der Feuerwehr geöffnet wurde.

Wind erzeugt bekanntlich auf der Luvseite von Gebäuden Überdruck (bis zu ca. 80 % des Staudruckes), auf der Leeseite Unterdruck (i.A. in geringerer Höhe). Meist herrscht sogar auf 3 Seiten Unterdruck. Dabei ist die Druckverteilung über die Fassade keineswegs homogen.

Bild 6.4.1 zeigt beispielhaft Winddruckprofile an verschiedenen Gebäudeseiten bei niedrigeren Gebäuden (links) und Hochhäusern (rechts). Die Windgeschwindigkeiten steigen dabei mit zunehmender Höhe über Grund.

Störungen durch Winddruck auf offene Fenster lassen sich am ehesten reduzieren, wenn jeweils mindestens 2 Fenster auf gegenüberliegenden Gebäudeseiten geöffnet werden oder – besser noch – auf allen Gebäudeseiten. Dann "zieht" es selbstverständlich erheblich, die Stördrücke im Geschoss werden aber am besten niedrig gehalten.

Diese, im Brandfall freigegebenen Außenöffnungen müssen freilich mit der geschossseitigen Schleusentür in luftraummäßig offener Verbindung stehen! Führt die Schleuse z.B. auf einen Flur, dann müssten auch Türen oder gegebenenfalls spezielle Klappen im Überkopfbereich (z.B. auch über den Türen) freigegeben werden. Diese Lösung ist natürlich nur dann möglich, wenn (400 m²-Regel) an die Flurwände keine brandschutztechnischen Anforderungen gestellt werden.

Welche Lösung geeignet ist, ist im Regelfall nur objektspezifisch anhand der Grundrisspläne zu entscheiden.



Typical distribution of pressure coefficient over a low-rise building free of local obstructions.



Typical distribution of pressure coefficient over a tall building free of local obstructions.

Bild 6.4.1: Winddruckprofile (nach [7])

6.4.2 Windeinfluss bei Fortluftöffnungen der Treppenraumlüftung

Die Mehrzahl der Treppenraum-Überdruckbelüftungsanlagen verwendet sogenannte "atmosphärische" Abluft-Regelklappen. Diese hilfskraftlos regelnden Überdruckklappen werden auf den gewünschten Überdruck eingestellt. Regeln können sie freilich nur den Differenzdruck vor/nach der Klappe. Liegt die Fortluftöffnung also im Bereich eines vom Wind beeinflussten Gebietes, dann wird der falsche (örtliche) Überdruck in den Treppenraum übertragen.

Auf Dächern von Hochhäusern herrscht bei Windanfall in aller Regel Unterdruck. Sitzt die Klappe in diesem Unterdruckgebiet, dann wird der Überdruck im Treppenraum niedriger, im Grenzfall zum Unterdruck.

Demgegenüber kann eine elektronisch geregelte Überdruckklappe sogar absichtlich in ein Unterdruck-Gebiet münden. Dies ist sogar sinnvoll, wenn gleichzeitig die Druck-Aufnehmer-Sensoren an der richtigen Stelle montiert werden. Wenn z.B. Außenöffnungen an zwei entgegengesetzten Fassadenseiten untergebracht werden, dann ist es sinnvoll, eben 2 Sensoren in Nähe dieser Öffnungen (zumindest vom Grundriss her gesehen) unterzubringen und den Mittelwert zur Regelung zu verwenden.

Steht dagegen Winddruck auf der Klappe (natürlich von außen), dann besteht bei beiden Arten das Risiko zu hoher Überdrücke und nicht mehr öffenbarer Türen.

6.4.3 Windeinfluss bei Außenluftansaugöffnungen

Anfällig sind hier besonders Lüfter mit geringen Gesamtdrücken, wie sie ohnehin nur dort verwendet werden können, wo die Außenluft mit großzügigen Querschnitten von außen zum innenliegenden Treppenraum geführt werden kann. Werden solche Lüfter zudem mit Bypassklappen hilfskraftlos geregelt, dann pflanzen sich äußere Druckstörungen durch Wind wiederum bis in den Treppenraum fort. Hier muss also sehr darauf geachtet werden, dass die Ansaugöffnung in einem gut windgeschützten Gebiet liegt.

6.4.4 Windeinfluss bei Ausgängen

Ausgangstüren ins Freie – natürlich in Fluchtrichtung nach außen aufschlagend – sind bei anstehendem Winddruck schwerer zu öffnen. Damit muss gerechnet werden.

Hier sollte aber auch daran gedacht werden, dass bei den manchmal noch als besonders sicher geltenden außenliegenden Treppenräumen (s. Hochhausrichtlinien) der Wind beim Ausgang aus dem Brandgeschoss ins Freie ungleich schwierigere Verhältnisse schaffen kann.

6.5 Schleusen-Lüftung

In den Hochhausrichtlinien wird eine eigene Lüftung der Schleusen dann nicht verlangt, wenn im Brandfall die geöffneten Schleusentüren mit der Luftleistung nach Gl. 2.2.1 (oft: 18000 m³/h) durchströmt werden.

Diese Luftleistung liegt weit über der Luftleistung, die für eine Schleusenlüftung mit z.B. dem 30-fachen Luftwechsel notwendig wäre. Dennoch muss man sich freilich vor Augen halten, dass beide Schleusentüren eben nur dann gleichzeitig offen stehen, wenn mehrere Personen gleichzeitig fliehen (oder die Feuerwehr beide Türen offen hält).

Zu Rauch in der Schleuse wird es z.B. kommen, wenn eine Person zuerst die geschossseitige Schleusentür öffnet (und damit Rauch in die Schleuse mitnimmt), und erst dann, wenn die Tür schon wieder zugefallen ist, die treppenraumseitige Tür öffnet. Der eingetragene Rauch wird nur zum Teil in den Treppenraum mitgenommen und von dessen Überdruckbelüftung ausgespült. Ein weiterer Teil wird aber in der Schleuse verbleiben.

Zu einer so massiven Rauchkonzentration wird es aber sicher nicht kommen, dass man in der Schleuse die zweite Tür nicht mehr findet. Aus dieser "Sicht" ist freilich die kurze, gerade Schleuse die richtigere.

Eine Schleusenlüftung wird allenfalls dann anzuraten sein, wenn die Schleusen lang und verwinkelt sind. Auch dann sollte keine eigene Lüftungsanlage dafür eingesetzt werden, da sonst die sorgsam aufgebauten Differenzdrücke ganz schnell "überfahren" werden. Sollte also eine Schleusenlüftung als geraten erscheinen, dann sollte sie unbedingt durch gesteuerte Überströmung aus dem druckkontrollierten Treppenraum erfolgen!

Wird die treppenraumseitige Tür als normale T30-Tür ausgeführt, die geschossseitige als T30RS-Tür, dann kann die Schleusenlüftung des Brandgeschosses (nur dort hat Lüftung einen Sinn) durch eine Brandschutzklappe über der treppenraumseitigen Tür und eine, nur im Brandgeschoss öffnende Entrauchungsklappe über der geschossseitigen Schleusentür sichergestellt werden.

Eine Luftleistung von z.B. 500 m³/h erfordert wegen des begrenzten Differenzdruckes allerdings bereits relativ große Querschnitte (z.B. 400/200).

So wird sichergestellt, dass der Treppenraum nicht unnötig Luft verliert!

6.6 RWA – Öffnung

Die in Kapitel 5 geschilderten Gefahren für Leib und Leben durch Unterdruck im Sicherheitstreppenraum treten grundsätzlich auch bei Freigabe der in den Hochhausrichtlinien geforderten RWA-Öffnung am Kopf des Treppenraumes auf. Nach den Hochhausrichtlinien muss jeder (also auch der völlig Unkundige) diese Öffnung in jedem Geschoss aktivieren können!

Einzig sachgerechte Lösung ist die Streichung dieser RWA-Öffnung aus den Richtlinien! Die gedachte Funktion dieser RWA-Öffnung kann von einer einwandfrei geplanten Überdruckbelüftung viel besser übernommen werden – ohne deren Gefahren.

7 Eine grundsätzlich neue Lösung – die Überdruckbelüftung mit Thermik-Kompensation

7.1 Grundgedanke und technische Umsetzung

Im Zuge der brandschutztechnischen Planung des schon mehrfach erwähnten Bauvorhabens hat Ostertag einen Lösungsansatz entwickelt, der ganz grundsätzlich von dem, was in USA gemacht und – wenig reflektiert – in Deutschland übernommen wird, abweicht.

Grundvoraussetzung für den Schutz des Sicherheitstreppenraumes vor Raucheintritt aus dem Brandgeschoss ist die intensive Durchströmung evtl. offener Schleusentüren des Brandgeschosses. Die setzt aber eine druckverlustarme Abströmung der Brandgase ins Freie voraus. Dann gibt es freilich zwei Verbindungen zwischen Treppenraum und Atmosphäre, nämlich die am Kopf und die im Brandgeschoss. Die Folge:

Der Stack Effect wird voll wirksam!

Der innere (im Winterfall) stark geneigte Druckverlauf kollidiert im wahrsten Sinn des Wortes mit dem "senkrechten" äußeren Druckverlauf (im Differenzdruck-Diagramm). Die Folge sind bei Regelung des Überdruckes im Kopfbereich stark reduzierte Überdrücke oder sogar massive Unterdrücke im unteren Bereich. Das bedeutet u.U. Lebensgefahr, da der "Sicherheitstreppenraum" bei der Flucht der Personen aus dem Brandgeschoss zum Brandgasschornstein werden kann (und dann bleibt).

Der Grundgedanke des Lösungsansatzes war, den Druckverlauf im Treppenraum so zu beeinflussen, dass er sich dem Verlauf des Außendruckes nähert. Dann könnte auch im unteren Bereich der notwendige Überdruck hergestellt werden.

Bestimmt werden die Druckänderungen bei der Durchströmung von der Thermik, aber auch von den Reibungsdruckverlusten der Luft. Zunächst wirken sich die thermischen Auftriebs- bzw. Abtriebskräfte aus, je nach Außentemperatur druckerhöhend (thermische Druckgewinne) oder druckerniedrigend (thermische Druckverluste – nur im Hochsommer).

Die kritischste Konstellation ist der harte Winter, wo die thermischen Druckgewinne besonders groß sind.

Diese thermischen Wirkungen sind naturgesetzlich bedingt und nicht beeinflussbar.

Entgegengesetzt wirkend sind die Reibungsdruckverluste der strömenden Luft, die insbesondere an den Strömungshindernissen Treppenpodeste und Treppenläufe entstehen. Sie sind abhängig von der Geometrie des Treppenraumes mit seinen Einbauten, aber auch von der Durchströmungsintensität. Liegt die bauseitige Planung fest, dann gibt es nur eine Möglichkeit, den Reibungsdruckverlust so einzustellen, dass die – je nach Temperatur – variierenden thermischen Druckgewinne kompensiert werden., nämlich den Volumenstrom so zu regeln, d.h. variabel anzupassen, dass auch unten im Treppenraum das gewünschte bzw. notwendige Druckniveau erreicht wird.

Damit wird es prinzipiell möglich, den stark nach rechts geneigten Druckverlauf im Treppenraum (siehe z.B. Bild 5.2.1) zur Senkrechten aufzurichten, d.h., den Druckverlauf an den des Außendruckes anzunähern.

Selbstverständlich macht dies Volumenströme notwendig, die sich nicht mehr am Luftbedarf einer Schleuse orientieren, sondern an der skizzierten Aufgabe, der zuverlässigen Einstellung unkritischer Druckverhältnisse. Neben dieser, quasi primären Aufgabe muss freilich auch die Luftversorgung der offenen Schleuse des Brandgeschosses mit abgedeckt werden. Die notwendige Luftleistung wird wesentlich größer!

Die Planung setzt ein zuverlässiges Berechnungsverfahren voraus, das für alle vorkommenden Witterungsverhältnisse die Einhaltung der geforderten Druckverhältnisse und der ausreichenden Luftversorgung der Schleusen gewährleistet. Dieses Ziel wurde erreicht. Abschnitt 4 der vorliegenden Arbeit enthält die Grundlagen dazu.

Bei der amerikanischen Philosophie war es notwendig, hohe vertikale Undichtigkeiten im Gebäude trotz deren Gefährlichkeit (siehe Bild 3.2.1) zuzulassen, um im nach außen dichten Gebäude eine brauchbare Druckverteilung zu erhalten. Beim hier beschriebenen, neuen Verfahren gilt das Gegenteil. Vertikale Undichtigkeiten (Schächte) dürfen und sollen sogar konform mit vernünftigen Brandschutzüberlegungen möglichst weitgehend unterbunden werden, da sie sich eher negativ auf die gewünschte Druckverteilung in den Räumen auswirken. Die in Kapitel 4.1 geschilderten Maßnahmen der Frankfurter Feuerwehr, die das Risiko der Rauchübertragung in obere Geschosse eindämmen, wirken sich also auch bezüglich der Druckverteilung *positiv* aus (die Mehrzahl der Toten, die in Bild 3.2.1 dokumentiert sind, hätte sich vermeiden lassen!)!

Die technische Umsetzung der Lösung ist in Bild 7.1.1 dargestellt:

Der Zuluftventilator führt in den Treppenraum unten eine variable Luftmenge ein, die durch eine hochwertige, schnelle Druckregelung so angepasst wird, dass am Fuß des Treppenraumes der gewünschte Überdruck gegenüber außen erreicht wird.

Am Kopf des Treppenraumes drosselt eine zweite Regelung die Abströmung der den Treppenraum durchströmenden Luft ins Freie so, dass dort ebenfalls ein durch die Planung bestimmter Überdruck eingehalten wird. Damit gelingt es erstmals trotz Stack Effect (thermischem Auftrieb), die Kurve des Druckverlaufes im Treppenraum zur Senkrechten aufzurichten, d.h. an den Außendruck weitgehend anzupassen.



Bild 7.1.1: Überdruckbelüftung mit Thermik-Kompensation

Die Kurve ist freilich auch dann, wenn alle Schleusentüren geschlossen sind, keine echte Gerade. Ursache ist die Zunahme der Thermik von unten nach oben (Temperaturzunahme), der nur eine geringe Zunahme der Reibungsdruckverluste (Volumenzunahme bei Dichte-Abnahme) gegenübersteht.

Werden nun die Schleusentüren des Brandgeschosses geöffnet, dann strömt Luft in das Brandgeschoss. Der vorübergehend abnehmende Druck beider Regelungen (Fuß- und Kopfdruck) führt dazu, dass die Zuluftmenge automatisch erhöht wird, während die Fortluftmenge durch weiteres Schließen der Fortluftklappe abnimmt. An den Türen muss selbst unter diesen Umständen noch der Mindest-Überdruck von ca. 25 Pa gegeben sein. In der Planung muss das für alle denkbaren Betriebszustände durch Rechnung nachgewiesen werden.

In Bild 7.1.2 sind die Ergebnisse der Thermik-Kompensation für das Beispiel des Abschnittes 5.2 (Winter-Auslegungsfall) für

- geschlossene Schleusentüren (rechte "Seil-Kurve") und
- Brand in einem Geschoss, also mit Abströmung ins Brandgeschoss (linke, geknickte Kurve)

in Bild 5.2.1 eingetragen.



Bild 7.1.2: Ergebnisvergleich ohne/mit Thermik-Kompensation

Die variable Regelung der Zuluftmenge wirkt sich auch insofern sehr vorteilhaft aus, als der negative Einfluss offener Ausgangstüren – mit dem im Krisenfall als "Pferdefuß" aller
Überdruckbelüftungsanlagen zu rechnen ist – durch dann automatisch erfolgende Erhöhung der Luftleistung zumindest stark abgeschwächt wird.

7.2 Die Anwendung auf das Objekt, das die Entwicklung angestoßen hat

Das Objekt, das im Jahr 2000 für diese Entwicklung den Anstoß gab, ist Ende 2002 in Betrieb gegangen, wobei die Fertigstellung und mängelfreie Inbetriebnahme der Überdruckbelüftungsanlagen der 4 Sicherheitstreppenräume natürlich Voraussetzung für Bezug und Nutzung war. Die Anlagen funktionieren bestimmungsgemäß, wie die eingehenden Abnahmeprüfungen gezeigt haben. Eine weitere Überprüfung der Anlagen soll bei möglichst scharfem Frost stattfinden, wo natürlich die höchsten Anforderungen an das Leistungsvermögen der Anlagen gestellt werden.

Die Berechnung dieser Anlagen erfolgte, was die Rest-Thermik angeht, zunächst aufgrund einfacher, ingenieurmäßiger Annahmen. Sie haben sich im Wesentlichen bestätigt. Sicher konnte der Planer schon deshalb sein, weil die Anlagen ausreichend Reserven haben (primär gedacht freilich für Luftverluste durch die Ausgangstüren), um selbst bei extremem Frost auch die Ruhethermik kompensieren zu können.

Konzessionen mussten aber hinsichtlich der im ungünstigsten Fall zur Verfügung stehenden Luftleistungen für die Schleusen-Durchspülung gemacht werden. Obwohl der Treppenraum mit $A_{eff} = 2,84$ m² relativ "durchlässig" ist, ist er für die nur untere Zulufteinführung bei der gewaltigen Höhe nicht durchlässig genug. Eine zusätzliche, unabhängig geregelte Zulufteinführung in z.B. mittlerer Höhe, gespeist durch einen aus der Zentrale hochgeführten Kanal hätte die diesbezügliche Leistungsfähigkeit erheblich erhöht. Solch weitreichende Planungsänderungen waren aber nicht mehr möglich.

So konnten rechnerisch im ungünstigsten Fall nur mindestens 9700 m³/h zur Schleusenabschirmung gewährleistet werden, ein Wert, der nach John [2] für gesprinklerte Büros mit zwischengeschaltetem Flur noch ausreichend ist (anzumerken ist, dass die Abnahmeprüfungen erwartungsgemäß überwiegend wesentlich höhere Leistungen ergeben haben, da in Abweichung von der ursprünglichen Konzeption zwischenzeitlich die Öffnung aller Fenster des Brandgeschosses vereinbart worden war).

Die folgenden Grafiken und Tabellen – entstanden noch 2000 – zeigen ausschnittsweise wesentliche Ergebnisse der Berechnung.

Bild 7.2.1 zeigt die Druckverläufe im Treppenraum im Winter-Auslegungsfall (-10/+20°C). Bei geschlossenen Schleusen folgt der Druckverlauf der Kurve ganz rechts. Sind die Schleusentüren eines Brandgeschosses geöffnet, dann liegt der Überdruck auf der

dick gezeichneten Hüllkurve. Der Verlauf des Druckes unter und über dem Brandgeschoss folgt den zugehörigen dünnen Linien.

Anmerkung:

Die Druckverläufe sind jeweils für die Nenn-Abström-Luftleistung ins Brandgeschoss berechnet. Die Forderung lautet, dass dabei der Mindest-Überdruck gegenüber außen vorhanden sein muss, der notwendig ist, um die Abström-Luftleistung durch die Schleuse ins Brandgeschoss und schließlich Luft bzw. Brandgase ins Freie zu drücken. Ist der Überdruck größer, dann erhöht sich die Abströmleistung unter gleichzeitiger Reduzierung des Überdruckes, die Abschirmwirkung wird noch verstärkt.



Bild 7.2.1: Druckverlauf im Winter-Auslegungsfall bei beliebiger Lage des Brandgeschosses



Bild 7.2.2: Verlauf von Druck und Temperatur für den Winterauslegungsfall bei Brand in verschiedenen Geschosses

$ \begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $	eschoss	henlage	menstrom Geschoss	emperatur	Iftdichte	Zeta	ckverlust h Reibung	senstrom	rmestrom uwerk => Luft)	nperatur- Shung der Luft	rmischer uftrieb	erdruck pe-außen	ukörper- kühlung
Nr. m m ² /h °C kg/m Pa kg/s W K Pa Pa °C/h 0 0.00 35993 -10.00 1.34 25,3609 4,26 13,42 3543 2,63 0,53 58,75 3,42 2 7,40 36753 -4,45 1,31 25,264 4,32 13,42 31906 2,38 1,01 64,99 3,2 3 11.09 37078 -2.07 1.30 25,2091 4,36 13,42 28002 1,94 1,80 48,74 2,8 1,10 84,77 2,11 46,15 2,4 43,87 2,11 7,5 2,13 46,15 2,4 43,87 2,11 7,5 2,13 46,15 2,4 43,87 2,11 7,5 2,13 45,15 1,342 1912 1,43 2,65 44,87 1,342 11,43 2,15 2,42 43,87 2,11 1,44 4,53 1,342 14,55 1,313	Ŭ	Ĥ	Volu im (Luft	E		Dru	Mas	Wä (Ba	Ter erhö	A	Üb Trep	Ba ab
$ \begin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$	Nr.	m	m³/h	°C	kg/m³		Pa	kg/s	w	к	Pa	Pa	°C/h
1 3.70 36362 7.08 1.33 25.3051 4.29 13.42 35343 2.63 0.53 58,75 3.6 2 7.40 36753 4.45 1.31 25.246 4.32 13.42 28002 2.15 1.42 51,67 2.9 4 14.79 37371 0.08 1.29 25,1680 4.38 13.42 28002 1.94 1.80 48,74 2.66 6 22.19 37675 3.76 1.28 25,079 4.44 13.42 21910 1.58 2.44 4.37 2.1 4.43 1.42 17269 1.22 2.22 4.45 1.3.42 17269 1.22 2.22 4.45 1.3.42 14073 1.05 3.31 3.719 1.4 1 4.68 3.8623 1.3.2 1.448 4.52 1.3.42 14073 1.05 3.33 3.719 1.4 1 4.68 3.68 1.3.42 14073 1.05	0	0,00	35993	~10,00	1,34	25,3609	4,25	13,42	39151	2,92	0,00	63,00	4,00
2 7,40 36753 4.45 1,31 25,2646 4,32 13,42 28803 2,18 1,01 64,98 3,2 3 11,09 37078 -2,07 1,30 25,2094 4,38 13,42 28803 2,16 1,42 51,67 2,9 4 14,79 37371 0,08 1,29 25,1609 4,44 13,42 22473 1,75 2,13 46,15 2,4 6 22,19 37676 3,76 1,28 25,0127 4,45 13,42 1129 1,43 2,684 41,66 1,9 8 29,58 38626 6,77 1,26 25,0152 4,44 13,42 17259 1,29 2,82 40,10 1,7 9 33,28 38463 8,05 1,26 24,9729 4,51 13,42 14073 1,05 3,31 37,19 1,4 14 4,68 38985 11,21 1,24 24,9844 4,52 13,42	1	3,70	36392	-7,08	1,33	25,3051	4,29	13,42	35343	2,63	0,53	58,75	3,61
3 11.09 37078 -2.07 1.30 25.2091 4.36 13.42 28803 2.15 1.42 51,67 2.9 4 14.79 37371 0.08 1.29 25,1680 4.38 13.42 26002 1.94 1.80 48,15 2.4 6 22.19 37876 3.76 1.28 25,0974 4.43 13.42 21190 1.58 2.42 43,87 2.1 7 25.89 38022 5.34 1.27 25,0399 4.47 13.42 177269 1.29 2.82 40.10 1.7 9 33,28 38463 8.05 1.26 25,0752 4.48 13.42 17073 1.05 3.31 37,19 1.47 10 36,98 38622 9.22 1.25 24,9729 4.51 13.42 14073 1.05 3.31 37,19 1.41 11<40.68	2	7,40	36753	-4,45	1,31	25,2546	4,32	13,42	31906	2,38	1,01	54,99	3,26
4 14.79 37371 0.08 1.28 25.1860 4.38 13.42 26002 1.94 1.80 48.74 2.6 5 18.49 37636 2.01 1.28 25.1309 4.41 13.42 21130 1.58 2.4 43.87 21.1 7 25.89 38092 5.34 1.27 25.0672 4.45 13.42 11190 1.58 2.42 43.87 1.77 9 33.22 38463 8.05 1.22 25.0152 4.44 13.42 11303 1.05 3.41 3.13 3.55 1.57 10 36.96 38622 9.22 1.25 24.9930 4.50 13.42 14703 1.05 3.41 8.13 3.41	3	11,09	37078	-2,07	1,30	25,2091	4,36	13,42	28803	2,15	1,42	51,67	2,94
5 18,49 37636 2.01 1.28 25,109 4.41 13,42 21470 1.75 2.13 46,15 2.4 6 22,19 37676 3.76 1.22 25,0074 4.43 13,42 21190 1.8 2.42 43,87 2.1 7 25,59 38025 5.34 1.26 25,0399 4.47 13,42 17269 1.29 2.92 4.01 1.7 9 33,26 38463 8.05 1.26 25,0152 4.44 13,42 17550 1.16 3.13 38,55 1.51 10 36,98 38622 9.22 1.25 24,9729 4.51 13,42 14705 0.95 3.48 36,01 1.31 12 44,38 38895 11,21 1.24 24,9729 4.51 13,42 14705 0.95 3.48 36,01 1.33 13 48,07 3012 12.07 1.24 24,9728 4.53 13,42 10347 0.70 3.89 3.332 0.99 14 51.77	4	14,79	37371	0,08	1,29	25,1680	4,38	13,42	26002	1,94	1,80	48,74	2,66
6 22,19 37876 3.76 1.28 25,0974 4.43 13,42 21100 1.88 2,42 43,87 2,1 7 25,89 38092 5.34 1.27 25,0672 4.45 13,42 17292 1,29 2,82 40,10 1.7 9 33,28 38463 8,05 1.26 25,0162 4,48 13,42 12590 1,16 3,13 38,55 1,51 10 36,98 38662 9,22 1,25 24,9930 4,50 13,42 14073 1,06 3,31 37,19 1,4 11 40,68 38765 10,26 1,22 24,9548 4,53 13,42 10354 0,77 3,77 34,09 1,00 14 51,77 39117 12,24 1,23 24,9548 4,55 13,42 7617 0,57 4,09 32,11 0,77 15 55,47 39271 1,73 1,22 24,8674 4,57 13,4	5	18,49	37636	2,01	1,28	25,1309	4,41	13,42	23473	1,75	2,13	46,15	2,40
725.88380825.341.2725.06724.4513.42191291.432.6841,861.9829,58382876.771.2625.03994.4713.42172691.202.9240,101.7933.28384638.051.2625.01524.4813.42140731.053.1338.551.51036.98386229.221.2524.97294.5113.42127050.953.4836.0113.111140.683876510.261.2624.97294.5113.42105540.773.7734.0910.101344.303889511.211.2424.95484.5213.42103540.773.7734.0910.101451.773911712.841.2324.93264.5513.4243320.634.0032.670.881659.173929814.161.2324.89244.5513.4268760.514.1831.650.771762.873937614.731.2324.88744.5713.42680760.514.1831.650.771866.563944615.241.2224.88744.5613.4256040.424.3330.950.572073.963956616.121.2224.8534.5813.4256040.424.3330.950.5721 <td>6</td> <td>22,19</td> <td>37876</td> <td>3,76</td> <td>1,28</td> <td>25,0974</td> <td>4,43</td> <td>13,42</td> <td>21190</td> <td>1,58</td> <td>2,42</td> <td>43,87</td> <td>2,17</td>	6	22,19	37876	3,76	1,28	25,0974	4,43	13,42	21190	1,58	2,42	43,87	2,17
8 29,58 38287 6,77 1,26 25,0399 4,47 13,42 17269 1,29 2,92 40,10 1,7 9 33,28 38463 8,05 1,25 24,9930 4,50 13,42 15590 1,16 3,13 38,75 1,13 10 36,98 38622 9,22 1,25 24,9930 4,50 13,42 14073 1,16 3,13 37,19 1,4 11 40,68 38765 10,26 1,22 24,9548 4,52 13,42 10354 0,77 3,77 34,09 1,00 1,01 12 44,38 38895 11,21 1,24 24,9548 4,52 13,42 10354 0,77 3,77 34,09 1,01 1,3 13 48,07 39017 12,28 24,9103 4,55 13,42 9347 0,70 3,89 33,32 0,99 15 55,47 39212 13,32 24,876 4,55 13,42 6836 0,65 3,44 1,60 1,22 24,8874 4,57	7	25,89	38092	5,34	1,27	25,0672	4,45	13,42	19129	1,43	2,68	41,86	1,96
9 33,28 38463 8,05 1,26 25,0152 4,48 13,42 15590 1,16 3,13 38,55 1,51 10 36,98 38622 9,22 1,25 24,9930 4,50 13,42 14073 1,05 3,31 37,19 1,4 11 40,68 38655 1,25 24,9548 4,52 13,42 1469 0,85 3,68 34,98 1,11 13 48,07 39012 12,07 1,24 24,9548 4,52 13,42 10354 0,07 3,77 34,09 1,00 14 51,77 39117 12,84 1,23 24,9934 4,55 13,42 7617 0,57 4,08 33,32 0,97 15 55,47 39214 1,416 1,23 24,8924 4,56 13,42 7617 0,57 4,08 33,32 0,97 17 62,87 39596 16,71 1,22 24,8876 4,56 13,42	8	29,58	38287	6,77	1,26	25,0399	4,47	13,42	17269	1,29	Z,92	40,10	1,77
10 36,98 38622 9,22 1,25 24,930 4,50 13,42 14073 1,05 3,31 37,19 1,4 11 40,68 38765 10,26 1,22 24,9729 4,51 13,42 11469 0,85 3,63 34,98 1,11 13 48,07 39012 12,207 1,24 24,9384 4,53 13,42 10354 0,77 3,77 34,09 1,00 14 51,77 39117 12,84 1,23 24,9384 4,55 13,42 8438 0,83 4,00 32,67 0,88 15 55,47 39212 13,53 1,23 24,8074 4,56 13,42 8438 0,83 4,00 32,67 0,88 15 55,47 39298 14,16 1,23 24,8874 4,57 13,42 6876 0,51 4,18 1,55 0,77 18 66,56 39446 15,24 1,22 24,8674 4,58 13,42 5004 0,42 4,33 30,55 0,55 20 73	9	33,28	38463	8,05	1,26	25,0152	4,48	13,42	15590	1,16	3,13	38,55	1,59
11 40,68 38765 10,26 1,25 24,9729 4,51 13,42 12705 0.95 3,48 36,01 1,33 12 44,38 38895 11,21 1,24 24,9548 4,52 13,42 11459 0,65 3,63 34,98 1,11 13 48,07 39012 12,07 1,24 24,9384 4,53 13,42 10354 0,77 3,77 34,09 1,00 14 51,77 39177 12,84 1,23 24,9236 4,56 13,42 9347 0,70 3,88 33,20 0,98 15 55,47 39212 13,53 1,23 24,9236 4,56 13,42 7617 0,57 4,09 32,11 0,77 16 59,17 39298 14,16 1,22 24,8674 4,57 13,42 6876 0,42 4,33 30,55 0,57 19 70,26 39509 15,71 1,22 24,8667 4,58 13,42 5059 0,38 4,40 30,71 0,52 21 <td< td=""><td>10</td><td>36,98</td><td>38622</td><td>9,22</td><td>1,25</td><td>24,9930</td><td>4,50</td><td>13,42</td><td>14073</td><td>1,05</td><td>3,31</td><td>37,19</td><td>1,44</td></td<>	10	36,98	38622	9,22	1,25	24,9930	4,50	13,42	14073	1,05	3,31	37,19	1,44
12 44.38 38895 11,21 1,24 24,9548 4,52 13,42 11469 0,85 3,63 34,98 1,11 13 46,07 39012 12,07 1,24 24,9334 4,53 13,42 10354 0,77 3,77 34,09 1,00 14 51,77 39212 13,53 1,23 24,9236 4,55 13,42 9347 0,70 3,89 33,32 0,94 15 55,47 39212 13,53 1,23 24,8982 4,56 13,42 7617 0,57 4,09 32,11 0,77 17 62,87 39376 14,73 1,22 24,8874 4,57 13,42 6876 0,51 4,18 31,65 0,77 18 66,56 39446 15,22 1,22 24,8677 4,53 13,42 5604 0,42 4,33 30,55 0,57 20 73,96 39566 16,12 1,22 24,8677 4,59 13,42 4567 0,34 4,45 30,52 0,47 21	11	40,68	38765	10,26	1,25	24,9729	4,51	13,42	12705	0,95	3,48	36,01	1,30
13 48.07 39012 12,07 1,24 24,9384 4,53 13,42 10354 0,77 3,77 34,09 1,04 14 51,77 39117 12,84 1,23 24,9203 4,55 13,42 9347 0,70 3,89 33,22 0,99 15 55,47 39212 13,53 1,23 24,9103 4,55 13,42 848 0,63 4,00 32,67 0,86 16 55,17 39276 14,73 1,23 24,8874 4,57 13,42 6876 0,51 4,18 31,65 0,77 18 66,56 39446 15,24 1,22 24,8676 4,57 13,42 6028 0,46 4,26 31,26 0,62 19 70,26 39609 15,71 1,22 24,8674 4,58 13,42 5604 0,42 4,33 30,95 0,57 20 73,96 39665 16,61 1,22 24,8674 4,58 13,42 4123 0,31 4,51 30,39 0,42 23 85	12	44,38	38895	11,21	1,24	24,9548	4,52	13,42	11469	0,85	3,63	34,98	1,17
14 51,77 39117 12,84 1,23 24,9236 4,54 13,42 9347 0,70 3,89 33,32 0,94 15 55,47 39212 13,53 1,23 24,9103 4,55 13,42 8438 0,63 4,00 32,67 0,88 16 59,17 39298 14,16 1.23 24,8924 4,56 13,42 6676 0,51 4,18 31,65 0,77 17 62,87 39376 14,73 1.23 24,8874 4,57 13,42 6604 0,42 4,33 30,95 0,57 20 73,96 39509 15,71 1.22 24,8635 4,58 13,42 5059 0,38 4,40 30,71 0,52 21 77,66 39618 16,50 1,22 24,8535 4,59 13,42 4123 0,31 4,51 30,92 0,42 23 85,06 39707 17,15 1,22 24,8470 4,59 13,42 3320 0,22 4,63 30,26 0,34 24 88	13	48,07	39012	12,07	1,24	24,9384	4,53	13,42	10354	0,77	3,77	34,09	1,06
15 55,47 39212 13,53 1,23 24,9103 4,55 13,42 8438 0,63 4,00 32,67 0,86 16 55,17 39298 14,16 1.23 24,8974 4,57 13,42 6876 0,51 4,18 31,65 0,77 18 66,56 39446 15,24 1,22 24,8776 4,57 13,42 5604 0,42 4,33 30,95 0,55 20 73,96 39566 16,12 1,22 24,8677 4,58 13,42 5059 0,38 4,40 30,71 0,52 21 77,66 39618 16.50 1,22 24,8535 4,59 13,42 4557 0,34 4,45 30,52 0,47 22 81,36 39665 16,84 1,22 24,8470 4,59 13,42 4123 0,31 4,51 30,30 0,42 23 85,06 39707 17,15 1,22 24,8358 4,60 <td< td=""><td>14</td><td>51,77</td><td>39117</td><td>12,84</td><td>1,23</td><td>24,9236</td><td>4,54</td><td>13,42</td><td>9347</td><td>0,70</td><td>3,89</td><td>33,32</td><td>0,96</td></td<>	14	51,77	39117	12,84	1,23	24,9236	4,54	13,42	9347	0,70	3,89	33,32	0,96
16 59,17 39298 14,16 1.23 24,8982 4,56 13,42 7617 0,57 4,09 32,11 0,74 17 62,87 39376 14,73 1,22 24,8874 4,57 13,42 6876 0,51 4,18 31,65 0,77 18 66,56 39446 15,24 1,22 24,8677 4,58 13,42 5050 0,46 4,26 31,26 0,63 20 73,96 39506 16,12 1,22 24,8607 4,58 13,42 4557 0,34 4,45 30,52 0,47 21 77,66 39616 16,64 1,22 24,855 4,59 13,42 4123 0,31 4,51 30,52 0,47 23 85,06 39707 17,15 1,22 24,858 4,60 13,42 3360 0,25 4,60 30,26 0,34 24 88,75 39745 17,43 1,22 24,858 4,60 13,42 3360 0,25 4,60 30,26 0,34 0,26 30,26 0	15	55,47	39212	13,53	1,23	24,9103	4,55	13,42	8438	0,63	4,00	32,67	0,86
17 62,87 39376 14,73 1,23 24,8874 4,57 13,42 6876 0,51 4,18 31,65 0,70 18 66,56 39446 15,24 1,22 24,8776 4,57 13,42 6208 0,46 4,26 31,26 0,65 19 70,26 39509 15,71 1,22 24,8607 4,58 13,42 5604 0,42 4,33 30,95 0,57 20 73,96 39566 16,12 1,22 24,8637 4,59 13,42 4567 0,34 4,45 30,79 0,47 22 81,36 39665 16,84 1,22 24,8470 4,59 13,42 3722 0,28 4,55 30,30 0,32 24 88,75 39745 17,43 1,22 24,8358 4,60 13,42 3360 0,25 4,60 30,26 0,34 25 92,45 30079 17,68 1,21 26,1809 2,78 10,15 2033 0,23 4,72 34,02 0,24 26 96	16	59,17	39298	14,16	1,23	24,8982	4,56	13,42	7617	0,57	4,09	32,11	0,78
18 66,56 39446 15,24 1,22 24,8776 4,57 13,42 6208 0,46 4,26 31,26 0,63 19 70,26 39509 15,71 1,22 24,8687 4,58 13,42 5604 0,42 4,33 30,95 0,57 20 73,96 39606 16,12 1,22 24,8637 4,58 13,42 5059 0,38 4,40 30,71 0,52 21 77,66 39618 16,50 1,22 24,8535 4,59 13,42 4123 0,31 4,51 30,39 0,42 23 85,06 39707 17,15 1,22 24,8411 4,60 13,42 3320 0,25 4,60 30,26 0,33 0,30 4,63 30,26 0,31 24 88,75 39745 17,43 1,22 24,8358 4,60 13,42 30,26 4,68 32,12 0,27 27 99,85 30137 18,24	17	62,87	39376	14,73	1,23	24,8874	4,57	13,42	6876	0,51	4,18	31,65	0,70
19 70,26 39509 15,71 1.22 24,8687 4,58 13,42 5604 0,42 4,33 30,95 0,57 20 73,96 39566 16,12 1,22 24,8607 4,58 13,42 5059 0,38 4,40 30,71 0,52 21 77,66 39618 16,50 1,22 24,8535 4,59 13,42 4567 0,34 4,45 30,52 0,47 22 81,36 39665 16,84 1,22 24,8470 4,59 13,42 4123 0,31 4,55 30,30 0,42 23 85,06 39707 17,15 1,22 24,8484 4,60 13,42 3360 0,25 4,60 30,26 0,33 24 88,75 39745 17,43 1,22 24,8358 4,60 13,42 3330 0,26 4,63 30,26 0,33 26 96,15 30110 17,97 1,21 26,1846 2,78 10,15 2033 0,23 4,72 34,02 0,24 27 99	18	66,56	39446	15,24	1,22	24,8776	4,57	13,42	6208	0,46	4,26	31,26	0,63
20 73,96 39566 16,12 1,22 24,8607 4,58 13,42 5059 0,38 4,40 30,71 0,52 21 77,66 39618 16,50 1,22 24,8535 4,59 13,42 4567 0,34 4,45 30,52 0,47 22 81,36 39665 16,84 1,22 24,8470 4,59 13,42 4123 0,31 4,51 30,39 0,42 23 85,06 39707 17,15 1,22 24,8411 4,60 13,42 3722 0,28 4,55 30,30 0,32 24 88,75 39745 17,43 1,22 24,858 4,60 13,42 3360 0,25 4,60 30,26 0,34 25 92,45 30079 17,68 1,21 26,1890 2,78 10,15 2033 0,26 4,68 32,12 0,27 27 99,85 30137 18,24 1,21 26,1809 2,78 10,15 2033 0,23 4,72 34,02 0,24 28 103,55	19	70,26	39509	15,71	1.22	24,8687	4,58	13,42	5604	0,42	4,33	30,95	0,57
21 77,66 39618 16,50 1,22 24,8535 4,59 13,42 4567 0,34 4,45 30,52 0,47 22 81,36 39665 16,64 1,22 24,8470 4,59 13,42 4123 0,31 4,51 30,39 0,42 23 85,06 39707 17,15 1,22 24,8411 4,60 13,42 3722 0,28 4,55 30,30 0,32 24 88,75 39745 17,43 1,22 24,8358 4,60 13,42 3360 0,25 4,60 30,26 0,34 25 92,45 30079 17,68 1,21 26,1800 2,78 10,15 3033 0,30 4,63 30,26 0,31 26 96,15 30110 17,97 1,21 26,1809 2,78 10,15 2033 0,23 4,72 34,02 0,24 28 103,55 30160 18,46 1,21 26,1776 2,78 10,15 1749 0,17 4,78 37,93 0,18 30 1	20	73,96	39566	16,12	1,22	24,8607	4,58	13,42	5059	0,38	4,40	30,71	0,52
22 81,36 39665 16,84 1,22 24,8470 4,59 13,42 4123 0,31 4,51 30,39 0,422 23 85,06 39707 17,15 1,22 24,8411 4,60 13,42 3722 0,28 4,55 30,30 0,38 24 88,75 39745 17,43 1,22 24,8358 4,60 13,42 3360 0,25 4,60 30,26 0,34 25 92,45 30079 17,68 1.21 26,1890 2,78 10,15 3033 0,26 4,68 32,12 0,27 27 99,85 30137 18,24 1,21 26,1809 2,78 10,15 2033 0,23 4,72 34,02 0,24 28 103,55 30160 18,46 1,21 26,1776 2,78 10,15 2007 0,20 4,75 35,96 0,21 29 107,24 30181 18,66 1,21 26,1722 2,78 10,15 1524 0,15 4,81 39,92 0,16 31 114,64	21	77,66	39618	16,50	1,22	24,8535	4,59	13,42	4567	0,34	4,45	30,52	0,47
23 85,06 39707 17,15 1,22 24,8411 4,60 13,42 3722 0,28 4,55 30,30 0,38 24 88,75 39745 17,43 1,22 24,8358 4,60 13,42 3360 0,25 4,60 30,26 0,34 25 92,45 30079 17,68 1.21 26,1890 2,78 10,15 3033 0,30 4,63 30,26 0,31 26 96,15 30110 17,97 1,21 26,1809 2,78 10,15 2303 0,23 4,72 34,02 0,24 28 103,55 30160 18,46 1,21 26,1776 2,78 10,15 2007 0,20 4,75 35,96 0,21 29 107,24 30181 18,66 1,21 26,1747 2,78 10,15 1749 0,17 4,78 37,93 0,18 30 110,94 30198 18,83 1,21 26,1722 2,78 10,15 1524 0,15 4,81 39,92 0,16 31 <td< td=""><td>22</td><td>81,36</td><td>39665</td><td>16,84</td><td>1,22</td><td>24,8470</td><td>4,59</td><td>13,42</td><td>4123</td><td>0,31</td><td>4,51</td><td>30,39</td><td>0,42</td></td<>	22	81,36	39665	16,84	1,22	24,8470	4,59	13,42	4123	0,31	4,51	30,39	0,42
24 88.75 39745 17,43 1,22 24,8358 4,60 13,42 3360 0,25 4,60 30,26 0,34 25 92,45 30079 17,68 1,21 26,1890 2,78 10,15 3033 0,30 4,63 30,26 0,31 26 96,15 30110 17,97 1,21 26,1809 2,78 10,15 2643 0,26 4,68 32,12 0,27 27 99,85 30137 18,24 1,21 26,1706 2,78 10,15 2007 0,20 4,75 35,96 0,21 29 107,24 30181 18,66 1,21 26,1777 2,78 10,15 1749 0,17 4,78 37,93 0,18 30 110,94 30198 18,83 1,21 26,1722 2,78 10,15 1524 0,15 4,81 39,92 0,16 31 114,64 30214 18,98 1,21 26,1701 2,79 10,15 1157 0,11 4,85 43,99 0,12 33 <td< td=""><td>23</td><td>85,06</td><td></td><td>17,15</td><td>1,22</td><td>24,8411</td><td>4,60</td><td>13,42</td><td>3722</td><td>0,28</td><td>4,55</td><td>30,30</td><td>0,38</td></td<>	23	85,06		17,15	1,22	24,8411	4,60	13,42	3722	0,28	4,55	30,30	0,38
2592,453007917,681.2126,18902.7810,1530330,304,6330,260,312696,153011017,971.2126,18462.7810,1526430,264,6832,120,272799,853013718,241,2126,18092.7810,1523030,234,7234,020,2428103,553016018,461,2126,17762.7810,1520070,204,7535,960,2129107,243018118,661,2126,17472,7810,1517490,174,7837,930,1830110,943019818,831,2126,17222,7810,1515240,154,8139,920,1631114,643021418,981,2126,17012,7910,1513280,134,8341,950,1432118,343022719,111,2126,16822,7910,1511570,114,8543,990,1233122,043023919,231,2126,16552,7910,1510080,104,8746,060,1034125,733025019,331,2126,16512,7910,155870,094,8848,140,0935129,433025819,411,2126,16512,7910,155870,064,9050,230,08	24	88,75	39745	17,43	1,22	24,8358	4,60	13,42	3360	0,25	4,60	30,26	0,34
2696,153011017,971,2126,18462,7810,1526430,264,6832,120,272799,853013718,241,2126,18092,7810,1523030,234,7234,020,2428103,553016018,461,2126,17762,7810,1520070,204,7535,960,2129107,243018118,661,2126,17472,7810,1517490,174,7837,930,1830110,943019818,831,2126,17222,7810,1515240,154,8139,920,1631114,643021418,981,2126,17012,7910,1513280,134,8341,950,1432118,343022719,111,2126,16822,7910,1511570,114,8543,990,1233122,043023919,231,2126,16652,7910,1510080,104,8746,060,1034125,733025019,331,2126,16512,7910,158790,094,8848,140,0935129,433025819,411,2126,16272,7910,155670,064,9050,230,0836133,133026619,491,2126,16182,7910,155810,064,9254,450,06	25	92,45	30079	17,68	1,21	26,1890	2,78	10,15	3033	0,30	4,63	30,26	0,31
2799.853013718.241.2126,18092,7810,1523030,234,7234,020,2428103.553016018,461.2126,17762,7810,1520070,204,7535,960,2129107,243018118,661.2126,17472,7810,1517490,174,7837,930,1830110,943019818,831.2126,17222,7810,1515240,154,8139,920,1631114,643021418,981.2126,17012,7910,1513280,134,8341,950,1432118,343022719,111.2126,16622,7910,1511570,114,8543,990,1233122,043023919,231,2126,16652,7910,1510080,104,8746,060,1034125,733025019,331,2126,16512,7910,158790,094,8848,140,0935129,433025819,411.2126,16382,7910,1556670,074,9152,340,0737136,833027319,551,2126,16182,7910,155810,064,9254,450,0638140,533027919,611,2126,16092,7910,155870,054,9256,580,05 <td< td=""><td>26</td><td>96,15</td><td>30110</td><td>17,97</td><td>1,21</td><td>26,1846</td><td>2,78</td><td>10,15</td><td>2643</td><td>0,26</td><td>4,68</td><td>32,12</td><td>0,27</td></td<>	26	96,15	30110	17,97	1,21	26,1846	2,78	10,15	2643	0,26	4,68	32,12	0,27
28 103,55 30160 18,46 1,21 26,1776 2,78 10,15 2007 0,20 4,75 35,96 0,21 29 107,24 30181 18,66 1,21 26,1747 2,78 10,15 1749 0,17 4,78 37,93 0,18 30 110,94 30198 18,83 1.21 26,1722 2,78 10,15 1524 0,15 4,81 39,92 0,16 31 114,64 30214 18,98 1.21 26,1701 2,79 10,15 1328 0,13 4,83 41,95 0,14 32 118,34 30227 19,11 1,21 26,1662 2,79 10,15 1008 0,10 4,87 46,06 0,10 33 122,04 30239 19,23 1,21 26,1651 2,79 10,15 879 0,09 4,88 48,14 0,09 34 125,73 30258 19,41 1,21 26,1627 2,79	27	99,85	30137	18,24	1,21	26,1809	2,78	10,15	2303	0,23	4,72	34,02	0,24
29 107,24 30181 18,66 1,21 26,1747 2,78 10,15 1749 0,17 4,78 37,93 0,18 30 110,94 30198 18,83 1,21 26,1722 2,78 10,15 1524 0,15 4,81 39,92 0,16 31 114,64 30214 18,98 1,21 26,1701 2,79 10,15 1328 0,13 4,83 41,95 0,14 32 118,34 30227 19,11 1,21 26,1662 2,79 10,15 1157 0,11 4,85 43,99 0,12 33 122,04 30239 19,23 1,21 26,1665 2,79 10,15 1008 0,10 4,87 46,06 0,10 34 125,73 30250 19,33 1,21 26,1638 2,79 10,15 879 0,09 4,88 48,14 0,09 35 129,43 30258 19,41 1,21 26,1638 2,79	28	103,55	30160	18,46	1,21	26,1776	2,78	10,15	2007	0,20	4,75	35,96	0,21
30 110,94 30198 18,83 1,21 26,1722 2,78 10,15 1524 0,15 4,81 39,92 0,16 31 114,64 30214 18,98 1,21 26,1701 2,79 10,15 1328 0,13 4,83 41,95 0,14 32 118,34 30227 19,11 1,21 26,1682 2,79 10,15 1157 0,11 4,85 43,99 0,12 33 122,04 30239 19,23 1,21 26,1665 2,79 10,15 1008 0,10 4,87 46,06 0,10 34 125,73 30250 19,33 1,21 26,1651 2,79 10,15 879 0,09 4,88 48,14 0,09 35 129,43 30258 19,41 1,21 26,1627 2,79 10,15 667 0,07 4,91 52,34 0,07 37 136,83 30273 19,55 1,21 26,1618 2,79	29	107,24	30181	18,66	1,21	26,1747	2,78	10,15	1749	0,17	4,78	37,93	0,18
31 114,63 30214 18,98 1,21 26,1701 2,79 10,15 1328 0,13 4,83 41,95 0,14 32 118,34 30227 19,11 1,21 26,1682 2,79 10,15 1157 0,11 4,83 41,95 0,14 33 122,04 30239 19,23 1,21 26,1665 2,79 10,15 1008 0,10 4,87 46,06 0,10 34 125,73 30250 19,33 1,21 26,1651 2,79 10,15 879 0,09 4,88 48,14 0,09 35 129,43 30258 19,41 1,21 26,1638 2,79 10,15 667 0,07 4,91 52,34 0,07 36 133,13 30266 19,49 1,21 26,1627 2,79 10,15 581 0,06 4,92 54,45 0,06 37 136,83 30273 19,55 1,21 26,1618 2,79 10,15 581 0,06 4,92 54,45 0,06 38 <td< td=""><td></td><td>110,94</td><td>30198</td><td>18,83</td><td>1,21</td><td>26,1722</td><td>2,78</td><td>10,15</td><td>1524</td><td>0,15</td><td>4,81</td><td>39,92</td><td>0,16</td></td<>		110,94	30198	18,83	1,21	26,1722	2,78	10,15	1524	0,15	4,81	39,92	0,16
32 118,34 30227 19,11 1,21 26,1682 2,79 10,15 1157 0,11 4,85 43,99 0,12 33 122,04 30239 19,23 1,21 26,1665 2,79 10,15 1008 0,10 4,87 46,06 0,10 34 125,73 30250 19,33 1,21 26,1651 2,79 10,15 879 0,09 4,88 48,14 0,09 35 129,43 30258 19,41 1,21 26,1638 2,79 10,15 766 0,08 4,90 50,23 0,08 36 133,13 30266 19,49 1,21 26,1627 2,79 10,15 667 0,07 4,91 52,34 0,07 37 136,83 30273 19,55 1,21 26,1618 2,79 10,15 581 0,06 4,92 54,45 0,06 38 140,53 30279 19,61 1,21 26,1602 2,79 10,15 507 0,05 4,92 56,58 0,05 39	31	114,64	30214	18,98	1,21	26,1701	2,79	10,15	1328	0,13	4,83	41,95	0,14
33 122,04 30239 19,23 1,21 26,1665 2,79 10,15 1008 0,10 4,87 46,06 0,10 34 125,73 30250 19,33 1,21 26,1651 2,79 10,15 879 0,09 4,88 48,14 0,09 35 129,43 30258 19,41 1.21 26,1638 2,79 10,15 766 0,08 4,90 50,23 0,08 36 133,13 30266 19,49 1,21 26,1627 2,79 10,15 667 0,07 4,91 52,34 0,07 37 136,83 30273 19,55 1,21 26,1618 2,79 10,15 581 0,06 4,92 54,45 0,06 38 140,53 30279 19,61 1,21 26,1609 2,79 10,15 507 0,05 4,92 56,58 0,05 39 144,22 30284 19,66 1,21 26,1506 2,79 10,15 385 0,04 4,94 60,85 0,04 40 1	32	118,34	30227	19,11	1,21	26,1682	2,79	10,15	1157	0,11	4,85	43,99	0,12
34 125,73 30250 19,33 1,21 26,1651 2.79 10,15 879 0,09 4,88 48,14 0,09 35 129,43 30258 19,41 1.21 26,1638 2.79 10,15 766 0,08 4,90 50,23 0,08 36 133,13 30266 19,49 1,21 26,1627 2,79 10,15 667 0,07 4,91 52,34 0,07 37 136,83 30273 19,55 1,21 26,1618 2.79 10,15 581 0,06 4,92 54,45 0,06 38 140,53 30279 19,61 1.21 26,1609 2,79 10,15 507 0,05 4,92 56,58 0,05 39 144,22 30284 19,66 1,21 26,1502 2,79 10,15 341 0,04 4,93 58,71 0,05 40 147,92 30289 19,71 1,21 26,1596 2,79 <t< td=""><td>33</td><td>122,04</td><td>30239</td><td>19,23</td><td>1,21</td><td>26,1665</td><td>2,79</td><td>10,15</td><td>1008</td><td>0,10</td><td>4,87</td><td>46,06</td><td>0,10</td></t<>	33	122,04	30239	19,23	1,21	26,1665	2,79	10,15	1008	0,10	4,87	46,06	0,10
35 129,43 30258 19,41 1.21 26,1638 2,79 10,15 766 0,08 4,90 50,23 0,08 36 133,13 30266 19,49 1,21 26,1627 2,79 10,15 667 0,07 4,91 52,34 0,07 37 136,83 30273 19,55 1,21 26,1618 2.79 10,15 581 0,06 4,92 54,45 0,06 38 140,53 30279 19,61 1.21 26,1609 2,79 10,15 507 0,05 4,92 56,58 0,05 39 144,22 30284 19,66 1,21 26,1602 2,79 10,15 441 0,04 4,93 58,71 0,05 40 147,92 30289 19,71 1,21 26,1596 2,79 10,15 385 0,04 4,94 60,85 0,04 41 151,62 30293 19,74 1,21 26,1590 2,79 <t< td=""><td>34</td><td>125,73</td><td>30250</td><td>19,33</td><td>1,21</td><td>26,1651</td><td>2,79</td><td>10,15</td><td>879</td><td>0,09</td><td>4,88</td><td>48,14</td><td>0,09</td></t<>	34	125,73	30250	19,33	1,21	26,1651	2,79	10,15	879	0,09	4,88	48,14	0,09
3b 133,13 302bb 19,49 1,21 26,162/ 2,79 10,15 667 0,07 4,91 52,34 0,07 37 136,83 30273 19,55 1,21 26,1618 2,79 10,15 581 0,06 4,92 54,45 0,06 38 140,53 30279 19,61 1.21 26,1609 2,79 10,15 507 0,05 4,92 56,58 0,05 39 144,22 30284 19,66 1,21 26,1602 2,79 10,15 441 0,04 4,93 58,71 0,05 40 147,92 30289 19,71 1,21 26,1596 2,79 10,15 385 0,04 4,94 60,85 0,04 41 151,62 30293 19,74 1,21 26,1590 2,79 10,15 335 0,03 4,94 63,00 0,03	35	129,43	30258	19,41	1.21	26,1638	2,79	10,15	/66	0,08	4,90	50,23	0,08
37 130,03 302/3 19,55 1,21 26,1618 2.79 10,15 581 0,06 4,92 54,45 0,06 38 140,53 30279 19,61 1.21 26,1609 2,79 10,15 507 0,05 4,92 56,58 0,05 39 144,22 30284 19,66 1,21 26,1602 2,79 10,15 441 0,04 4,93 58,71 0,05 40 147,92 30289 19,71 1,21 26,1596 2,79 10,15 385 0,04 4,94 60,85 0,04 41 151,62 30293 19,74 1,21 26,1590 2,79 10,15 335 0,03 4,94 63,00 0,03	35	133,13	30266	19,49	1,21	26,1627	2,79	10,15	667	0,07	4,91	52,34	0,07
30 140,53 302/9 19,61 1.21 26,1609 2,79 10,15 507 0,05 4,92 56,58 0,05 39 144,22 30284 19,66 1,21 26,1602 2,79 10,15 441 0,04 4,93 58,71 0,05 40 147,92 30289 19,71 1,21 26,1596 2,79 10,15 385 0,04 4,94 60,85 0,04 41 151,62 30293 19,74 1,21 26,1590 2,79 10,15 335 0,03 4,94 63,00 0,03	3/	130,83	302/3	19,55	1,21	26,1618	2.79	10,15	581	0,06	4,92	54,45	0,06
35 144,22 30264 19,66 1,21 26,1602 2,79 10,15 441 0,04 4,93 58,71 0,05 40 147,92 30289 19,71 1,21 26,1596 2,79 10,15 385 0,04 4,94 60,85 0,04 41 151,62 30293 19,74 1,21 26,1590 2,79 10,15 335 0,03 4,94 63,00 0,03	38	140,53	302/9	19,61	1.21	26,1609	2,79	10,15		0,05	4,92	56,58	0,05
40 147,92 30289 19,71 1,21 20,1590 2,79 10,15 385 0,04 4,94 60,85 0,04 41 151,62 30293 19,74 1,21 26,1590 2,79 10,15 335 0,03 4,94 63,00 0,03	39	144,22	30284	19,66	1,21	26,1602	2,79	10,15	441	0,04	4,93	20,/1	0,05
411 151,621 302931 19,741 1,211 26,15901 2,791 10,151 3351 0,031 4,94 63,00 0,03	40	147,92	30289	19,71	1,21	20,1596	2,79	10,15	385	0,04	4,94	00,85	0,04
· · · · · · ·	41	151,62	30293	19,74	1,21	26,1590	2,79	10,15	335	0,03	4,94	63,00	0,03

Tabelle 7.1.1:Berechnungstabelle für den Winterauslegungsfall
bei Brand im 25. Obergeschoss



Bild 7.2.3: Verlauf von Druck und Temperatur bei verschiedenen Außentemperaturen mit Volumenströmen (ohne Abströmung)

77

Bild 7.2.2 zeigt den Verlauf von Druck und Temperatur über der Höhe für den Winter-Auslegungsfall bei Brand in verschiedenen Geschossen. Tabelle 7.2.1 zeigt dazu beispielhaft eine Berechnungstabelle für Brand im 25. Geschoss.

Bild 7.2.3 zeigt den Verlauf von Druck und Temperatur über der Höhe bei verschiedenen Außentemperaturen für geschlossene Schleusentüren, wobei die Zuluft-Volumenströme wiederum ausgewiesen sind.

Diese Diagramme zeigen zwei wesentliche Maßnahmen, um trotz unterschiedlicher Witterungsbedingungen und unterschiedlicher Brandgeschosse den Überdruck im Treppenraum gegenüber außen in allen Geschossen innerhalb der zulässigen, engen Toleranz zu halten:

- Die variable Anpassung der Luftleistung und
- die Verschiebung der Sollwerte des Überdruckes unten und oben abhängig von der Außentemperatur.

Zu letzterem:

Der Sollwert des Überdruckes oben muss im Allgemeinen außentemperaturabhängig verschoben werden, da der Überdruck im Winter im oberen Teil des Treppenraumes immer ansteigt, während er im Sommer dort abfällt (s.a. Abschnitt 5). Diese Sollwertverstellung ist also zwingende Voraussetzung, wenn die weitreichenden Möglichkeiten dieses Systems ausgeschöpft werden sollen bzw. müssen.

Die aus Bild 7.2.3 ebenfalls ablesbare Sollwertverschiebung des Überdruckes unten, am Fuß des Treppenraumes, ist dagegen nicht zwingend, da vom Fußpunkt weg der Überdruck im Treppenraum sowohl im Sommer, wie im Winter, abfällt. Im gezeigten Beispiel wurde die Verschiebung nur angewandt, um die ohnehin gegebenen Möglichkeiten der speicherprogrammierbaren Steuerung (Regelelektronik) dazu zu nutzen, im mittleren Temperaturbereich, der natürlich den Großteil der Jahresstunden ausmacht, niedrigere Überdrücke unten zu erreichen. Hierauf kann freilich auch verzichtet werden und ein fester Sollwert an der Obergrenze des Toleranzbandes, also z.B. 75 Pa gewählt werden.

Die Regelung der Anlagen, an die natürlich besonders hohe Sicherheitsanforderungen gestellt werden müssen, ist als sicherheitsgerichtete SPS mit Masterstation und intelligenten redundanten Unterstationen ausgeführt, so dass bei Ausfall einer Komponente die Funktion immer erhalten bliebe. Selbstverständlich sind Ventilatoren und Regelklappen jeweils ebenfalls doppelt vorhanden (automatische Umschaltung). Die Klappenstellantriebe sind pneumatische Stellzylinder, da schnelle Reaktion auf z.B. plötzlich geöffnete/geschlossene Türen in Verbindung mit hohen Stellkräften von marktüblichen elektromotorischen Stellantrieben nicht gewährleistet werden konnten.

7.3 Die Anwendung auf ein 120 m-Hochhaus

Dieser Anwendungsfall sei kurz skizziert, weil hier durch rechtzeitige Einschaltung bei der Planung die Einschränkungen vermieden werden konnten, die beim vorher genannten Beispiel hingenommen werden mussten.

Hier konnte mit dem Architekten rechtzeitig ein Bypass sowie eine zusätzliche Lufteinführung in etwa mittlerer Höhe vereinbart werden. Sowohl die untere Zulufteinführung wie auch die in mittlerer Höhe sind jeweils auf 2 Geschosse verteilt. Beide Zulufteinführungen sind selbstverständlich getrennt regelbar, um auch in mittlerer Höhe einen im Rahmen der Planung gewählten Sollwert einhalten zu können. Dieser mittlere Sollwert kann hier, je nachdem, ob das Brandgeschoss unterhalb oder oberhalb der Lufteinführung liegt, dem unteren, bzw. dem oberen Überdruck-Sollwert angepasst werden.

Damit lassen sich bei beliebiger Lage des Brandgeschosses immer mindestens 18000 m³/h an der offenen Schleuse zur Verfügung stellen.

Bild 7.3.1 zeigt für den Winter-Auslegungsfall den Verlauf von Druck und Temperatur, in der oberen Bildhälfte bei Brand über der mittleren Zulufteinführung, in der unteren Bildhälfte bei Brand unter der mittleren Zulufteinführung. Tabelle 7.3.1 gibt dazu beispielhaft eine Berechnungstabelle wieder.

Bild 7.3.2 zeigt wiederum den Verlauf des Druckes bei beliebiger Lage des Brandgeschosses und offenen Schleusentüren bei 18000 m³/h Abströmung ins Brandgeschoss.

Die Leistungsfähigkeit des Systems wird also durch die zusätzliche Druckhaltung in mittlerer Höhe erheblich gesteigert. Darüber hinaus verringert sich dadurch die Empfindlichkeit auf temporär offen stehende Ausgangstüren.

Bild 7.3.3 zeigt die Veränderung des Zuluftvolumenstromes mit der Außentemperatur und der Lage des Brandgeschosses. Wie sich daraus ablesen lässt, steht für Luftverluste durch die Ausgangsschleuse ins Freie der darüber liegende Volumenstrom zur Verfügung.



Bild 7.3.1: Verlauf von Druck und Temperatur (im Winterauslegungsfall) oben: bei Brand über der mittleren Zulufteinführung unten: bei Brand unter der mittleren Zulufteinführung

Verlauf d	es Drucks	s im Trep	penrau	um bei Begir	nn der Brand	llüftung																				
Da	ten:	16 0 %		Autom	arabur (-7.d.	filom nor-	h \				Chatax		11				- 0-1.									
	Ti=	-16,0 °C	<	Ausentemp	eratur (≖∠ulu ratur	ittemperat	tur)				Obeton=	880	J/kg/K	spez. wa	irmekapa	azitāt vo	n Beton	م مائم م				*				
V	711=	26709 m	3/h	nesemter ei	nnehlasener	Volumene	trom			рн	Obeton=	2300	hi ka/m ³	Dichte vo	n Poton	utere b	elonaici	e, ule al	n wai	neaus	stausch	teananan				
Vbra	nd=	0 m	3/h	Luftmenge	die ins Brann	dreschoß	strömt			TAU.	Ahetona	39.5	m²	Betopobe	n pelon afläche i	e Gesci	2085									
Gbra	nd≍	15 "1	5"	das Gescho	in dem Luf	ffentnomm	ien wird				Coins=	1090	J/ka/K	snez Wä	irmekana	azitāt vr	n Gins									
	Pu≠	72.00 P	a	Überdruck u	unten im EG						Doips=	0.0375	m	angenom	mene mi	ittlere G	insdicke	die am	1 Wärn	eaust	ausch t	eilnimmt				
	Po≖	55.00 P	a	Überdruck i	m obersten C	Geschoß				R	HOgips=	1000	ka/m³	Dichte vo	n Gips		npo arone	, ale all	,	100001	4004/11	CHIMAN				
RH	lOi≖	1,20 kg	₃/m³	Luftdichte in	n Gebäude						Agips=	51.5	m²	Gipskarte	onoberfia	che ie (Seschos	s								
RH	Oa≕	1,37 kg	g/m³	Luftdichte a	ußen																					
C	uft= 1(006,00 J <i>i</i>	/kg/K	spez. Wärm	iekapazität d	ler Luft																				
											_															
					ę.					10													q			
		1		8	ver			ு ஜ		aci			1	E		1	1	5	1 1		떡	€ Ì	Ę	=		
			ല	<u>e</u>	4lo	μ	c	h n E G			+ m	sus		Ε				np			- 21	2	Ţ,	76 æ		
		a l	μö		Š	Ę A	õ	ru ag		t oz	ម្លា	စ္ခန္မ		چ چ				ist	온		r B	E A	7	불금		£
SSC		ag	22	2	Ť,	se -	lst	e e e e	Ite	1 20	έ£	Esc 1	1	5 2 2				The second	a a		ra p	žž	,	55	bei 19 Gi	S S S
- Š		L.	ğ	b c	up d	l a b	ŝ	Misen	in the second se	ser -	es It	ų p	{	E E E			1	X S	Le le		a E	Ne Ne	iĝ.	25	20 4	åt2
es		ö	esc	l in the second se	per	- Su nio	as	tt se p	ftq	asi	6 Jo	osti an		es el de		ta l	ett	9 9	ġ	2	Ē	au	E	¥ ŋ	25	- E
		r	G	9.0	0	< ب.	Σ	1533	. <u>.</u> .	≥>	N K	A B		້າຊຸລຸດ		Ň	×	۵æ	×.	¥	1 9	30	- Ē	μ	ň m	10
Nr. Na	ime	<u>m</u>	<u>m</u>	Pa	(0.004)	<u>m²/n</u>	kg/s	<u>°C</u>	kg/m ³	kg/s	m³/h	m³/h	h	<u>m³/s</u>	kg/s		<u>m²</u>	Pa	m²	<u>V/m²/i</u>	<u>_ K</u>		Pa		°C/min	°C/mir
}		May	(77 44	(0,001)											2,10	3,827		91,0	15					Beton	Gips
		Min	imum.	55.00	(0,001)]·····-					+			}	<u>}</u>	457.0				<u> </u>			(00 00 70)	10.100
	1	7 20	3.50	72 00	72.00	20296	7 743	-16.00	1 373	774	1 20206		20206	5 638	7 749	210	summe:	15/.2	01.0	15	5 70	Summe:	140,2	0.0504	(306973)	(6199
2	2	10 70	3 50	69.41	72,00	20200	0.000	-10.21	1 343	7 74	20752		20250	5 765	7 743	2,10	3 827	3 20	91.0	15	1 96	17830	- 0,54	0,0501	0,13	0,7
3	3	14.20	3.50	67.68		0	0,000	-5.36	1 3 1 9	7 743	21136	Č	21136	5 871	7 743	210	3 827	3 26	91.0	- 15	4 08	31749	2 23	0.0501	0.12	0,0
4	4	17.70	3.50	66.64		0	0.000	-1.28	1,299	7 743	21457		21457	5 960	7.743	2 10	3 827	3.31	91.0	15	3 42	26646	2 84	0,0501	0,10 n.09	0,0
5	5	21.20	3.50	66.18		- ol	0.000	2.14	1,283	7 74	21727		21727	6 035	7.743	210	3 827	3 35	91.0	15	2 87	22363	3 34	0,0501	0,03	0,2
6	6	24,70	3,50	66,17		0	0.000	5.01	1,270	7.74	3 21954	Č	21954	6.098	7.743	2.10	3.827	3.39	91.0	15	2.41	18768	3 76	0.0501	0.06	0,0
7	7	28,20	3,50	66,54		0	0,000	7.42	1,259	7.74	22144	C	22144	6,151	7,743	2.10	3.827	3.41	91.0	15	2.02	15751	4.10	0.0501	0.05	0.2
8	8	31,70	3,50	67,22		0	0,000	9,44	1,250	7.743	3 22304	C C	22304	6,196	7,743	2,10	3,827	3,44	91.0	15	1,70	13220	4,38	0.0501	0.04	0.2
9	9	35,20	3,50	68,16		0	0,000	11,14	1,242	7,743	3 22438	0	22438	6,233	7,743	2,10	3,827	3.46	91,0	15	1,42	11095	4,61	0,0501	0,04	0,1
10	10	38,70	3,50	69,31		0	0,000	12,56	1,236	7,743	3 22550	(22550	6,264	7,743	2.10	3,827	3,48	91,0	15	1,20	9311	4,81	0,0501	0,03	0,1
11	11	42,20	3,50	70,64		0	0,000	13,76	1,231	7,74;	3 22645		22645	6,290	7,743	2,10	3,827	3.49	91,0	15	1,00	7815	4,97	0,0501	0,03	i 0,1
12	12	45,70	3,50	72,11		3207	1,223	10,56	1,245	8,966	3 25930	(25930	7,203	8,966	2,10	3,827	4,63	91,0	15	1,32	11952	4,52	0,0432	0,04	Ō, '
13	13	49,20	3,50	72,00	72,00	3207	1,223	8,54	1,254	10,190	29258	(29258	8,127	10,190	2,10	3,827	5,94	91.0	15	1,43	14644	4,22	0,0380	0,05	0,2
14	14	52,70	3,50	70,28		0	0,000	9,97	1,247	10,19	29406	9	29406	8,168	10,190	2,10	3,827	5,97	91,0	15	1,25	12818	4,42	0,0380	0,04	0,2
15-	15	- 56,20	3,50	68,74		0	0,000	11,22	1,242	10,19	29536	ļ	29536	8,205	10,190	2,10	3,827	5,99	91,0	15	1,09	11220	4,60	0,0380	0,04	. 0,
10	10	59,70	3,50	67,34		0	0,000	12,32	1,237	10,19	29650	ļ	29650	8,236	10,190	2,10	3,827	6,02	91,0	15	0,96	9821	4,75	0,0380	0,03	0,
18	18	66 70	3.50	64.02			0,000	13,27	1,233	10,19	J 29/49	<u> </u>	1 29/49	8,264	10,190	$\frac{2.10}{2.10}$	3,827	6.04	91,0	15	0,84	8597	4,88	0,0380	0,03	0,
10	10	70 20	3,50	63.92			0,000	14,11	1,229	10,19	2903/	{}	1 29831	0,288	10,190	2,10	3,82/	6.05	91,0	15	0.73	/525	5,00	0,0380	0,02	0,
20	20	73 70	3.50	67.89			0,000	15 40	1 224	10.19	29913		1 20000	0.009	10,190	1 2,10	1 3,82/	0,07	91.0	10	0.64	600/	5,10	0,0380	0,02	<u> </u>
21	21	77 20	3 50	61 99			0,000	18.05	1 221	10,10	20028	1	1 20025	9 344	40.400	2,10	3,021	6 40	91.0	10	0,00	5/00	5,19	0,0300	0,02	0.0
22	22	80.70	3.50	61,16			0.000	16.54	1210	10.19	0 30080	1	30030	8 358	10,190	$\frac{4}{1}$ $\frac{4}{2}$ 10	1 3,021	6 11	010	16	0,49	4412	5,20	0,0380	0,02	0,0
23	23	84 20	3 50	60.39		0	0.000	16.97	1 217	10.19	0 30134	1	3013/	9 371	10,190	$\frac{2}{210}$	3,02/	611	01 0	15	0,45	2967	5.33	0,0300	0,01	0.0
24	24	87,70	3.50	59.66		0	0.000	17.35	1216	10 19	0 30173		3017	8 381	10 100	1 5 1	3 827	612	010	15	0.30	2285	5 11	0,0300	0,01	<u> </u>
25	25	91,20	3,50	58,97		0	0.000	17.68	1.214	10.19	0 30207		0 30207	8 391	10.190	2 1	3.827	6.13	910	15	0.29	2963	5 48	0.0380	0.01	
26	26	94,70	3,50	58,33		Ō	0,000	17,97	1,213	10,19	0 30237		0 30237	8,399	10,190	2,10	3,827	6,14	91.0	15	0,25	2593	5.52	0.0380	0.01	0.0
27	27	98,20	3,50	57,71		0	0,000	18,22	1,212	10,19	0 30264		0 30264	8,407	10,190	2,1	3,827	6,14	91.0	15	0.22	2270	5,56	0,0380	0.01	0.0
28	28	101,70	3,50	57,13		0	0,000	18,45	1,211	10,19	0 30287	1	0 30287	8.413	10,190	2,1	3,827	6,15	91.0	15	0,19	1987	5,58	0,0380	0,01	0.
29	29	105,20	3,50	56,56		0	0.000	18,64	1,210	10,19	0 30307	1	0 30307	8,419	10,190	2,1	3,827	6,15	91.0	15	0.17	1739	5,61	0,0380	0,01	0,
30	30	108,70	3,50	56,02		0	0,000	18,81	1,210	10,19	0 30324	4	0 30324	1 8,423	10,190	2,1	3,827	6,15	91.0	15	0,15	1523	5.63	0,0380	0,00) 0,0
31	31	112,20	3,50	55,50		0	0,000	18,96	1,209	10.19	0 30340	ų	0 30340	8,428	10,190	2,1	3,827	6,16	91.0	15	0,13	1333	5,65	0,0380	0,00) 0,0
32	32	115,70		55,00	55.00	00	0,000	0 <u>1 19,09</u>	1,209	10,19	0 30353	31 1	0 30353	3 8,431	1 10,190)	1				1				1	

 Tabelle 7.3.1:
 Berechnungstabelle zu Bild 7.3.1, obere Hälfte

UNIV.-PROF. DR.-ING. DIETER OSTERTAG

18



Bild 7.3.2: Verlauf des Druckes bei beliebiger Lage des Brandgeschosses und offenen Schleusentüren bei 18000 m³/h Abströmung ins Brandgeschoss (Winterauslegungsfall)



Bild 7.3.3: Veränderung des Zuluftvolumenstromes mit der Außentemperatur und der Lage des Brandgeschosses

7.4 Einsatzgrenzen

Wie die Abschnitte 7.2 und 7.3 wenigstens ausschnittsweise zeigen konnten, kann die Überdruckbelüftung mit Thermik-Kompensation *alle* Anforderungen der Hochhausrichtlinien unter allen Witterungsbedingungen erfüllen, in mehrstufiger Ausführung für jede denkbare Höhe.

Die Überdruckbelüftung mit Thermik-Kompensation ist also eine überlegene Lösung, technisch uneingeschränkt für alle Anwendungsfälle geeignet, perfekt, nur eben auch aufwendig und deshalb teuer.

Dort, wo der sog. "Sicherheitstreppenraum" mit herkömmlicher Einfachtechnik im Brandfall zum gegebenenfalls tödlichen Risiko wird, dürfen die Mehrkosten für eine Technik, die den Treppenraum erst zum wirklich sicheren Rettungsweg macht, auch dann kein Hinderungsgrund sein, wenn sie z.B. 20 oder 25 % der Baukosten des Treppenraumes ausmachen. Schließlich wird der gesamte Treppenraum letztlich nur für diesen Brandfall gebaut. Für große Gebäudehöhen gibt es z.Zt. keine gleichwertige Alternative.

8 Einfachere, kostengünstigere Lösungen für geringere Gebäudehöhen

Für geringere Gebäudehöhen, wo die Thermik geringer und auch das allgemeine Risiko niedriger einzustufen ist (geringere Personenzahl, kürzere Fluchtwege, kürzere Verweildauer im Treppenraum) können andere Maßstäbe angelegt werden, wenn einfachere Lösungen nach Prüfung noch ausreichende Sicherheit versprechen.

Abschnitt 7 hat gezeigt, dass selbst bei optimaler Regelstrategie 60 m Gebäudehöhe die vernünftige Obergrenze für eine "einstufige" Behandlung des Treppenraumes sind. Einstufig heißt hier, dass nur *eine* Zuluft mit Druckregelung (und Druckregelung auf der Fortluftseite) vorhanden ist.

Diese "Einstufigkeit" ist typisch für alle Einfachlösungen, so dass es nur darum gehen kann, welche einfacheren Alternativen *unterhalb* dieser 60 m-Grenze in Frage kommen.

Für diese Schnittstelle spricht u.a. auch die mit zunehmender Höhe durch steigenden Windeinfluss kritischer werdende Empfindlichkeit hilfskraftlos geregelter Überdruckklappen am Kopf des Treppenraumes.

Neben der bekannten Einfach-Technik der ungeregelten Zulufteinführung in Verbindung mit druckregelnden Klappen am Kopf des Treppenraumes kommt hier eine Technik in Frage, die mittlerweile am Markt ist, nämlich die der variablen Zugluft-Einführung über einen Ventilator, der durch hilfskraftlos geregelte Bypassklappen einen vorbestimmten Differenzdruck am Fuß des Treppenraumes erzeugt. Diese Lösung ist bei richtiger Dimensionierung ebenfalls in der Lage, einen durch Thermik "gezogenen", erhöhten Volumenstrom zur Verfügung zu stellen und dadurch in gewissem Umfang Thermik-Kompensation zu betreiben, auch wenn das dem Schöpfer dieser Lösung vielleicht nicht bewusst war: Der Hersteller bietet diesen Zulüfter nämlich mit dem expliziten Vorschlag an, den Lüfter *ohne Fortluftklappe* am Kopf des Treppenraumes, aber mit Abströmöffnungen in den Geschossen ins Freie zu kombinieren. Die Bypassklappen haben dann nur schaltende Funktion: "zu" bei offenen Schleusentüren, d.h. Zuluft "ein", "auf" bei geschlossenen Schleusentüren, d.h. Zuluft "ein", "auf" bei geschlossenen Schleusentüren, d.h. Zuluft "ein", "zweit-Aufgabe", gegebenenfalls in den Treppenraum eingetragenen Rauch nach oben auszuspülen, wird so nicht erfüllt!

Technisch interessant wäre theoretisch aber die Kombination mit einer druckregelnden Fortluftklappe. Ob dabei freilich die Bypassklappen ausreichend *stetig* funktionieren, d.h., bei variierendem Zuluftvolumenstrom den Überdruck unten ausreichend konstant halten, muss bezweifelt werden. Das ausreichende Zusammenwirken beider Regelungen unten und oben trotz der außerordentlich harten Störgrößen-Sprünge: Türen auf/Türen zu dürfte wohl kaum mit hilfskraftlosen, einfachen Regelungen erreichbar sein. Die elektronische Messwertverarbeitung, z.B. in Verbindung mit pneumatischen Stellgliedern, bietet hier ungleich weiter reichende Möglichkeiten (am Rande sei erwähnt, dass bei einem weiteren Hochhaus-Neubau die Umsetzung der Regelungsaufgaben mit Frequenzumrichter-gesteuerten Ventilatoren erfolgen wird, die der hohen Anforderungen wegen auch im generatorischen Betrieb gefahren werden können).

Einfachlösungen für die variable Zuluftregelung in Verbindung mit einer Abluft-Druckregelung sind derzeit am Markt nicht verfügbar und werden es wohl auch in Zukunft kaum sein.

Ein weiterer, die Einsatzgrenzen des üblichen Systems erweiternder Schritt wäre es, eine Fortluftklappe mit einem abhängig von der Außentemperatur gesteuerten Sollwert einzusetzen. Da es sich bei dieser Sollwertverstellung um einen langsam ablaufenden Vorgang handelt, spielen Probleme der Regeldynamik keine Rolle. Entsprechende Druckregelklappen mit elektronischer Sollwertverstellung sind am Markt erhältlich. Zu denken wäre aber auch an eine einfache, z.B. elektromechanische Verstelleinrichtung, unter Umständen sogar an eine hilfskraftlos arbeitende Steuerung z.B. mit Kältemittelzylinder.

Im Folgenden soll untersucht werden, in welchem Umfang eine solche Einfachanlage bei der Grenzhöhe von 60 m die Anforderungen der Hochhausrichtlinien erfüllen kann.

Im Sommer-Auslegungsfall muss der obere Überdruck-Sollwert p_o niedrig gehalten werden, da ohne Abströmung ins Brandgeschoss oder auch bei ganz oben gelegenem Brandgeschoss, also vollständiger Durchströmung des Treppenraumes der Überdruck nach unten durch Reibungsdruckverluste und umgekehrte Restthermik immer größer wird.

Ist z.B. die Geschosshöhe 3,50 m, der Treppenraum eng ($A_{eff} \approx 2,0$ m²), dann beträgt der Reibungs-Druckverlust bei 18000 m³/h und $\rho = 1,20$ kg/m³

$$\Delta p_R = \frac{\rho}{2} \cdot \left(\frac{\dot{V}_L}{A_{eff}}\right)^2 \cdot \frac{60}{3.5} = 64.3 \,\mathrm{Pa}$$

Die Restthermik ergibt sich aus Bild 4.2.5.5 für 60 m Gebäudehöhe zu etwa

$$\Delta p_{Th.5} \approx \frac{54.1}{3} \approx 18 \,\mathrm{Pa} \; .$$

Wird der obere Sollwert im Sommer-Auslegungsfall auf das Minimum eingestellt, das zur Abführung der Luft bzw. der Brandgase ins Freie notwendig ist, dann wären dort 25 Pa anzunehmen. Der Überdruck unten würde dann

betragen und damit die zulässige Obergrenze wesentlich überschreiten. Ein durchlässigerer Treppenraum mit z.B. $A_{eff} = 2,83 \text{ m}^2$ würde nur den halben Druckverlust durch Reibung bringen und damit die 75 Pa – Grenze gerade einhalten lassen.

Im Winter-Auslegungsfall muss der obere Soll-Überdruckwert möglichst hoch angesetzt werden, um dann trotz intensiver Druckgewinne durch Thermik den Überdruck unten noch so weit über "Null" zu halten, dass bei Brand ganz unten wenigstens der Großteil der zugeführten Luft tatsächlich durch die offenen Schleusen des Brandgeschosses strömt.

Liegt der Treppenraum-Überdruck im Brandgeschoss niedriger als 25 Pa über dem Außendruck, dann wird ein Teil der Luft nicht ins Brandgeschoss abströmen, sondern nach oben zum Kopf weiterströmen. Es wird sich ein Gleichgewichtszustand einstellen, bei dem der gesamte Druckverlust nach oben gleich dem der Abströmung ins Brandgeschoss und schließlich ins Freie ist.

Dabei spielen wiederum die thermischen Druckgewinne bei der Durchströmung des Treppenraumes bis zum Kopf eine wesentliche Rolle, jetzt aber bei wesentlich niedrigeren, erst noch zu bestimmenden Luftleistungen.

Bild 4.2.5.5 gibt die Restthermik für 18000 m³/h an. Bei niedrigeren Luftleistungen liegt die Restthermik $\Delta p_{Th,5}$ natürlich höher, nämlich zwischen Ruhethermik und Restthermik in Bild 4.2.5.5.

Für die Ermittlung wurde der α - Wert von 12,5 (bei konstanter Wandtemperatur) modifiziert entsprechend

$$\alpha = 4 + \frac{\dot{V}}{18000} \cdot 8,5$$

d.h., in einen festen und einen volumenstrom-proportionalen Anteil zerlegt und damit die Restthermik berechnet. Damit konnte durch Iteration der Gleichgewichtszustand mit seiner Luftstromaufteilung bestimmt werden.

Werden 75 Pa Überdruck bei Außentemperaturen von 0°C und darunter (also Frost) konstant eingestellt, dann erhält man bei -10°C und Brand ganz unten beim weiten Treppenraum (2,83 m²) ca. 29 % Luftmenge, die *nicht* ins Brandgeschoss, sondern nach oben strömt. Bei 0°C ist dieser Anteil auf ca. 5 % zurückgegangen. Bei positiven Außentemperaturen tritt diese unerwünschte Abströmung nach oben praktisch nicht mehr auf.

Es müssen also temporär gewisse Abstriche in der zur Schleusen-Durchspülung zur Verfügung stehenden Luftleistung hingenommen werden. Dazu muss man sich freilich vor Augen halten, dass ein solcher Missstand derzeit (im Allgemeinen *keine* Abströmöffnungen aus dem Brandgeschoss) in krasser Weise *die Regel* ist. Hier soll ganz sicher nicht die gängige Praxis des Abgleitenlassens einer Überdruckbelüftung in eine Treppenhauslüftung das Wort geredet werden. Da im gerechneten Beispiel die notwendigen Einschränkungen bezüglich der Schleusendurchspülung jedoch nur relativ selten und dann noch von geringer Höhe sind, ist diese Lösung der Anlage

- mit konstanter Zuluftmenge und
- Abluft-Überdruckklappe mit außentemperaturabhängig gesteuertem Überdruck-Sollwert
- bei einem durchlässigen Treppenraum (A_{eff} mind. 2,8 m²)
- bis max. 60 m Höhe

sicher eine empfehlenswerte, weil besonders wirtschaftliche Lösung, die die Anforderungen der Hochhausrichtlinie *weitgehend* erfüllt. Die durchgeführten Berechnungen (Tabelle 8.1) zeigen aber deutlich, dass mit 60 m Höhe die Möglichkeiten dieses einfachen Anlagentyps wirklich ausgereizt sind.

Außentemperatur	ϑ_a	°C	-16	-10	± 0	10	20	30
Volle Durchströmung								
Sollwert	p_{0}	Pa	75	75	75	58	42	25
Reibung	Δp_R	Ра	32	32	32	32	32	32
Thermik	$\Delta p_{Th,5}$	Pa	-65	-54	-36	-18	0	18

42

53

71

72

74

75

Pa

Unterste Schleuse offen

Überdruck unten

Reibung	Δp_R	Pa	6	3	0
Thermik	Ap _{Th,5}	Ра	-73	-65	-52
Überdruck unten	p _u	Pa	8	13	23
Volumenstrom nach oben	V ↑	%	43	29	5
Vol. ins Brandgeschoss	\dot{V}_{ab}	%	57	71	95
	p_{ab}	Pa	8	13	23

Tabelle 8.1: Druckverhältnisse

bei: 60 m Höhe $A_{eff} = 2,83 \text{ m}^2$ $\dot{V} = 18000 \text{ m}^3/\text{h}$

Anmerkung:

Die Reibungsdruckverluste wurden hier vereinfachend mit 18000 m³/h und $\rho = 1,20$ kg/m³ berechnet. Die für eine Beurteilung wichtigen Ergebnisse (Sommerfall und Winter mit Brand unten) werden hierdurch praktisch nicht beeinflusst.

9 Lüftung innenliegender Treppenräume (nicht: Sicherheitstreppenräume)

Innenliegende Treppenräume ohne die Anforderungen der Hochhausrichtlinie an Sicherheitstreppenräume sind eigentlich nicht Gegenstand dieser Arbeit, die sich mit Sicherheitstreppenräumen beschäftigt.

Es erscheint dennoch naheliegend, solche Treppenräume mit zu behandeln. Nach der Hochhausrichtlinie sind solche Treppenräume nur bis 60 m zulässig, darüber greifen in jedem Fall die Anforderungen der intensiven Schleusendurchspülung zur Rückhaltung von Brandrauch.

Innenliegende Treppenräume brauchen also keine Abströmöffnungen aus den Geschossen ins Freie, da nur die Treppenraum-Durchlüftung (zur Entfernung eingetragenen Rauches) verlangt wird.

Angesichts der immer mindestens 2 innenliegenden Treppenräumen und der Höhenbegrenzung auf 60 m erscheint das als noch akzeptabel, wobei man sich keine Illusionen über eine rasche und vollständige Entfernung einmal eingetragenen Rauches machen sollte. Hohe Luftleistung verbessert die Situation und kostet bei einfacher Technik, die hier reicht, recht wenig. Von daher spricht einiges dafür, die in Sicherheitstreppenräumen geforderte Luftleistung (im Allgemeinen 18000 m³/h) auch hier einzusetzen.

Im Gegensatz zu Überdruckbelüftungsanlagen ist es hier nicht nötig, überall mindestens 25 Pa Überdruck einzuhalten. Es genügt die zuverlässige Vermeidung von Unterdruck bei vollständiger Durchströmung. Dennoch ist auch hier, bei 60 m Gebäudehöhe, die Einfachanlage mit konstantem Zuluftvolumenstrom und Abluftklappe mit *festem* Sollwert am Ende ihrer Möglichkeiten angelangt, wie Tabelle 9.1 zeigt. Die Druckwerte unten variieren fast über das volle Toleranzband 0 bis 75 Pa.

Außentemperatur	ϑ_a	°C	-10	+20	+30
Sollwert	p_0	Pa	25	25	25
Reibung	Δp_R	Pa	ca. 38	32	ca. 30
Thermik	Ap _{Th.5}	Pa	-54	0	+18
Überdruck unten	p _u	Pa	9	57	73

Tabelle 9.1: Druckverhältnisse

bei: 60 m Höhe $A_{eff} = 2,83 \text{ m}^2$ $\dot{V} = 18000 \text{ m}^3/\text{h}$

10 Empfehlungen für bauaufsichtliche Richtlinien

Aus den voran gegangenen Kapiteln lassen sich die folgenden Empfehlungen für die notwendige Überarbeitung der Hochhausrichtlinien ableiten. Dabei wurden auch Maßnahmen aufgenommen, die bisher in den Hochhausrichtlinien nicht enthalten waren, aber für die Druckverhältnisse im Brandfall und damit die Sicherheit relevant sind.

Im Folgenden sind in der ersten Spalte – soweit Abschnitte der noch geltenden Hochhausrichtlinien betroffen sind - die Abschnitts-Ziffern genannt. Am rechten Rand sind die Abschnitte der vorliegenden Arbeit angegeben, die sich vorrangig mit dem im mittleren Textfeld angesprochenen Sachverhalt beschäftigen. Zitate der noch geltenden Hochhausrichtlinien sind durch Kursivschrift gekennzeichnet.

3.6.1.1 In Hochhäusern sind mindestens zwei Treppen oder eine Treppe in einem Sicherheitstreppenraum notwendig. Ist nur ein Sicherheitstreppenraum vorhanden, muss er an einer Außenwand liegen. Bei mehr als 60 m Höhe müssen alle notwendigen Treppen in Sicherheitstreppenräumen liegen.

Satz 2 (Lage an Außenwand) sollte gestrichen werden, da sicherheitstechnisch nicht günstiger einzustufen.

- 3.6.2.2 *Treppenläufe und Podeste müssen geschlossen und feuerbeständig sein.* Die Notwendigkeit dieser Forderung sollte nochmals überdacht werden.
- 3.6.2.4 Treppenräume müssen an ihrer obersten Stelle eine Rauchabzugsöffnung haben.
 6.6 Ihre Fläche muss mindestens 5% der Grundfläche des zugehörigen Treppenraumes, mindestens aber 1 m² groß sein. Sie muss in jedem Geschoss bedient werden können.

Dieser Absatz ist wegen akuter Gefahren durch Thermik ersatzlos zu streichen. Die Funktion der RWA-Öffnung kann durch die Treppenraum-Durchlüftung besser und sicherer mit übernommen werden.

3.6.3.3 Lüftung innenliegender Treppenräume.

Im Brandfall muss der Treppenraum mit mindestens 10000 m³/h Luft von unten nach oben durchspült werden. Der Überdruck gegenüber der Atmosphäre darf 50 Pa nicht überschreiten. Die Treppenläufe dürfen im Treppenraum nicht durch Wände oder Schächte voneinander getrennt werden.

Satz 1: Statt 10000 m³/h sollten 18000 m³/h aufgenommen werden.

Satz 2: Statt 50 Pa müssen 75 Pa zugelassen werden. Zusätzlich sollte aufgenommen werden: "die Türschließer dürfen max. 30 N Schließkraft ausüben".

Satz 3: Der Luftwiderstand des Treppenraumes wird entgegen bisherigen Vermutungen durch eine die Läufe trennende Wand nicht wesentlich erhöht. Notwendig ist aber eine *Erniedrigung* des Widerstandes bzw. eine Erhöhung der Durchlässigkeit.

Satz 3 sollte also ersetzt werden z.B. durch:

"Das Treppenauge muss mindestens 350 mm breit sein, oder es muss durch andere Maßnahmen eine gleichwertige Erhöhung der Durchlässigkeit für den vertikalen Luftstrom erreicht werden". 9

3.6.7 Sicherheitstreppenräume

und

- 3.6.8 Die gesamten Abschnitte, die außenliegende Sicherheitstreppenräume und solche in einem Schacht ("Firetower") behandeln, sollten ersatzlos gestrichen werden, da sie nicht mehr dem Stand der Technik entsprechen und heute als antiquiert einzustufen sind. Innenliegende Treppenräume, geschützt durch wirklich durchdachte – und nachzuweisende – Lufttechnik sind wenigstens ebenso sicher und lassen in mehrfacher Hinsicht organischere und wirtschaftlichere Grundrisse zu.
- 3.6.9.1 Der Zugang zum Sicherheitstreppenraum von den Geschossen her bedarf keiner Veränderung.

Neu sollten an dieser Stelle (bei den baulichen Anforderungen) folgende Inhalte aufgenommen werden:

"Die Treppenräume müssen aus dem Gebäude heraus über feuerbeständig von anderen Bereichen getrennte Wege ins Freie führen. Diese Ausgänge müssen über Schleusen führen, deren Türen mit besonderen Türschließern versehen werden, die gegen 50 Pa Druckdifferenz in der Lage sind, die Türen zu schließen.

Der Ausgang aus dem Erdgeschoss ist anderweitig, also nicht über die Treppenräume und ihre Ausgänge zu führen.

Untergeschosse dürfen nicht an diese Treppenräume der Obergeschosse angeschlossen werden.

Die Sicherheit der Rettungswege ist im Brandfall durch thermische Auftriebswirkungen bedroht. Es ist deshalb notwendig, alle vertikalen Rauchübertragungswege möglichst weitgehend zu eliminieren, also

- die Aufzüge durch im Brandfall selbsttätig schließende Türen (Vorraum, zugänglich über feuerwiderstandsfähige und rauchdichte Tür) vom Luftraum der Geschosse zu trennen,
- die Elektro-Steigschächte in jedem Geschoss in Deckenebene mit zugelassenen Kabelschotts abzuschotten,
- die Steigschächte für Heizung, Klima und Sanitär wenigstens alle 30 m rauchdicht abzuschotten. Zugänge und Revisionsöffnungen sind in feuerwiderstandsfähiger und rauchdichter Ausführung vorzusehen.
- Die Brandschutzklappen in den geschossweisen Abgängen zentraler lufttechnischer Anlagen (auch z.B. WC-Abluft) sind im Brandfall zu schließen (Motorantrieb)".
- 3.6.9.2 Jeder Treppenraum mit den zugehörigen Sicherheitsschleusen muss eine eigene Lüftungsanlage haben. Der Treppenraum muss mit seinen Zugängen und der Lüftungsanlage so beschaffen sein, dass Feuer und Rauch nicht in ihn eindringen können.

Dieser Abschnitt bedarf keiner Veränderung. Wichtig ist im Hinblick auf die Druckverhältnisse, dass die Sicherheitsschleusen nicht durch eine *andere* Lüftungsanlage geschützt werden.

3.6.9.3 Die Leistungsbemessung nach der Seeger`schen Formel (Gleichung 2.2.1) sollte, unabhängig vom Vorhandensein einer Sprinklerung, beibehalten werden.

4.1

Es sollte aber ergänzt werden:

"Die Überdruckbelüftung ist so zu planen und zu dimensionieren, dass bei allen Außentemperaturen der vorgenannte Luftvolumenstrom in jedem beliebigen Geschoss zur Verfügung steht. Dabei darf der Überdruck gegenüber der Atmosphäre 25 Pa nicht unterschreiten. Diese Leistungsdaten sind unter Berücksichtigung der thermischen Auftriebskräfte und der Reibungsdruckverluste der Luft im Treppenraum mit dem Bauantrag nachzuweisen."

3.6.9.4 Dieser Abschnitt, der die Frage der Abströmung der Rauchgase aus dem Brandraum ins Freie zwar behandelt, aber zu vage bleibt, sollte vollständig ersetzt werden durch z.B. folgenden Text:

> "Für die Abströmung der Brandgase ins Freie sind in jedem Geschoss Außenöffnungen vorzusehen, die luftraummäßig mit der geschossseitigen Schleusentür in offener Verbindung stehen müssen. Diese Öffnungen müssen je Treppenraum einen geometrisch freien Mindestquerschnitt von 1,5 m² haben. Hierzu können natürlich Fenster verwendet werden, die bei Brandmeldung (nur im Brandgeschoss) automatisch motorisch aufgefahren werden.

Um den Einfluss eventuell starken Windanfalls abzumildern, sollte der genannte Querschnitt auf mindestens 2 Teilquerschnitte in entgegengesetzten Fassadenrichtungen aufgeteilt werden (noch besser: mehr Teilquerschnitte, aufgeteilt auf alle Fassadenrichtungen).

Die notwendige luftraummäßig offene Verbindung zu den Schleusen kann bei inneren Unterteilungen, die nicht feuerwiderstandsfähig zu sein brauchen (400 m²-Regel) durch die Freigabe von Türen (z.B. magnetische Türöffner) oder auch Öffnungen im Über-Kopf-Bereich erreicht werden.

Die sich öffnenden Fenster können auch durch *horizontale* Kanäle von der Schleuse zur Fassade, gegebenenfalls in feuerwiderstandsfähiger Ausführung, ersetzt werden. Dann müssen aber Querschnitte und strömungsgünstige Ausbildung der Kanäle dafür sorgen, dass der Luftwiderstand den des 1,5 m² großen Fensters nicht übersteigt".

3.6.9.5 Der Text sollte wie folgt geändert werden:

"Auf keiner Tür darf ein höherer Differenzdruck als 75 Pa auftreten. Die Türschließer dürfen eine Schließkraft von maximal 30 N ausüben".

3.6.9.6 Die Überdruckbelüftung muss über Rauchmelder in jedem Geschoss bzw. Sammel-Brandmeldung automatisch in Betrieb gehen und darf erst nach gezielter Abschaltung durch die Feuerwehr außer Betrieb gehen.

Weiter sollte ergänzt werden:

"Bei Höhen bis 60 m genügt die Zulufteinführung am Fuß des Treppenraumes (im 1.OG, *nicht* im Erdgeschoss) in Verbindung mit einer Überdruckklappe am Kopf des Treppenraumes, deren Überdruck-Sollwert jedoch außentemperaturabhängig verschoben werden muss (75 Pa bei Temperaturen unter 0°C, darüber bis 30°C linear abnehmend bis 25 Pa).

Bei Höhen über 60 m müssen Überdruckbelüftungsanlagen mit Thermik-Kom- 7 pensation mit

• variablem Zuluft-Volumenstrom mit Regelung des Druckes am Fuß des Treppenraumes und

• Abluft-Regelklappe mit Regelung des Druckes am Kopf des Treppenraumes mit außentemperaturabhängiger Sollwert-Verschiebung

eingesetzt werden. Die Regelung ist mit elektronischer Messwertverarbeitung auszuführen. Bezüglich der Funktionssicherheit muss sie der Anforderungsklasse 3 nach DIN V 19250 bzw. 19251 entsprechen.

Bei Höhen über 90 m gelten die Anforderungen über 60 m. Zusätzlich sind die Anlagen redundant auszuführen".

München, im Dezember 2002 Univ.-Prof. Dr.-Ing. D. Ostertag Dipl.-Ing. Univ. J. Kuhn Dipl.-Ing. Univ. J. Zitzelsberger 92

•

Bauforschung für die Praxis

Brandschutzkosten im Wohnungsbau Karl Deters

Band 59, 2001, 245 S., Abb.,Tab., kart., ISBN 3-8167-4258-0 € 50,- | sFr 86,-

- □ Gemeinschaftliches Wohnen im Alter R. Weeber, G. Wölfle, V. Rösner Band 58, 2001, 175 S., Abb., Tab., kart., ISBN 3-8167-4257-2 € 46,- | sFr 79,-
- □ Entwicklung eines Bewertungssystems für ökonomisches und ökologisches Bauen und gesundes Wohnen
 C.J. Diederichs, P. Getto, S. Streck
 Band 57, 2002, 230 S., mit CD-ROM, Abb., Tab., kart., ISBN 3-8167-4256-4
 € 50,- | sFr 86,-

Vergabeverfahren und Baukosten

Hannes Weeber, Simone Bosch Band 56, 2001, 192 S., Abb., Tab., kart., ISBN 3-8167-4255-6 € 50,- | sFr 86,-

Konzepte f ür die praxisorientierte Instandhaltungsplanung im Wohnungsbau Ralf Spilker, Rainer Oswald

Raif Spiker, Rainer Oswald Band 55, 2000, 71 S., 5 Abb., zahlr. Tab., kart., ISBN 3-8167-4254-8 € 22,–| sFr 39,50

 Bewährung innen wärmegedämmter Fachwerkbauten Problemstellung und daraus abgeleitete Konstruktionsempfehlungen Reinhard Lamers, Daniel Rosenzweig, Ruth Abel

Band 54, 2000, 173 S., 123 Abb., kart., ISBN 3-8167-4253-X € 25,– | sFr 44,–

Überprüfbarkeit und Nachbesserbarkeit von Bauteilen - untersucht am Beispiel der genutzten Flachdächer

Rainer Oswald, Ralf Spilker, Klaus Wilmes Band 53, 1999, 133 S., 49 Abb., 4 Tab., kart., ISBN 3-8167-4252-1 € 37,– | sFr 63,–

Bauschadensfibel f ür den privaten Bauherrn und Hausk äufer

Rainer Oswald, Ruth Abel, Volker Schnapauff Band 52, 1999, 140 S., 19 Abb., 3 Tab., fester Einband, ISBN 3-8167-4251-3 \in 25,– | sFr 44,–

Balkone, kostengünstig und funktionsgerecht

Hannes Weeber, Margit Lindner Band 51, 1999, 146 S., 102 Abb., 26 Tab., kart., ISBN 3-8167-4250-5 € 38,– | sFr 65,–

Kostenfaktor Erschließungsanlagen

Hannes Weeber, Michael Rees Band 50, 1999, 226 S., 107 Abb., 15 Tab., kart., ISBN 3-8167-4249-1 € 50,– | sFr 86,–

🗌 Eigenleistung beim Bauen

Wie Eigentümer und Mieter sich am Bau ihrer

Wohnung beteiligen können

R. Weeber, H. Weeber, S. Kleebaur, H. Gerth, W. Pohrt Band 49, 1999, 154 S., 25 Abb., 12 Tab., ISBN 3-8167-4248-3 € 22,- | sFr 39,50

☐ Kosteneinsparung durch Bauzeitverkürzung Barbara Bredenbals, Heinz Hullmann Band 48, 1999, 174 S, 38 Abb, 36 Ti

Band 48, 1999, 174 S., 38 Abb., 36 Tab., ISBN 3-8167-4247-5 € 37,- | sFr 64,-

Das wärme- und feuchteschutztechnische Verhalten von stählernen Fassadendurchdringungen

Lutz Franke, Gernod Deckelmann Band 47, 1998, 74 S., 38 Abb., 13 Tab., kart., ISBN 3-8167-4246-7 € 15,– | sFr 26,–

Kostengünstige bauliche Ma ßnahmen zur Reduzierung des Energieverbrauchs im Wohnungsbestand

R. Oswald, R. Lamers, V. Schnapauff, R. Spilker, K. Wilmes Band 46, 1998, 100 S., 57 Abb., kart. ISBN 3-8167-4245-9 € 17,– | sFr 30,50

Sicherung des baulichen Holzschutzes Horst Schulze

Band 45, 1998, 168 S., 136 Abb., 10 Tab., kart., ISBN 3-8167-4244-0 € 22,- | sFr 39,50

Luftdichtigkeit von industriell errichteten Wohngebäuden in den neuen Bundesländern Wolfgang Richter, Dirk Reichel

Wolfgang Richter, Dirk Reichel Band 44, 1998, 88 S., 34 Abb., 15 Tab., kart., ISBN 3-8167-4243-2 € 15,– | sFr 26,–

Leitfaden Kostendämpfung im Geschoßwohnungsbau

Karl Deters, Joachim Arlt Band 43, 1998, 162 S., 135 Abb., 34 Tab., kart., ISBN 3-8167-4242-4 € 22,- | sFr 39,50

□ Langzeitbewährung und Entwicklungstendenzen von Kunststoff-Bau produkten im Wohnungsbau Dieter Arlt, Rainer Weltring Band 42, 1998, 137 S., 90 Abb., 7 Graph., kart., ISBN 3-8167-4241-6

€ 20,- | sFr 35,-

Ausschreibungshilfen für recyclinggerechte Wohnbauten Barbara Bredenbals, Wolfgang Willkom

Barbara Bredenbals, Wolfgang Willkomm Band 41, 1998, 172 S., 28 Abb., kart. ISBN 3-8167-4240-8 € 22,- | sFr 39,50

🗌 Gebrauchsanweisung für Häuser

Volker Schnapauff, Silke Richter-Engel Band 40, 1997, 116 S., 4 Abb., 7 Tab., kart., ISBN 3-8167-4239-4 € 19,– | sFr 34,–

Fraunhofer IRB Verlag

Ergänzender Neubau in bestehenden Wohnsiedlungen

H. Weeber, R. Weeber, M. Lindner, u. a. Band 39, 1997, 194 S., 230 Abb., kart., ISBN 3-8167-4238-6 € 25,- | sFr 44,-

Lüftung in industriell errichteten
 Wohnhäusern
 Wilfried Jank
 Band 37, 1997, 66 S., 17 Abb., 12 Tab.,

Band 37, 1997, 66 S., 17 Abb., 12 Iab., 13 Tafeln, kart., ISBN 3-8167-4236-X € 15,– | sFr 26,–

Auswirkungen der neuen Wärmeschutzverordnung auf den Schallschutz von Gebäuden Siegfried Koch, Werner Scholl Band 36, 1997, 72 S., 33 Abb., 2 Tab., kart.,

Band 36, 1997, 72 S., 33 Abb., 2 Tab., kar ISBN 3-8167- 4235-1 € 15,– | sFr 26,–

□ Baukostensenkung durch gesicherte Schadensbeurteilung an haufwerksporigen Leichtbetonelementen der industriell errichteten Wohnbauten der ehemaligen DDR Mirko Neumann, Mathias Reuschel Band 35, 1997, 320 S., 227 Abb., 105 Tab., kart., ISBN 3-8167-4234-3 € 41,- | sFr 70,-

□ Verhinderung von Emissionen aus Baustoffen durch Beschichtungen Lutz Franke, Martin Wesselmann Band 34, 1997, 68 S., 11 Abb., 9 Tab., kart., ISBN 3-8167-4233-5 € 15,- | sFr 26,-

□ Wärmedämmverbundsysteme (WDVS) im Wohnungsbau Institut für Bauforschung e.V., Hannover Band 32, 1997, 250 S., 128 Abb., 20 Tab., kart., ISBN 3-8167-4231-9 € 30,- | sFr 51,50

BESTELLSCHEIN

- Titel ankreuzen und im Umschlag oder
- per Fax (07 11) 970 25 08 oder -25 07
- senden an:

Fraunhofer IRB Verlag

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau IRB

- Postfach 80 04 69, D-70504 Stuttgart
- Telefon (07 11) 970 2500
- E-Mail: info@irb.fhg.de
- URL: http://www.IRBbuch.de

Absender	•••
----------	-----

8		
8		Ð
8		- ĉ
8		ge
8		zei
¥		An
×	Straße/PE	÷
×		Ë
X		le ■
×	PLZ/Ort	P.
X		Bf
×	Datum	2
8		8
8		2/2
8	Unterschrift	0

Niedrigenergiehäuser unter Verwendung des Dämmstoffes Styropor

Teil 1, Konstruktionsempfehlungen und optimierte Anschlußsituationen (Details) W.-H. Pohl, S. Horschler, R. Pohl Teil 2, Quantitative Darstellung der Wirkung von Wärmebrücken Gerd Hauser, Horst Stiegel Band 31, 1997, 294 S., 169 Abb., kart., ISBN 3-8167-4230-0 € 14,- | sFr 25,-

□ Fenster - Sanierung und Modernisierung Hans-Rudolf Neumann Band 30, 1997, 134 S., 90 Abb., 11 Tab., kart., ISBN 3-8167-4229-7 € 20,- | sFr 35,-

Schäden an nicht industriell hergestellten Wohnbauten der neuen Bundesländer R. Oswald, R. Spilker, V. Schnapauff, u. a. Band 29, 1996, 116 S., 66 Abb., 30 Tab., kart., ISBN 3-8167-4228-9 € 17,- | SFr 30,50

Parkierungsanlagen im verdichteten Wohnungsbau

Hannes Weeber, Rotraut Weeber Band 28, 1997, 156 S., 60 Abb., 28 Tab., kart., ISBN 3-8167-4227-0 € 22,- | sFr 39,50

Möglichkeiten der Einsparung von Wohnkosten durch Mieterbeteiligung M. Elff, K. Goldt, B. Harms, u. a. Band 27, 1997, 157 S., 3 Abb., 8 Tab., kart., ISBN 3-8167-4226-2 € 22,- | sFr 39,50

Die Berechnung von Flachdecken über Zustands- und Einflußflächen Max Baerschneider Band 26, 1996, 380 S., 196 Tab., kart., zweibändig, ISBN 3-8167-4225-4 € 49,- | sFr 83,50

□ Feuchtetransportvorgänge in Stein und Mauerwerk - Messung und Berechnung M. Krus, H.-M. Künzel, K. Kießl Band 25, 1996, 75 S., 31 Abb., 2 Tab., kart., ISBN 3-8167-4224-6 € 15,- | sFr 26,-

Wohngebäudesanierung und Privatisierung

Hannes Weeber, Michael Rees Band 24, 1996, 107 S., 51 Abb., 17 Tab., kart., ISBN 3-8167-4223-8 € 20,– | sFr 35,–

Der Feuchtehaushalt von Holz-Fachwerkwänden

Helmut Künzel Band 23, 1996, 85 S., 32 Abb., 10 Tab., kart., ISBN 3-8167-4222-X € 15,– | sFr 26,–

Neue Konstruktionsalternativen für recyclingfähige Wohngebäude Barbara Bredenbals, Wolfgang Willkomm Band 22, 1996, 110 S., 26 Abb., 3 Tab., kart., ISBN 3-8167-4221-1

ISBN 3-8167-4221-1 € 17,-|sFr 30,50

Standsicherheit der Wohnbauten in Fertigteilbauweise in den neuen Bundesländern E. Cziesielski, N. Fouad, F.-U. Vogdt Band 21, 1996, 226 S., 71 Abb., kart., ISBN 3-8167-4220-3 € 30,- | sFr 51,50

□ Sicherheit von Glasfassaden
 X. Shen, H. Techen, J. D. Wörner
 Band 20, 1996, 38 S., 26 Abb., 4 Tab., kart.,
 ISBN 3-8167 4219-X
 € 12,- | sFr 21,50

Kostengünstige Umnutzung aufgegebener militärischer Einrichtungen für Wohnzwecke, Wohnergänzungseinrichtungen und andere Nutzungen B. Jacobs, J. Kirchhoff, J. Mezler

Band 19, 1996, 204 S., zahlreiche Abb., kart., ISBN 3-8167-4218-1 € 28,– | sFr 47,50

Holztafelbauweise im mehrgeschossigen Wohnungsbau

Barbara Bredenbals, Heinz Hullmann Band 18, 1996, 237 S., 116 Abb., 23 Tab., kart., ISBN 3-8167-4217-3 € 30,– | sFr 51,50

Gefährdungspotentiale asbesthaltiger Massenbaustoffe in den neuen Bundesländern

Klaus Bergner, unter Mitarbeit von Franka Stodollik und Hans-Otto Eckler Band 17, 1996, 75 S., 26 Abb., 9 Tab., kart., ISBN 3-8167-4216-5 € 15,- | sFr 26,-

🗌 Transparent gedämmte Altbauten

G. H. Bondzio, K. Brandstetter, P. Sulzer, S. Al Bosta, u.a. Band 15, 1996, 130 S., 44 Abb., 7 Tab., kart., ISBN 3-8167-4214-9 € 22,- | sFr 39,50

Kosten und Techniken f ür das " Überwintern" erhaltenswerter Bausubstanz

Michael Rees, Hannes Weeber Band 14, 1995, 190 S., zahlreiche Abb., kart., ISBN 3-8167-4213-0 € 25,– | sFr 44,–

Menschengerechte Raumklimatisierung durch Quellüftung und Flächenkühlung Erbard Mayer (Hrsg.)

Erhard Mayer (Hrsg.) Band 13, 1995, 190 S., zahlreiche Abb., kart., ISBN 3-8167-4212-2 € 25,- | sFr 44,-

Zusätzliche Wärmedämmsysteme bei Fertigteilbauten

Typenserie P2 P. Bauer, B. Loeser, H. Schwarzig, T. Spengler Band 12, 1995, 118 S., zahlreiche Abb., kart., ISBN 3-8167-4211-4 € 20,- | sFr 35,-

🗌 Körperschalldämmung von Sanitärräumen

Karl Gösele, Volker Engel Band 11, 1995, 76 S., zahlreiche Abb., kart., ISBN 3-8167-4210-6 € 15,– | sFr 26,–

Bauschäden an Holzbalkendecken in Feuchtraumbereichen

Gertraud Hofmeister Band 9, 1995, 210 S., zahlreiche Abb., kart., ISBN 3-8167-4208-4 € 25,– | sFr 44,–

Ökologische Auswirkungen

von Hochhäusern Band 8, 1995, 418 S., 114 Abb., kart., ISBN 3-8167-4207-6 € 50,– | sFr 86,–

🗌 Wohnhochhäuser heute

H. Weeber, R. Weeber, M. Hasenmaier, u. a. Band 7, 1995, 165 S., zahlreiche Abb., kart., ISBN 3-8167-4206-8 € 25,- | sFr 44,-

Abfallvermeidung in der

Bauproduktion Barbara Bredenbals, Wolfgang Willkomm Band 6, 1994, 198 S., 75 Abb., 16 Tab., kart., ISBN 3-8167-4205-X € 25,- | sFr 44,-

Barrierefreie Erschließungssysteme von Wohngebäuden

R. Weeber, M. Rees, H. Weeber Band 5, 1994, 64 S., 52 Abb., 6 Tab., kart., ISBN 3-8167-4204-1 € 12,- | sFr 21,50

Die Ausführung des Umkehrdaches bei erhöhten Anforderungen an den Wärmeschutz

Lutz Franke, Gernod Deckelmann Band 4, 1994, 80 S., zahlreiche Abb. und Tab., kart., ISBN 3-8167-4203-3 € 20,- | sFr 35,-

Niveaugleiche Türschwellen bei Feucht-

räumen und Dachterrassen R. Oswald, A. Klein, K. Wilmes Band 3, 1994, 56 S., 48 Abb., kart., ISBN 3-8167-4202-5 € 12,- | sFr 21,50

UWohnbauten in Fertigteilbauweise

in den neuen Bundesländern R. Oswald, V. Schnapauff, R. Lamers, u. a. Band 2, 1995, 333 S., 515 Abb., kart., ISBN 3-8167-4201-7 € 40,- | sFr 69,50

Heizung und Lüftung im Niedrigenergiehaus

Gerhard Hausladen, Peter Springl Band 1, 1994, 214 S., 74 Abb., 17 Tab., kart., ISBN 3-8167-4200-9 € 25,– | sFr 44,–

Informieren Sie mich bitte laufend über neue Fachbücher

BESTELLSCHEIN

- Titel ankreuzen und im Umschlag oder
- * per Fax (07 11) 970 25 08 oder -25 07
- senden an:

Fraunhofer IRB Verlag

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau IRB

Postfach 80 04 69, D-70504 Stuttgart Telefon (07 11) 970 - 2500 E-Mail: info@irb.fhg.de URL: http://www.IRBbuch.de

8	Absender	
ĕ		
ß		Ð
Ř		- ê
ĸ		ae
Ř		zei
ĸ		Ā
k	Straße/PE	4
8		τĔ
8		l
8	PLZ/Ort	ď
8		Bf
8	Datum	2
8		ğ
8	the terms of a life	272
ii ii	Unterschrift	0

Schadenfreies Bauen

Herausgegeben von Professor Günter Zimmermann

Schadenfreies Bauen Gesamtausgabe Bände 1 – 26 2002, alle Bände mit festem Einband ISBN 3-8167-5796-0 € 1037,-|sFr 1744,-Bei Abnahme der Gesamtausgabe sparen Sie € 115,-

Schäden an polymeren

Beschichtungen Robert Engelfried Band 26: 2001, 146 S., 94 Abb., 14 Tab., ISBN 3-8167-5795-2 € 40,- | sFr 68,50

🗌 Schäden an Belägen und Bekleidungen mit Keramik- und Werksteinplatten Günter Zimmermann Band 25: 2001, 200 S., 175 Abb., 16 Tab.,

ISBN 3-8167-5791-X € 48,- | sFr 82,50

Schäden an Installationsanlagen

Heizungs- und Raumlufttechnische Anlagen, Trinkwasser-, Abwasser- und Gasinstallationsanlagen Heinz Wirth, Stefan Wirth Band 24: 2001, 270 S., 114 Abb., 33 Tab., ISBN 3-8167-5790-1 € 57,- | sFr 96,-

🗌 Schäden an Türen und Toren

Ralf Schumacher Band 23: 2001, 372 S., 291 Abb., 32 Tab., ISBN 3-8167-4169-X €71,-|sFr 118,-

Schäden an elastischen und textilen Bodenbelägen

Hans-Joachim Scheewe Band 22: 2001, 232 S., 80 überw. farb. Abb., 50 Tab., ISBN 3-8167-4168-1 € 50,- | sFr 86,-

Schäden an Glasfassaden

und -dächern

Peter Küffner. Oliver Lummertzheim Band 21: 2000, 132 S., 106 z.T. farb. Abb., 6 Tab. ISBN 3-8167-4165-7 € 40,- | sFr 68,50

Schäden an Wärmedämm-

Verbundsystemen Erich Cziesielski, Frank Ulrich Vogdt Band 20: 2000, 202 S., 75 Konstruktionsskizzen, 28 Tab. u. Diagramme, 98 Fotos, ISBN 3-8167-4164-9 € 50,- | sFr 86,-

🗌 Schäden an Außenwänden aus

Mehrschicht-Betonplatten Ralf Ruhnau, Nabil Fouad Band 19: 1998, 104 S., 61 Abb.; 7 Tab., ISBN 3-8167-4160-6 € 35,-|sFr 60,50

Schäden an Deckenbekleidungen und abgehängten Decken

Hubert Satzger Band 18: 1998, 78 S., 59 Abb., 5 Tab., ISBN 3-8167-4159-2 € 23,- | sFr 40,50

🗌 Schäden an Dränanlagen

Wilfried Muth Band 17: 1997, 114 S., 128 Abb., 10 Tab., ISBN 3-8167-4154-1 € 35,- | sFr 60,50

🗌 Tauwasserschäden

Richard Jenisch Band 16: 2. überarb. Aufl., 2001, 129 S., 66 Abb., 6 Tab., ISBN 3-8167-5792-8 € 37,-|sFr 62,50

🗌 Schäden an Estrichen

Klaus G. Aurnhammer Band 15: 2., erg. Aufl., 1999, 216 S., 44 Abb.; 17 Tab. ISBN 3-8167-4162-2 € 46,-|sFr 78,-

Schäden an Tragwerken aus Stahlbeton

Bernhard Brand, Gerhard Glatz Band 14: 1996, 217 S., 129 Abb., 24 Tab., ISBN 3-8167-4153-3 € 46,- | sFr 78,-

Schäden an Außenwänden aus Ziegelund Kalksandstein-Verblendmauerwerk

Helmut Klaas, Erich Schulz Band 13: 1995, 224 S., 162 Abb., 13 Tab., ISBN 3-8167-4152-5 € 46,- | sFr 78,-

🗌 Schäden an Metallfassaden und -dachdeckungen

Franz Lubinski, Fritz Röbbert, Uwe Nagel, u. a. Band 12: 2. erw. Aufl., 2001, 415 S., 303 Abb., 22 Tab., ISBN 3-8167-4166-5 € 76,-|sFr 127,-

Schäden an Außenmauerwerk aus Naturstein

Martin Sauder, Renate Schloenbach Band 11: 1995, 274 S., 95 Abb., 31 Tab., ISBN 3-8167-4150-9 € 50,- | sFr 86,-

Schäden an Außenwänden mit Asbestzement-, Faserzement- und Schieferplatten

Klaus W. Liersch Band 10: 1995, 146 S., 86 Abb., 20 Tab., ISBN 3-8167-4149-5 € 38,-|sFr 65,-

🗌 Schäden an Fassadenputzen

Helmut Künzel Band 9: 2. erw. Aufl., 2000, 142 S., mit zahlr. Abb. und Tab., ISBN 3-8167-4167-3 € 38,-|sFr 65,-

Schäden an Abdichtungen in Innenräumen Erich Czielsielski, Michael Bonk

Band 8: 1994, 112 S., 55 Abb., 4 Tab., ISBN 3-8167-4147-9 € 33,- | sFr 57,-

Rissschäden an Mauerwerk

Ursachen erkennen - Rißschäden vermeiden. Werner Pfefferkorn Band 7: 3. überarb. Aufl., 2002, 292 S., 290 Abb., 18 Tab., ISBN 3-8167-5793-6 € 53,- | sFr 89,-

Postfach 80 04 69, D-70504 Stuttgart Telefon (07 11) 970 - 2500 E-Mail: info@irb.fhg.de URL: http://www.IRBbuch.de

Absender	 	 	

Ę		bxp.
Ę		geA4
		nzeig
	Straße/PF	itel-A
	Pl 7/Ort	alle T
		[SFB
	Datum	2002
1	Unterschrift	02/

Fraunhofer IRB Verlag

Schäden an Fenstern

Wolfgang Klein Band 6: 1994, 154 S., 92 Abb., 2 Tab., ISBN 3-8167-4145-2 € 37,- | sFr 64,-

Schäden an Wänden und Decken in

Holzbauart Horst Schulze Band 5: 1993, 158 S., 140 Abb., ISBN 3-8167-4144-4 € 37,- | sFr 64,-

Schäden an Industrieböden

Erich Cziesielski, Thomas Schrepfer Band 4: 2., erw. Aufl., 1999, 169 S., 69 Abb., 33 Tab. ISBN 3-8167-4163-0 €46,-|sFr 78,-

Schäden an Sichtbetonflächen Heinz Klopfer

Band 3: 1993, 123 S., 77 Abb., 9 Tab., ISBN 3-8167-4142-8 € 35,-|sFr 60,50

Schäden an Flachdächern und Wannen aus wasserundurchlässigem Beton

Gottfried C.O. Lohmeyer Band 2: 3. neu bearb. Aufl., 2001, 272 S., 171 Abb., 28 Tab., ISBN 3-8167-5794-4 € 50,- | sFr 86,-

🗌 Schäden an Außenwandfugen im Beton- und Mauerwerksbau

Ralf Ruhnau Band 1: 1992, 132 S., 87 Abb., ISBN 3-8167-4140-1 € 35,- | sFr 60,50

BESTELLSCHEIN

- Titel ankreuzen und im Umschlag oder
- per Fax (07 11) 970 25 08 oder -25 07
- senden an:

Fraunhofer IRB Verlag

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau IRB

Die »Bauschäden-Sammlung« in 13 Bänden

Herausgegeben von Professor Günter Zimmermann



In der Fachwelt hat diese Zusammenstellung von typischen Bauschadensfällen als wichtiger Beitrag zur Verbesserung der Bau- und Planungsleistungen großes Ansehen erlangt.

Die 13 Bände mit dem Untertitel **»Sachverhalt - Ursachen - Sanierung«** enthalten Schadensberichte aus allen baukonstruktiven Bereichen und sind durch Themen- und Sachregister erschlossen. Der Nutzer kann so auf Anhieb feststellen,

- ob ein gleicher oder ähnlicher
 Schaden bereits dokumentiert ist,
- welche Schäden für ein bestimmtes Bauteil typisch sind,
- wie diese Schäden vermieden werden können oder welche Ma
 ßnahmen zu ihrer Behebung in Frage kommen.

Seit 3 Jahrzehnten ist die »Bauschäden-Sammlung« eine ständige Rubrik des »Deutschen Architektenblattes«.

Bauschäden-Sammlung, Band 13 Sachverhalt - Ursachen - Sanierung

2001, 184 Seiten, zahlreiche, überwiegend farbige Abbildungen, fester Einband, ISBN 3-8167-4185-1 € 27,- | sFr 44,-

Der Herausgeber

Professor Günter Zimmermann, ein bekannter Bausachverständiger mit langjähriger Erfahrung, betreut seit 3 Jahrzehnten die »Bauschäden-Sammlung« im »Deutschen Architektenblatt« und ist auch für die Herausgabe der Buchausgabe verantwortlich.



BESTELLSCHEIN

- Band 1: 168 Seiten

- Band 3: 168 Seiten € 27,-|sFr 44,-
- Band 4: 168 Seiten € 27,-|sFr 44,-
- □ **Band 5**: 168 Seiten
- € 27,-|sFr 44, Band 6: 168 Seiten
 € 27,-|sFr 44,-
- **Band 7**: 168 Seiten € 27,-|sFr 44,-
- Band 8: 168 Seiten € 27,-|sFr 44,-
- ☐ Band 9: 184 Seiten € 27,- | sFr 44,-
- Band 10: 184 Seiten € 27,- | sFr 44,-
- ☐ Band 11: 184 Seiten € 27,-|sFr 44,-
- ☐ Band 12: 184 Seiten € 27,-|sFr 44,-
- Band 13: 184 Seiten
- ____ € 27,-|sFr 44,-

Sie sparen € 36,- bei Abnahme der

Bände 1-13 komplett: € 315,- | sFr 476,-

Alle Bände im Format A 5 quer, mit zahlreichen, zum Teil farbigen Abbildungen, festem Einband und Fadenheftung

Titel ankreuzen und im Umschlag oder per Fax (07 11) 970 - 25 08 oder -25 07 senden an:

Fraunhofer IRB Verlag

- Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau IRB
- Postfach 80 04 69, D-70504 Stuttgart
- Telefon (07 11) 970 25 00
- E-Mail: info@irb.fhg.de
- URL: http://www.IRBbuch.de

8	Absender	õ
8		6
1 1		Ą
		eige
8		١IJ
8		1
8	Straße/PF	Ę
*		alle
¥	PLZ/Ort	Š
*		ß
× 1	Datum	62
		/20
	Unterschrift	02

Fraunhofer IRB Verlag