

Bemessungsregeln für maschinelle  
Rauchabzüge auf der Grundlage von  
Wärmebilanzrechnungen

Textband

**T 2569/1**

T 2569/1

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die in dieser Forschungsarbeit enthaltenen Darstellungen und Empfehlungen geben die fachlichen Auffassungen der Verfasser wieder. Diese werden hier unverändert wiedergegeben, sie geben nicht unbedingt die Meinung des Zuwendungsgebers oder des Herausgebers wieder.

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.

© by Fraunhofer IRB Verlag

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](mailto:irb@irb.fraunhofer.de)

[www.baufachinformation.de](http://www.baufachinformation.de)

Arbeitsgemeinschaft Brandsicherheit

Prof. Schneider

Dr. Kersken-Bradley

Dr. Max

## Abschlußbericht

Bemessungsregeln für maschinelle Rauchabzüge  
auf der Grundlage von Wärmebilanzrechnungen

IfBt Az.: IV 1-5-656/91

Wien / München / Bruchsal

November 1993

# 1 Einleitung

## 1.1 Allgemeines

Rauchabzüge bestehen aus Öffnungsflächen, durch welche im Brandfall Rauchgase aus dem betroffenen Raum ins Freie abgeführt werden können. Für den Aufbau einer Strömung sind außer den Abzugsflächen auch Zuluftflächen erforderlich mit entsprechender geometrischer Zuordnung von Abzug und Zuluft. In kleinen Räumen genügen Fenster als Abzugsflächen - mit Türen als Zuluftflächen. In Kellergeschossen behilft man sich, indem Fenster in Lichtschächte verlegt werden. Das bedeutet, daß bis zu einer gewissen Raumgröße die normale, natürliche Lüftung gleichzeitig den Rauchabzug abdeckt.

Bei großen Brandabschnitten oder Hallen ist ein Rauchabzug über Fassadenfenster nicht sehr wirksam, da die Fenster unter Umständen weit vom Brandherd entfernt sind und außerdem eine unerwünschte Verschleppung und Verwirbelung der Rauchgase auftritt. Bei innenliegenden Räumen, großflächigen Zwischengeschoßen und vollklimatisierten Industriegebäuden sind ebenfalls vergleichbar ungünstige Verhältnisse zu erwarten. Es sind sogenannte Rauchabzugsanlagen erforderlich. Im Regelwerk wird daher unterschieden zwischen der Rauchabführung über

- thermischen Auftrieb (RA),
- Zwangslüftung, maschinelle Abzüge (MA).

Der vertikale Rauchabzug über thermischen Auftrieb und Öffnungsflächen im Dach ist auf 1-geschossige Gebäude, mehrgeschossige Gebäude mit Entrauchungsschächten und Dachgeschosse beschränkt. Maschinelle Rauchabzüge sind erforderlich bei mehrgeschossigen Gebäuden (mit Ausnahme des Dachgeschosses) für

- innenliegende Räume, bei denen ein Rauchabzug über Schächte (über thermischen Auftrieb) nicht möglich ist, oder als nicht ausreichend erachtet wird,
- Räume, bei denen ein Rauchabzug über Fenster allein als nicht ausreichend erachtet wird.

Dabei zeigt sich in der Genehmigungspraxis ein großer Ermessensspielraum hinsichtlich der Raumgrößen und Situationen, bei denen ein Rauchabzug verlangt wird und Fenster oder Schächte als nicht ausreichend erachtet werden. Hier besteht eindeutig Regelungsbedarf. Sonderfälle für den Einsatz maschineller Rauchabzüge sind Anlagen, die unter das BlmSchG fallen, bei denen die Rauchabführung ins Freie zumindest bei Kleinbränden über eine etwaig vorhandene Reinigungsanlage führen soll.

## 1.2 Anwendungsbereich von Rauchabzügen

Rauchabzüge dienen für die Flucht und Rettung der im Brandabschnitt vorhandenen Personen sowie zur Rauchfreihaltung für einen gezielten Löschangriff der Feuerwehr. Sie sollen die Rauchausbreitung behindern und für einen möglichst langen Zeitraum rauchgasfreie Bereiche oder Schichten aufrechterhalten. Nach dem Löschen muß dann abgekühlter Rauch aus den betroffenen Bereichen abgeführt werden können.

Bei kleinen Räumen geht die Verrauchung (wegen des kleinen Volumens) sehr schnell vonstatten und wird auch bei entsprechendem Rauchabzug nicht nennenswert verzögert. Dafür sind in kleinen Räumen nur kurze Wege zu überwinden und ein Löschangriff kann auch von der Tür her vorgenommen werden. Außer bei sehr frühzeitigem Löschangriff dient der Rauchabzug nur der Abführung kalten Rauches nach dem Löschen.

Unter sonst gleichen Bedingungen erfolgt mit zunehmender Raumgröße die Rauchausbreitung langsamer und kann durch entsprechenden Rauchabzug verzögert werden. Wegen längerer Wege und um einen Löschangriff auch innerhalb des Raumes zu ermöglichen, sind möglichst wirksame Rauchabzüge erforderlich. Ein Rauchabzug ist dann am wirksamsten, wenn die Rauchgase möglichst unmittelbar über dem Brandherd abgezogen werden (vertikale Rauchabführung) - z. B. durch Anordnung von Öffnungsflächen im Dach - oder bei entsprechenden Zuluftöffnungen, sodaß eine rauchfreie Schicht von 2 bis 3 m Dicke im Brandraum aufrechterhalten werden kann.

Hinsichtlich der möglichen Raumsituation ist zu unterscheiden zwischen Brandabschnitten mit und ohne Öffnungsmöglichkeiten der Fenster oder im Dach. Daraus abgeleitet werden seitens der Verfasser folgende Rauchabzüge vorgeschlagen (siehe Tabelle 1.1).

Der vorliegende Bericht behandelt die maschinelle Rauchabfuhr aus Räumen oder Raumbereichen mit mehr als 1600 qm Grundfläche. Dabei ist angenommen worden, daß die Räume gemäß den bestehenden Vorschriften mit Türen versehen sind, aus denen jeweils Luft zuströmen kann. Die Anzahl der vorhandenen Türen wurde anhand der bestehenden bauaufsichtlichen Vorschriften über Flucht- und Rettungswege festgelegt, d. h. es wurde im allgemeinen das Vorhandensein einer minimalen Anzahl von Türen unterstellt. Bei innenliegenden Räumen müssen entsprechende Nachströmöffnungen über gesicherte Kanäle oder Schächte mit dem Freien verbunden sein. Sonderfälle mit maschineller Zuluft wurden nicht untersucht, weil die Funktionsfähigkeit von MA-Anlagen mit regelbarer Zuluft sehr stark vom Brandgeschehen, der Druckverteilung im Raumbereich und der Umgebung abhängt.

**Tab. 1.1:** Vorgeschlagene Maßnahmen für Rauchabzüge bei mittlerer Brandgefahr

Raumgröße Raumsituation	< 150 qm	150... 500 qm	500...1600qm	> 1600 qm
Fensteröffnung möglich Öffnungsflächen im Dach nicht möglich	Fenster	Fenster im oberen Drittel	Fenster im oberen Drittel an 2 Seiten	MA Türen** und Fenster für Zuluft
Fensteröffnung möglich Öffnungsflächen im Dach möglich	Fenster	Fenster im oberen Drittel	Fenster im oberen Drittel an 2 Seiten	RA Türen** und Fenster für Zuluft
Fensteröffnung nicht möglich Öffnungsflächen im Dach möglich	Dachklappe dachseitig manuell öffnenbar*	Dachklappen dachseitig manuell öffnenbar*	RA Türen für Zuluft	RA Türen** für Zuluft ggf. MZ
Fensteröffnung nicht möglich Öffnungsflächen im Dach nicht möglich	Schacht 1% der Fläche	Schächte 1% der Fläche	MA Türen für Zuluft	MA Türen** für Zuluft ggf. MZ

\* bei feuerbeständiger Dachdecke; andernfalls öffnen über einfache Zugstangen  
\*\*hier sind zunächst Türen ins Freie gemeint; Zuluft aus benachbarten Brandabschnitten ist in Sonderfällen möglich

RA Rauchabzugsanlage (DIN 18 232 Teil 2)

MA Maschineller Rauchabzug

MZ Maschinelle Zuluft (für Sonderfälle)

Die manuelle Fernauslösung (FA) von Rauchabzügen (RA) kann elektrisch oder pneumatisch (Druckluft oder CO<sub>2</sub>) erfolgen. Außer bei CO<sub>2</sub>-Flaschen stellt sich die Frage nach einer Ersatzstromsicherung und bei elektrischer Auslösung die Frage nach dem erforderlichen Schutz der Kabel und etwaiger Stellmotoren. Regelwerke wie VdS und VDE sehen hier nur Maximallösungen vor, die aus Gründen der Wirtschaftlichkeit nicht immer gerechtfertigt sind. Dies gilt insbesondere dann, wenn eine thermische Auslösung am Gerät vorgesehen ist und die Flügel auch dachseitig manuell geöffnet werden können.

## 2 Untersuchungsumfang

### 2.1 Schwerpunkt der Arbeiten

Die Schwerpunkte der Forschungsarbeiten sind in dem gemeinsamen Forschungsantrag der AGB, MPA Dortmund und des Institutes für Haustechnik festgelegt. Danach gliedern sich die durchzuführenden Arbeiten in fünf Hauptgruppen:

- Festlegung der Untersuchungsparameter,
- Durchführung von Simulationsrechnungen für die gewählten Parametersätze,
- Auswertung der Simulationsrechnungen,
- Präzisierung von Bemessungsvorschlägen,
- anlagentechnische Zuordnung der Bemessungsvorschläge.

Die Hauptarbeit der Untersuchungen lag zunächst in der Durchführung und Auswertung von Simulationsrechnungen. Nach eingehendem Studium der vorhandenen Literatur und den darin genannten Einflußgrößen und Parametern stellte sich heraus, daß das Spektrum der zu untersuchenden Einflüsse größer war als ursprünglich angenommen /1 bis 6/.

Insgesamt wurden deshalb mehr als 120 Simulationen durchgeführt, d. h. gegenüber der ursprünglich vorgesehenen Anzahl von etwa 40 Rechenläufen hat sich der diesbezügliche Aufwand etwa verdreifacht. Entsprechend ist der Aufwand für die Auswertung gestiegen. Ebenso war die Erarbeitung von Bemessungsvorschlägen durch die Vielzahl der vorliegenden Ergebnisse zunächst erschwert.

Im Rahmen dieses Berichtes ist gemäß dem Forschungsvorschlag kein Normenvorschlag erarbeitet worden. Dieses ist Aufgabe des zuständigen Normenausschusses. Die hier vorgestellten Ergebnisse können zum Teil jedoch direkt in die geplante Norm DIN 18 230 Teil 5 einfließen. Entsprechende Formeln und Bemessungstabellen sind in dem entsprechenden Auswertekapitel angegeben.

Die Zusammenstellung der wesentlichen Rechenergebnisse ist in einem Anhang zu diesem Abschlußbericht erfolgt, sodaß mit diesem Bericht leichter gearbeitet werden kann.

## 2.2 Festlegung der Untersuchungsparameter

Ausgangspunkt der Arbeiten war die Überlegung, daß die aus dem Bereich der natürlichen Rauchabzüge (RA) gemäß DIN 18 232, Teil 2, abgeleiteten Bemessungswerte sich auf maschinelle Rauchabzüge (MA) nicht übertragen lassen. Es wurde deshalb vereinbart, die erforderlichen Bemessungsgrundlagen aufgrund von Brandsimulationsberechnungen zu ermitteln. Der Geltungsbereich sollte der gleiche sein wie bei DIN 18 232, Teil 2.

Die angewandte Rechenmethode ist in /7 bis 10/ beschrieben, weshalb hier darauf nicht eingegangen wird. Wichtiger ist eine Diskussion der gewählten Eingabeparameter, wobei im folgenden die wichtigsten Punkte aufgeführt und erörtert werden (siehe Tabelle 2.1).

**Tab. 2.1:** Eingabeparameter für die durchgeführten Simulationen mit maschinellem Rauchabzug

Parameter	Referenzwert	weitere Werte
Hallenfläche, qm	2500	5000, 10.000
Hallenhöhe, m	10	6, 15
Brandfläche, qm	20 bis 320	-
spez. Abbrand, $\frac{\text{kg}}{\text{qm/h}}$	60	20, 120
Brandleistung, MW	5 bis 100	-
Rauchabzug, m <sup>3</sup> /h	60.000 - 360.000	-
Ausbreitung, m/min	1.0	0.3
Zuluft, %	0,32	0,64
Absaugung MA	gleichmäßig	-
Auslösung MA	2 min	keine

Das in der Tab. 2.1 aufgezeigte Parameterspektrum ist aus umfassenden Untersuchungen von Herrn Zitzelsberger entstanden. Ein gemeinsam mit Frau

Kersken-Bradley erarbeitetes Grundsatzpapier ist als Anlage 1 diesem Forschungsbericht beigelegt. Aus diesem Papier wurden nach Absprache mit dem Beraterkreis die o. g. Eingabeparameter als Eckwerte festgelegt. Einige Parameter der Anlage 1 sind auch deshalb nicht übernommen worden, weil sich im Rahmen der Forschungen bessere, auf die praktische Anwendung bezogene Daten als aussagerelevanter erwiesen haben. So wurden z. B. alle Umfassungsbauteile der Brandabschnitte als Betonbauteile angenommen, wobei die Stoffwerte nach /17/ zur Anwendung kamen. Die Simulationen umfassen somit ehestens Brände in Unter- und Zwischengeschossen und keine Dachgeschosse.

Bezüglich der technischen Ausbildung der Rauchabfuhr ist in den Simulationen jeweils angenommen, daß diese im Deckenbereich über gleichmäßig verteilte, flächig angeordnete Kanalsysteme oder Lüfter erfolgt. Aus diesem Grunde entfällt die Unterscheidung zwischen Systemen mit gleichmäßig verteilten punktuellen Absaugungsstellen und solchen mit einem Kanalsystem. Die Decken- bzw. Geschoßhöhe ist aus Gründen einer Vereinfachung bis zur Unterkante des Kanalsystems oder des Ansaugstutzen des Rauchgasventilators angenommen worden. Diese Höhe entspricht somit der in der Praxis vorkommenden "wirksamen Absaughöhe".

Die massive Absaugung durch ein einzeln angeordnetes Gerät wurde nur in einem Fall untersucht. Erwartungsgemäß ist die Rauchabsaugung in so einem Fall nur dann gegeben, wenn sich die Rauchschtichtgrenze schon praktisch im Bodenbereich befindet. Solange sich die Rauchschticht ausbildet, wird im wesentlichen kalte Luft gefördert, d. h. die abgesaugte Menge entspricht der Auslegung; sie wird in bezug auf die Rauchabfuhr jedoch nur zu 20 bis 60% wirksam. Generelle Angaben über den Wirkungsgrad der maschinellen Rauchabfuhr bei nur lokaler Absaugung sind derzeit nur bedingt möglich, weil die Vielzahl der geometrischen Anordnungen umfangreiche Parametervariationen erforderlich machen /2, 3 und 11/.

### **2.3 Brandszenarien**

Die zugrundegelegten Brandszenarien sind auf den Abbildungen 1 bis 5 zusammengestellt. Als Referenzfall wurde ein Brandraum (Baustoff: Wand, Decke, Fußboden jeweils Beton) von 2500 qm Grundfläche und 10 m Höhe angesehen (Abb. 1). Für diesen Fall wurde zusätzlich der Einfluß der Höhe auf die Verrauchungszeiten im Bereich von 6 und 15 m untersucht. Der 5000 qm Brandbereich wurde als 1-Raum-Modell (vergl. Abb. 1) und auch als 2-Raum-Modell (Abb. 2) untersucht. Letzteres ist im allgemeinen der ungünstigere Fall und bemessungsentscheidend.

Der 10.000 qm große Brandraum wurde als 3-Raum-Modell und auch als 4-Raum-Modell aufgefaßt (Abb. 3, 4 und 5). Aufgrund der unterschiedlichen

Anordnung der Brandherde ergeben sich Unterschiede in den Verrauchungszeiten. In den meisten Fällen war das 3-Raum-Modell entscheidend für die Bemessung. In wenigen Einzelfällen (4-Raum-Modell) wurde jedoch festgestellt, daß ein Brand im Eckbereich u. U. relativ schnell zu einer starken Verrauchung von Teilbereichen des Brandabschnittes führen kann.

In allen Fällen ist angenommen, daß die Rauchabfuhr bündig mit der Geschoßdeckenunterseite erfolgt (vergl. Abschnitt 2.2).

Sehr ausführlich wurde die in den Brandräumen anzunehmende Energiefreisetzung untersucht. Darüber liegt eine von Ueberall, MPA NRW erstellte Zusammenfassung aus mehreren Einzelberichten vor, die jedoch nicht in diesen Bericht aufgenommen wurde, weil der Umfang des Berichtes gesprengt worden wäre /12/. Nach den Ergebnissen von Ueberall liegen die mittleren Abbrandleistungen bei Industriebränden nach Theobald /4/ bei 86 bis 620 kW/m<sup>2</sup>, wobei der rechnerische Mittelwert etwa bei 300 kW/m<sup>2</sup> liegt.

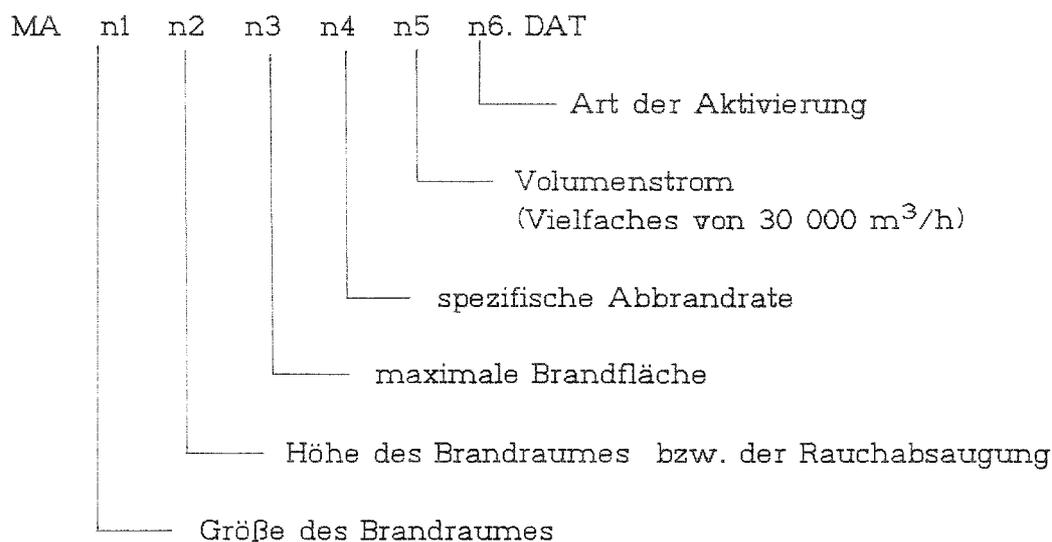
Zum Vergleich dazu hat Ueberall die Abbrandleistungen von über 150 Lagerkonfigurationen, die in der m-Faktor-Prüfanlage geprüft wurden, berechnet. Die gemessenen Leistungen lagen zwischen 0 und ca. 300 kW/m<sup>2</sup>. Ueberall schließt daraus, daß die Abbrandraten im m-Faktor-Brandraum an der Untergrenze der entsprechenden Werte für Brände in höheren und größeren Brandräumen des Industriebaues liegen.

Mit Rücksicht auf die vorliegenden Ergebnisse wurde die Standardabbrandrate in den vorliegenden Untersuchungen auf 60 kg/m<sup>2</sup>h festgelegt. Unter Berücksichtigung des im vorliegenden Fall gewählten Heizwertes von 4.8 kWh/kg (Holz etc.) ergibt sich somit eine Abbrandleistung von 288 kW/qm. Als oberster Grenzwert wurden in einigen Szenarien 576 kW/qm untersucht. Die untersten Werte lagen bei 96 kW/qm. Die Brandlasten wurden jeweils so hoch angenommen, daß Simulationszeiten von 60 min Dauer realisiert werden konnten.

Bei den Simulationen war jeweils vorgegeben, daß sich der Brandherd von 0.09 qm Fläche mit 1.0 m/min (gemäß Anlage A bis J in Einzelfällen auch 0.3 m/min) in 4 Richtungen ausbreitet, sodaß die vorgegebene Brandfläche bzw. maximale Brandleistung in wenigen Minuten erreicht wird. Die Brandsimulationen wurden über einen Zeitraum von 60 Minuten durchgeführt. Aufgrund der angenommenen Brandausweitung bis maximal 320 qm, ergaben sich absolute Brandleistungen von knapp 100 MW im oberen Untersuchungsbereich. Die untersuchten Referenzwerte liegen überwiegend in dem Bereich von 10 bis 60 MW. Brandleistungen von > 1000 kW/m<sup>2</sup>, wie sie bei intensiven Flüssigkeitsbränden auftreten, wurden nicht untersucht, weil der Heizwert mit 4.8 kWh/kg jeweils konstant gehalten wurde. Solange die Brandflächen bei Flüssigkeitsbränden jedoch klein genug bleiben, sind die praktisch vorkommenden Fälle durch die vorliegenden Berechnungen brandleistungsmäßig mit abgedeckt.

## 2.4 Übersicht der Ergebnisdarstellung

Eine Zusammenstellung über die untersuchten Brandszenarien ist im Anhang als Anlage 2 diesem Bericht beigelegt. Zum Verständnis der Anlage 2 sind zunächst einige Erläuterungen erforderlich. Jedes Brandszenarium ist mit einer Folge von 6 Ziffern (n1 bis n6) beschrieben, d. h. die Bezeichnung MA n1, n2, n3, n4, n5, n6 DAT bedeutet im einzelnen folgendes:



Die Quantifizierung der Ziffern n1 bis n6 ergibt sich jeweils anhand der Parameterblätter in Anlage 3 gemäß den ersten Seiten der Anlagen A bis G. Auf diesen Blättern sind in den Zeilen der laufenden Nr. 1 bis 7 jeweils einige Felder schraffiert. Die Schraffur bedeutet, daß die jeweiligen Parameter in den zugehörigen Serien konstant gehalten wurden; z. B. Anlage A: schraffiert sind die Brandbereichsgröße (2500 qm, n1=1), die Höhe der Rauchabsaugung bzw. Halle (10 m, n2=2) und die Brandausweitungsgeschwindigkeit (1 m/min, ohne Kennung). Die variierten Größen sind den übrigen Kästchen und den zugeordneten Nummern n3 bis n6 auf den Parameterblättern zu entnehmen.

Die Anlage 3 enthält alle Rechenergebnisse und Auswertungen der untersuchten Brandszenarien. Entsprechend den Brandraumgrößen und den jeweiligen Modellen (1-Raum bis 4-Raum-Modell) ist die Anlage 3 wie folgt unterteilt:

Anlage 3	Teil A:	2500 qm (1-Raum)
Anlage 3	Teil B:	2500 qm (1-Raum)
Anlage 3	Teil C:	2500 qm (1-Raum)
Anlage 3	Teil D:	2500 qm (1-Raum)

Anlage 3 Teil E: 5000 qm (2-Raum)

Anlage 3 Teil F: 10.000 qm (3-Raum)

Anlage 3 Teil G: 10.000 qm (4-Raum)

Jedes Simulationsergebnis ist in Form der zugehörigen Temperatur- und Rauchsichtdickenentwicklung dargestellt. Soweit Mehrraummodelle zur Anwendung kamen, sind die Temperaturen und Schichtdicken für jede einzelne Zone angegeben. Darüberhinaus sind in einigen Fällen die Rauchsichtdicken als Funktion der Zeit für festgehaltene Abbrandleistungen angegeben, wobei die Rauchabsaugungen jeweils als Parameter auf dem Diagramm erscheint. Daraus erhält man schnell eine Übersicht über die zu erwartenden Verrauchungszeiträume in Abhängigkeit von der Rauchgasabfuhr und Brandleistung.

Für eine ausgewählte Zahl von Simulationen wurden neben den Temperaturen und Schichtdicken auch die Massenströme ausgewertet. Auf der Anlage 4 des Anhanges sind die zugehörigen Ergebnisse zusammengefaßt. Entsprechend den gewählten Szenarien ist die Anlage 4 wie folgt unterteilt:

Anlage 4 Teil H: 2500 qm (1-Raum)

Anlage 4 Teil I: 5000 qm (2-Raum)

Anlage 4 Teil J: 10.000 qm (3-Raum)

Für jede Gaszone sind auf den Diagrammen der Anlage 4 die jeweiligen Zu- und Abflüsse dargestellt, d. h. insgesamt sind jeweils mindestens vier Kurvenzüge zu unterscheiden. Die Definition bzw. Kennzeichnung der Massenströme ist auf den Deckblättern der Anlagen H bis J angegeben.

Zur Verbesserung der Übersicht sind bei den Einraummodellierungen jeweils drei Diagramme für eine Simulation erstellt. Diese Diagramme zeigen im einzelnen folgende Massenströme (s. Anlage 4, Teil H):

- a) Massenströme vom Brandraum in die Umgebung durch vertikale Öffnungen (Abluft, z. B. durch Türen, Klappen etc.)
- b) Massenströme aus der Umgebung in den Brandraum durch vertikale Öffnungen (Zuluft, z. B. durch Türen, Klappen etc.)
- c) Massenströme vom Brandraum in die Umgebung durch maschinellen Rauchabzug.

Es ist zu beachten, daß die Umgebung in den Diagrammen mit den fiktiven Raumnummern 2 und 3 bezeichnet ist. Dadurch vereinfacht sich die Ergebnisdarstellung.

Die Rechenergebnisse zeigen, daß infolge der Volumenzunahme bei Brandbeginn jeweils kalte Gase aus den Zuluftöffnungen herausgedrückt werden. Weiterhin wird deutlich, daß die Massenströme nach Einschaltung der maschinellen Rauchabfuhr mit zunehmender Temperatur bzw. Zeitdauer geringer werden. Dieses ist dadurch bedingt, daß in den Berechnungen ein konstanter Volumenstrom zugrunde gelegt ist, d. h. der Arbeitspunkt der Ventilator Kennlinie ist als konstant angenommen.

Bei den untersuchten Mehrraumszenarien ist ein noch größerer Auswertearbeit aufwand erforderlich, um alle Massenströme zu erfassen (vergl. Anlage 4, Teil I und J).

Zu unterscheiden sind jeweils:

- Brandbereich (Brandraum),
- Teilbereiche bzw. Rauchabschnitte,
- Umgebung bzw. vertikale Massenströme (maschinelle Rauchabfuhr),
- Umgebung bzw. horizontale Massenströme (natürliche Zu- und Abluft).

Die Brand- und Teilbereiche stehen mit der Umgebung durch vertikale Öffnungen (Türen) und horizontale Öffnungen (maschineller Rauchabzug) in Wechselwirkung. Daneben findet jedoch untereinander ein intensiver Gasaustausch statt. Zur vollständigen Darstellung der Massenströme sind bei dem 2-Raum-Modell somit 5 Diagramme (siehe Anlage 4, Teil I) und bei den 3-Raum-Modell 7 Diagramme (siehe Anlage 4, Teil J) erforderlich.

Auf den Diagrammen sind jeweils in der Legende die Richtungen der betrachteten Massenströme gemäß den beigefügten Deckblättern der Anlage 4, Teil H bis J, angegeben, sodaß jedes Einzeldiagramm in Verbindung mit dem Deckblatt für sich verständlich ist. Neben den Einzelströmen sind auch die Summen von Einzelströmen auf den Diagrammen dargestellt.

Im Hinblick auf die Auslösung der Rauchgasventilatoren wurde grundsätzlich angenommen, daß diese nach 2 min aktiviert werden und mit voller Leistung den vorgegebenen Volumenstrom (0 bis 360.000 m<sup>3</sup>/h) fördern (n6=2). In wenigen Fällen wurde die Auslösung bereits 30 s nach Brandbeginn aktiviert, wobei der Volumenstrom linear gesteigert wurde, sodaß nach 2 min Branddauer die volle Entrauchungsleistung erreicht war (n6=4).

### 3 Ergebnisse der Parameterstudien

#### 3.1 Allgemeines

Die Ergebnisse der durchgeführten Parameterstudien sind im Anhang (Anlage 3 und 4) zusammengestellt. Aufgrund der Vielzahl der vorliegenden Detailergebnisse werden vorab einige generelle Aussagen diskutiert

Alle Berechnungen zeigen, daß es unter den gewählten Bedingungen relativ rasch zu einer Verrauchung der Brandräume kommt. Dabei spielen die tatsächliche Abbrandleistung und auch die Höhe des maschinellen Rauchabzuges bis zum 10-fachen Luftwechsel keine dominierende Rolle. Die berechneten Sinkgeschwindigkeiten liegen bei 1.2 bis 1.7 m/min (vergl. Abb. 6), wobei auf der Abb. 6 erkennbar ist, daß auch die Brandausbreitungsgeschwindigkeit keinen dominierenden Einfluß hat, d. h. bei 0.3 m/min Ausbreitungsgeschwindigkeit liegen die Sinkgeschwindigkeiten immer noch um 0.9 m/min.

Weiterhin wurde festgestellt, daß die maschinelle Rauchabfuhr eine geringe Verzögerung bei der Ausbildung von Rauchsichten bewirken kann. Bei kleinen Brandausbreitungsgeschwindigkeiten ergibt dies Verzögerungen bis zu 8 min, wohingegen bei rascher Brandausbreitung lediglich 2 bis 3 min Zeitverzögerung nachgewiesen werden konnte (vergl. Abb. 7).

Grundsätzlich ist auch festzustellen, daß sich eine Art stationärer Zustand mit einer rauchfreien Schicht nur dann einstellt, wenn der maschinelle Rauchabzug hoch und die vorgegebene Abbrandleistung relativ klein ist. In allen anderen Fällen werden die Brandbereiche relativ schnell verraucht.

Aus den o. g. Beobachtungen, die im wesentlichen auch bei den größeren Brandabschnitten bestätigt werden konnten, wurden u. a. die nachstehend aufgeführten Folgerungen gezogen:

- Soweit die Brandbekämpfung nicht deutlich unter 10 Minuten Branddauer beginnt, kann für die Bemessung der maschinellen Rauchabzüge nur ein quasi-stationärer Zustand, der sich nach 20 bis 30 Minuten Branddauer ergibt, als Bemessungswert angenommen werden (analog zu den RA).
- Die Sinkgeschwindigkeiten liegen zwischen 0.5 m/min und 1.7 m/min, wobei der kleinere Wert nur in Brandabschnitten > 5000 qm Fläche erreicht wird. Es ist somit davon auszugehen, daß niedrige Geschosse, Parkgeschosse und Kellerräume in Zeiträumen von wenigen Minuten verrauchen und nur bei kleinen Brandleistungen und unter Anwendung extrem hoher Ventilationsleistungen rauchfrei gehalten werden können.
- Rauchschrützen bringen keine Verbesserung der Situation, weil die Sinkge-

schwindigkeiten vom maschinellen Rauchabzug kaum beeinflußt werden. Die vom Brandherd entfernten Bereiche verdrauchen u. U. schneller als der Brandnahbereich infolge der Abkühlung und Einmischung von kalter Luft in die im Deckenbereich strömenden Rauchgase, wenn die Unterkante der Rauchschrürze zu hoch ist.

- Die Wirksamkeit der maschinellen Rauchabzüge nimmt ab, wenn der Rauch nicht gleichmäßig abgesaugt wird, weil bei einer konzentrierten punktuellen Absaugung viel kalte Luft gefördert wird. Ein gleichmäßig verteilter maschineller Rauchabzug, ggf. über Lüftungskanäle im Deckenbereich ist anzustreben.

### **3.2 Ergebnisse: 2500 qm große Brandräume**

Aus der Vielzahl der vorliegenden Rechenergebnisse ist auf Abb. 8 die zu erwartende rauchfreie Schichtdicke in einem 2500 qm großen Brandabschnitt in Abhängigkeit von der Brandleistung und dem maschinellen Rauchabzug angegeben. Alle Werte gelten für quasi-stationäre Bedingungen, die sich nach einer zunächst willkürlich angenommenen Branddauer (Referenzzeit) von rund 25 min eingestellt haben. Entsprechend der erforderlichen rauchfreien Schichtdicke, z. B. 2.5 m für die Brandbekämpfung, lassen sich aus Abb. 8 die erforderlichen Ventilationsleistungen direkt entnehmen. Vorausgesetzt ist jedoch, daß das Brandszenarium, d. h. die zu erwartende spezifische Brandleistung und die maximale Brandfläche bekannt sind. Die Brandleistung (Brandfläche) wäre somit - wie bei den thermischen Abzügen - Eingangsparameter für eine Bemessung maschineller Rauchabzüge.

Für andere Höhenverhältnisse im Brandbereich (Abb. 9) wurden nach 25 min Referenzzeit rauchfreie Schichtdicken berechnet, die mit den auf Abb. 8 dargestellten Werten gut übereinstimmen, d. h. die gestrichelten Linien auf der Abb. 7 und 8 sind praktisch identisch. Diese Linien stellen jeweils untere Grenzwerte der rauchfreien Schicht für alle Brandleistungen und definierten Volumenströme durch Rauchabzüge dar. Dabei ist zu beachten, daß die Zuluft in den betrachteten Fällen jeweils in Bodennähe (Türöffnungen) nachgeströmt ist.

Daß die Höhe des Brandbereiches auf den absoluten Wert der rauchfreien Schicht nach längerer Branddauer nur einen geringen Einfluß hat, geht auch aus der Abb. 10 hervor. Für definitive Abbrandleistungen und Ventilationsbedingungen sind darauf die nach 25 min Branddauer berechneten rauchfreien Schichtdicken angegeben. Man erkennt daran, daß der Höheneinfluß zum Referenzzeitpunkt von 25 min praktisch vernachlässigbar ist in bezug auf die rauchfreie Schicht. Diese Beobachtung ist wichtig im Hinblick auf das zu entwickelnde Bemessungskonzept für maschinelle Rauchabzüge.

### 3.3 Ergebnisse: 5000 qm große Brandräume

Die Simulationsergebnisse für den 5000 qm großen Brandbereich sind auf der Abb. 11 dargestellt. Untersucht wurde wiederum der Zeitpunkt nach 25 min Branddauer; also der quasi-stationäre Zustand. Prinzipiell ergaben sich ähnliche Abhängigkeiten wie bei den 2500 qm großen Brandbereichen. Das untersuchte 2-Raum-Modell liefert konservative Werte für die Verrauchung, d. h. der virtuelle Raum 2 im Modell war immer schneller verraucht als der Brandraum selbst. Es zeigt sich hier, daß die Anordnung von Rauchschürzen eine Verrauchung ggf. beschleunigt und zwar dann, wenn die Rauchschicht die Schürze unterwandert und durch die Einmischung von kalter Luft in die Rauchgase ein großes Volumen abgekühlten Rauches entsteht. D. h., anstelle zu "kurzer" Rauchschürzen sollten besser keine Rauchschürzen angeordnet werden, soweit die Brandmeldung gesichert ist.

Auch in diesem Fall lassen sich die Rechenwerte durch eine Schar von Geraden als untere Grenzwerte abschätzen. Es ist interessant festzustellen, daß die Steigungen der Geraden mit den Steigungen der Grenzgeraden von Abb. 8 und 9 praktisch übereinstimmen. Lediglich die Achsenabschnitte  $A_0$  ( $P=0$ ) für die Schichtdicke  $s_T$  führten zu unterschiedlichen Werten.

### 3.4 Ergebnisse: 10.000 qm große Brandräume

Eine Untersuchung der Simulationsergebnisse der 10.000 qm großen Brandräume hat zu ähnlichen Ergebnissen geführt, d. h. alle Rechenwerte lassen sich durch eine Geradenschar mit konstanter Steigung, die den Steigungen der Abb. 11, 9 und 8 entspricht, als untere Grenzwerte abschätzen (vergl. Abb. 12). Die Grenzwerte sind bei Brandleistungen kleiner 10 MW und größer 30 MW immer auf der sicheren Seite. Diese Aussage gilt für alle untersuchten Brandszenarien und Brandräume.

Für die 10.000 qm Brandräume wurden neben dem 3-Raum-Modell auch 4-Raum-Modelle gemäß Abb. 5 untersucht.

Unterschieden wurden:

- Fall A: 3-Raum-Modell, Brand in der Mitte
- Fall B: 4-Raum-Modell, Brand in Raum I
- Fall C: 4-Raum-Modell, Brand in Raum II

In Abhängigkeit von der Abbrandleistung und Ventilation wurden die in der Tabelle 3.1 angegebenen Werte ermittelt. Die fiktiv angenommenen Rauchschürzen der einzelnen Raumbereiche waren nur 1.0 m hoch.

**Tab.: 3.1** Auswertung der Rauchsichtdicken in 10.000 qm großen Brandräumen mit Rauchschrürzen

Leistung kW (Brandfläche)	Ventilation $10^3 \text{ m}^3/\text{h}$	$s_r$ [m] Fall A	$s_r$ [m] Fall B	$s_r$ [m] Fall C
11.520 (40 qm)	0.0	1.1	1.0	1.3
	90	3.1	-	-
	180	5.4	6.1	5.4
	360	9.6	8.0	8.8
23.040 (80 qm)	0.0	0.8	-	-
	90	1.9	-	-
	180	3.1	-	-
	360	6.0	-	-
46.080 (160 qm)	0.0	0.6	0.5	0.5
	90	0.9	-	-
	180	1.8	3.7	0.6
	360	3.6	4.8	3.0
92.160 (320 qm)	0.0	0.2	0.2	0.1
	90	0.3	-	-
	180	0.3	0.3	0.6
	360	1.8	3.2	1.2

Aus der Tabelle 3.1 geht hervor, daß die Fälle B und C bis auf eine Ausnahme (46.080 hW/ 180.000 m<sup>3</sup>/h) praktisch von dem Fall A abgedeckt werden. Es ist zu beachten, daß der o. g. nicht erfaßte Wert bei 0.6 m, also weit unter einer möglichen Bemessungsgrenze von z. B. 2.5 m liegt. Insoweit kann gesagt werden, daß die bei unterschiedlicher Lage des Brandherdes berechneten Rauchsichtdicken in 10.000 qm großen Brandbereichen von den mit dem 3-Raum-Modell erzielten Ergebnissen abgedeckt sind.

### 3.5 Ergebnisse der Temperaturberechnungen

Bei der Interpretation der Temperaturkurven ist zu beachten, daß bei einem Herabsinken der Rauchsicht bis zum Fußboden sich die physikalische Modellierung im Programm MRFC automatisch ändert, d. h. es wird im Brandraum anstelle von zweien nur noch eine homogene Gastemperatur berechnet. Am Übergangspunkt ergibt sich dadurch kurzzeitig ein Sprung in den Temperaturkurven (vergl. z. B. Anlage C MA 114 162, MA 115 362), der numerisch bedingt ist. Nach einigen Minuten erreichen die berechneten Temperaturen den tatsächlich zu erwartenden Wert. Bei großen Brandflächen und/oder hohen Abbrandgeschwindigkeiten ist die Brandlast am Brandherd zuerst verbraucht, es entsteht eine quadratische Brandfläche mit einer ebenfalls quadratischen Innenfläche auf der es nicht mehr brennt. Dadurch sinken die Temperaturen ggf. wieder ab. Dieses zeigt sich bei verschiedenen Läufen, z. B. Anlage A MA 124 142, MA 124 302, Anlage D MA 132 352, MA 132, 362. In wenigen Einzelfällen sind auf den Kurven auch numerische Instabilitäten erkennbar, z. B. Anlage E MA 225 302, MA 225 322, deren Ursachen schwer zu begründen sind. Für das Gesamtergebnis der Berechnungen sind diese Beobachtungen jedoch ohne Bedeutung.

Bezüglich den zu erwartenden mittleren Rauchgastemperaturen kann gesagt werden, daß bei einem 2500 qm großen Brandraum im allgemeinen Temperaturen von weniger als 300°C zu erwarten sind. Nur in wenigen Ausnahmefällen wurde die 300°C -Grenze überschritten. Dies war bei sehr großen Brandflächen (> 160 qm) und/oder sehr hoher spezifischer Abbrandgeschwindigkeit 120 kg/m<sup>2</sup> h (576 kW/m<sup>2</sup>) der Fall. Bei einem mittleren Abbrand von 300 kW/m<sup>2</sup> und Brandflächen bis 80 qm wird die 300°C-Grenze in keinem Fall überschritten.

Die obige Aussage gilt auch für die 5000 und 10.000 qm großen Brandräume. Die 300°C-Grenze wurde lediglich bei Brandflächen ab 260 qm und Abbrandleistungen von 288 kW/m<sup>2</sup> teilweise überschritten. Bei allen übrigen Simulationen wurde diese Grenze nicht erreicht. Die höchste Mitteltemperatur, die überhaupt berechnet wurde liegt bei knapp 400°C.

Die Temperaturergebnisse sind insoweit wichtig, weil daraus hervorgeht, daß die Bemessungswerte für die Ventilatoren sehr stark von den angenomme-

nen Brandszenarien abhängen. Nach dem derzeitigen Erkenntnisstand scheint es so zu sein, daß zumindest für große Brandbereiche die 300°-Grenze ein vernünftiger Wert ist. Ventilatoren für 600° C heiße Rauchgase setzen Brandszenarien voraus, die weit über den hier zugrunde gelegten Werten liegen. Inwieweit unter solchen Bedingungen eine Rauchfreihaltung tatsächlich erfolgt, ist nicht bekannt. Es ist zu erwarten, daß Ventilatoren dieser Art eher zur Wärmeentlastung der Konstruktion als zur Rauchfreihaltung beitragen.

## **4 Vorschlag für die Bemessung**

### **4.1 Szenarium und Bemessungssituation**

Nach allgemeinem Verständnis soll ein Rauchabzug in erster Linie dem Personenschutz dienen, d. h. Flucht und Rettung erleichtern und einen wirksamen Löschangriff ermöglichen. Ein zweiter Aspekt ist der Sachschutz: Brandgase sollen - wegen ihrer korrosiven Wirkung - möglichst an Ort und Stelle abgeführt werden. Insofern sind - wie bei den thermisch wirkenden Rauchabzügen (RA) - der Entstehungsbrand und die Brandentwicklungsphase maßgebend für die Bemessung maschineller Rauchabzüge (MA).

Der Bemessung soll folgende Modellvorstellung zugrunde liegen:

Ein Brand breitet sich mit einer Geschwindigkeit  $v$  aus; die Brandausbreitung wird zu einem bestimmten Zeitpunkt  $t_a$  beendet. Der Zeitpunkt  $t_a$  soll dem Zeitpunkt eines planmäßig beginnenden Löscheinsatzes entsprechen. Zu diesem Zeitpunkt hat die Brandfläche die Größe  $A_b$  erreicht und vergrößert sich wegen des Löscheinsatzes nicht mehr.

Die Brandfläche zum Zeitpunkt  $t_a$  bestimmt sich bei quadratischer Ausbreitung aus:

$$A_b = (x_0 + v \cdot t_a) \cdot (y_0 + v \cdot t_a)$$

und kann somit - wie bei der RA-Bemessung - in Abhängigkeit von der Brandentwicklungsdauer und der Ausbreitungsgeschwindigkeit festgelegt werden. Anstelle einer konstanten Ausbreitungsgeschwindigkeit  $v$  kann eine variable Ausbreitungsgeschwindigkeit angesetzt werden, sodaß eine Verdopplung der Brandfläche z. B. alle 5 Minuten erfolgt. Bei den Simulationsrechnungen wurde angenommen, daß nach dem Zeitpunkt  $t_a$  nur in wenigen Ausnahmefällen eine Reduzierung der Brandleistung erfolgt. Für die Bemessung wäre nun ein Zeitpunkt nach  $t_a$  maßgebend, der unter Berücksichtigung eines Sicherheitszuschlages festzulegen ist:

$$t^* = t_a + \tau$$

Anhand der Schichtentwicklungen ist zu erkennen, daß nur unter bestimmten Voraussetzungen ein "stationärer Zustand" eintritt, d. h. das abgezogene Rauchgasvolumen entspricht in etwa dem entstehenden Volumen. In vielen Fällen nahmen die Rauchschiekdicken jedoch auch nach längeren Branddauern stetig zu.

Die RA-Bemessung, die auf dem Modell von Thomas und Hinkley beruht, erfolgt nämlich für einen stationären Zustand. Dies ist dadurch begründet, daß dort, modellbedingt, nur stationäre Zustände betrachtet werden können. Dabei ist die Modellvorstellung etwa die gleiche wie bei den Simulationsrechnungen, allerdings wird nur der Endzustand - in Verbindung mit entsprechenden Modellvereinfachungen - betrachtet: Der Brand hat die Fläche  $A_b$  erreicht. Der Zeitpunkt  $t_a$  in Verbindung mit der dann erreichten Brandfläche ist bestimmend für die Bemessungsgruppen 1 - 7 nach DIN 18 232.

Es hat sich in den Simulationen gezeigt, daß zwischen dem Zeitpunkt  $t_a$ , bei dem die Brandfläche  $A_b$  erreicht wird und dem Zeitpunkt  $t_s$ , zu dem ein stationärer Zustand erreicht wird, bis zu 20 Minuten verstreichen können. Entsprechend nimmt die Höhe der rauchfreien Schicht während dieser Zeit von  $s_a$  bis  $s_s$  ab. Diese Differenz ist umso größer, je

- kleiner die Brandfläche  $A_b$  bzw.  $t_a$
- größer die Hallenfläche  $A$
- größer der Volumenstrom  $V$

ist. Da insbesondere die Ausbreitungsgeschwindigkeit  $v$  zeitabhängig und praktisch mit erheblichen Unsicherheiten behaftet ist, wird diese "stille Reserve" für normative Regelungen nicht in Anspruch genommen und es erfolgt - wie bei den RA - eine Bemessung für einen quasi-stationären Zustand. Der Zuschlag  $\tau$  ist somit i. a. durch Betrachten des stationären Zustandes abgedeckt.

In einigen Fällen wurde rechnerisch kein eindeutiger stationärer Zustand erreicht. Mit Rücksicht auf die tatsächlichen Brandbekämpfungsmöglichkeiten in der Praxis wird vorgeschlagen, einen Zeitraum von 20 bis 30 Minuten (Mittelwert 25 Minuten) als Bemessungspunkt zu wählen. Es ist somit angenommen, daß die öffentliche Feuerwehr in diesem Zeitraum die Brandstelle erreicht und eine definitive Situation der Verrauchung vorfindet, die anhand der Bemessung noch festzulegen ist.

Bei Vorhandensein einer Werkfeuerwehr mit wesentlich kürzerer Anmarschzeit (kleines  $t_a$ ) ist die vorgenannte "stille Reserve" entsprechend groß. Es ist jedoch schwierig, den im Einzelfall noch erforderlichen Zeitraum  $\tau$  festzulegen, sodaß auch hier im Rahmen der Normung der quasi-stationäre Zustand betrachtet werden sollte.

## 4.2 Sicherheitsbetrachtungen

Geht man von einer vereinfachten Bemessungsgleichung der Form

$$\text{erf } V = f(A_b, P, s_s, \dots)$$

aus, kann unterstellt werden, daß die Einflußgrößen

- Brandfläche  $A_b$
- spezifische Brandleistung  $P_{\text{spez}}$

als Bemessungswerte eingeführt werden, wie auch bei der RA-Bemessung. Bleibt der Parameter  $s_r$  (Höhe der rauchfreien Schicht). Hier wäre über den Ansatz

$$s_r = s_{r,0} \cdot \gamma$$

ein Sicherheitszuschlag  $\gamma$  erforderlich, der gerade bei der als sehr kurz unterstellten Brandentwicklungsdauer wichtiger ist als bei einer langsamen Brandentwicklungsdauer. Der Zuschlag könnte auch von der Hallengröße abhängen.

Nun erfolgt aber gemäß 4.1 die Bemessung nicht für einen bestimmten Zeitpunkt, sondern für den stationären Zustand, wobei  $t_s$  deutlich über  $t_a$  liegen kann und somit  $s_s$  deutlich unter  $s_a$ . Dies gilt gerade im vorgenannten kritischen Bereich kurzer Brandentwicklungsdauern  $t_a$ , d. h. der Bemessungszeitpunkt ist:

$$t^* = t_a + \tau$$

Daher wird  $s_r = s_s$  als Bemessungswert interpretiert, so daß weitere Zuschläge nicht erforderlich sind.

Da bei den RA der stationäre Zustand in der Regel viel schneller erreicht wird als bei den MA (zumindest bei kleinen Brandflächen), ist somit indirekt bei den MA - bei sonst gleichen Bedingungen - ein größerer Sicherheitszuschlag integriert als bei den RA. Wegen noch vergleichsweise geringer Erfahrung mit der Bewährung von MA in realen Bränden ist dieser Unterschied gerechtfertigt.

Als Referenzbereich (Rauchabschnitt) wird grundsätzlich ein Brandbereich von 2.500 m<sup>2</sup> betrachtet. Aufgrund der Mehrraum-Betrachtung größerer Brandbereiche zeigt sich eine deutliche Tendenz dahingehend, daß die Höhe der rauchfreien Schicht mit zunehmendem Abstand vom Brandherd abnimmt. Diese Erscheinung ist zwar bei den Auswertungen nach Abschnitt 3 berücksichtigt, birgt aber dennoch Unsicherheiten, die gesondert abgedeckt werden sollten.

Daher wird vorgeschlagen, die Höhe der erforderlichen rauchfreien Schicht für große Brandräume gegenüber der eigentlich erforderlichen Höhe  $s_{r,0}$  wie folgt zu vergrößern:

$$s_r = s_{r,0} (A/2500)^{1/3}$$

Der Wert von  $s_{r,0}$  könnte in Anlehnung an /10/ bei 2.5 m festgelegt werden. Für eine Anbindung an DIN 18 232, Teil 2, könnte im Rahmen der Normung auch die Bemessungsfläche von 1600 qm eingeführt werden.

### 4.3 Bemessungsvorschlag

Zunächst muß festgestellt werden, daß die Modellbildung bei MRFC - im Sinne einer Auslegung am sogenannten Bemessungspunkt - auf der sicheren Seite liegt. Die im folgenden vorgeschlagene Bemessungsgleichung führt eher zu einer Überschätzung als Unterschätzung der erforderlichen Volumenströme /13 bis 16/. Diese Aussage wird in dem Abschnitt 5.5 ausführlich begründet. Insoweit kann in der Bemessung von vereinfachten statistischen Ansätzen ausgegangen werden.

Im Hinblick auf die vorliegenden Ergebnisse des Abschnittes 3 scheint es weiterhin berechtigt, von vereinfachenden Ansätzen in bezug auf den Höheneinfluß und Einflüssen aus der Verwirbelung auszugehen. Der Höheneinfluß auf die rauchfreie Schicht zum Bemessungszeitpunkt, der mit 25 min Branddauer gewählt worden ist, ist praktisch vernachlässigbar (vergl. Abb. 10). Die Verwirbelung ist unseres Erachtens zumindest dadurch teilweise erfaßt, indem die großen Brandbereiche in Rauchabschnitte unterteilt werden und infolge der Überströmungen bzw. Einmischungen an den nur 1 m hohen Rauchschürzen zusätzliche Effekte, die die Verrauchung beschleunigen, bei den Simulationen berücksichtigt wurden. Bei den Mehrraumsimulationen wurde stets der Raumbereich mit der kleinsten rauchfreien Schichtdicke in die Bemessung einbezogen. Dieses war üblicherweise nicht der eigentliche Brandbereich, d. h. zusätzliche Verwirbelungen sind insoweit teilweise mit berücksichtigt.

Die Mehrzahl aller Berechnungen wurde mit 60 kg/m<sup>2</sup> h spezifischer Abbrandgeschwindigkeit und 4.8 kWh/kg Heizwert durchgeführt, d. h. die mittlere Brandleistung lag bei 288 kW/qm. Es wurden jedoch auch spezifische Abbrandgeschwindigkeiten von 20 und 120 kg/m<sup>2</sup> h untersucht, sodaß ein großer Bereich der in der Praxis vorkommenden Fälle abgedeckt ist.

Aus den vorliegenden Ergebnissen kann geschlossen werden, daß die rauchfreien Schichtdicken näherungsweise linear mit der absoluten Brandleistung korreliert werden können (vergl. Abb. 8, 9, 11 und 12). Unabhängig von den Brandbereichen und Ventilationsraten wurde die Steigung der ermittelten

Geradescharen mit

$$s_r \sim - 1.26 \cdot 10^{-4} \cdot P \quad (\text{Gl. 4.1})$$

$s_r$ : rauchfreie Schicht in m

P: maximale Brandleistung in kW

ermittelt. Trägt man alle Schnittpunkte  $A_o$  der Geradenschar mit der Y-Achse (rauchfreie Schichtdicke) auf, so ergeben sich die in der Tabelle 4.1 zusammengestellten Werte. Der Ventilationsfaktor  $A_o$  ist erstaunlicherweise fast unabhängig von der Brandbereichsgröße, d. h. er hängt i. w. nur von der Ventilation ab. Diese Abhängigkeit ist auf der Abb. 13 graphisch dargestellt, d. h. in dem untersuchten Bereich von 0 bis 360.000 m<sup>2</sup>/h Ventilationsleistung kann  $A_o$  als nahezu geometrieunabhängiger Parameter aufgefaßt werden.

**Tab. 4.1:** Ermittelte Werte des Ventilationsfaktors  $A_o$  in m

Ventilation m <sup>3</sup> /h	Brandraumgröße		
	2500 qm	5000 qm	10.000 qm
0	1.8	2.1	2.6
60.000	3.2	3.2	-
90.000	-	-	4.4
120.000	4.8	4.4	-
180.000	-	5.5	6.0
240.000	6.8	-	-
360.000	-	-	8.6

Nach der Abb. 13 gilt für den Ventilationsfaktor  $A_o$  folgende empirische Bezeichnung:

$$A_o = 2.1 + \frac{V}{V_o} \quad (\text{Gl. 4.2})$$

$A_o$ : Ventilationsfaktor in m

$V$  : maschineller Rauchabzug in  $\text{m}^3/\text{h}$

$V_0$ : Referenzgröße =  $50.000 \text{ m}^3/\text{h}$

Aus den obigen Gleichungen läßt sich unmittelbar für die rauchfreie Schichtdicke  $s_r$  ein Bemessungsvorschlag ableiten:

$$s_r = 2.1 + \frac{V}{50.000} - \frac{6.3 P}{50.000} \quad \text{Gl.4.3)}$$

$s_r$  : rauchfreie Schicht in m

$V$  : maschineller Rauchabzug in  $\text{m}^3/\text{h}$

$P$  : maximale Brandleistung in kW

Die obige Formel gilt zunächst nur in dem beschriebenen Untersuchungsbe-  
reich. Unter Einbeziehung zusätzlicher Tastrechnungen kann gesagt werden,  
daß die obige Gleichung für Brandräume von rund 1.600 bis 10.000  $\text{qm}$  und  
Abzugshöhen bzw. Raumhöhen von etwa 4 bis 18 m gilt. Die zugehörigen  
Brandleistungen liegen bei 5 bis 100 MW. Bei sehr kleinen Brandleistungen  
gilt die Formel auch, die rauchfreie Schichtdicke  $s_r$  wird dann jedoch deutlich  
unterschätzt, d. h. in so einem Fall würde ein rechnerischer Nachweis u. U.  
zu wesentlich günstigeren Bemessungswerten führen.

Für die Bemessung selbst wird Gl. 4.3 besser nach dem Volumen aufgelöst.  
Man erhält dann:

$$V = 50.000 (s_r - 2.1) + 6.3 P \quad \text{(Gl. 4.4)}$$

$V$  = maschineller Rauchabzug in  $\text{m}^3/\text{h}$

$P$  = maximale Brandleistung in kW

$s_r$  = rauchfreie Schichtdicke in m

Rauchfreie Schichten von weniger als 2.1 m Dicke sind nach Gl. 4.4 nicht zu  
betrachten.

Die vorgeschlagene Bemessungsgleichung berücksichtigt u. a.

- Brandausbreitungen zwischen 0.2 und 1.5 m/min,
- Brandherde zwischen 5 und 320  $\text{qm}$  Größe,
- Zuluftöffnungen von 0.2 bis 1.5% der Brandabschnittsgrundfläche,

- die Auslösung des maschinellen Rauchabzuges  $\leq 2$  min nach der Brandentstehung,
- eine gleichmäßige Verteilung von Absaugkanälen unter der Decke mit Sammelleitungen für z. B. 30.000 m<sup>3</sup>/h pro Gerät,
- eine gleichmäßige Verteilung der Absaugstellen unter der Decke (z. B. bei Schachtrauchung) mit  $< 8000$  m<sup>3</sup>/h pro Absaugstelle (als Bemessungshöhe gilt die Höhe bezogen auf den Abstand zwischen der Kanalunterkante und dem Fußboden).

Nicht berücksichtigt sind derzeit Sonderfälle wie

- punktuelle Absaugungen mit sehr großen Geräten bzw. Ventilationsmengen,
- regelbare Zuluftklappen bzw. sehr kleine Zuluftquerschnitte ( $\ll 0.2\%$  der Grundfläche),
- kleine Brandbereiche mit  $< 1000$  qm Grundfläche und turmartige Bauwerke.

Nach dem derzeitigen Erkenntnisstand wird vorgeschlagen, die o. g. Fälle nicht in die Norm aufzunehmen und für Bemessungen im Einzelfall theoretische Nachweise zuzulassen.

## 5 Prüfung des Bemessungsvorschlags

### 5.1 Vergleich der AGB-Berechnungen mit der Bemessung nach Thomas und Hinkley

#### 5.1.1 Zweck des Vergleichs

Im folgenden werden die Simulationsergebnisse dem Bemessungsmodell von Thomas und Hinkley [5, 6] - gegenübergestellt. Dabei wird zunächst die Auswirkungen von Vereinfachungen des Bemessungsmodells einerseits auf die RA-Bemessung und andererseits auf die MA-Bemessung gezeigt. Dann wird die Möglichkeit geprüft, als Alternative zum linearen Bemessungsmodell nach Abschnitt 4.3 ein Bemessungsmodell zu entwickeln, das sich an das Modell von Thomas und Hinkley anlehnt.

#### 5.1.2 RA und MA Bemessung nach Thomas und Hinkley

Für den Abzug durch eine horizontale Öffnung mit wirksamer Fläche  $A_w$  wird folgender Massenstrom angesetzt:

$$m_{ab} = A_{w,ab} \rho_0 \sqrt{(2d_r g T_0(T_2 - T_0)/T_2^2)} \quad [\text{kg/s}] \quad (5.1)$$

mit  $A_w$  aerodynamisch wirksame Öffnungsfläche [m<sup>2</sup>]  
 $T_2$  Temperatur der Rauchgasschicht [K]  
 $d_r$  Dicke der Rauchsicht [m]  
 $\rho_0$  Dichte von Luft bei der Anfangstemperatur  $T = T_0$  [kg/m<sup>3</sup>]

In Gl. (5.1) wurde die Zuluftabhängigkeit außer Acht gelassen, da es hier nur um den tendenziellen Vergleich zwischen RA und MA geht.

Bei der Bestimmung des Massenstroms wird angenommen, daß in der unteren Schicht keine Temperaturerhöhung stattfindet, d.h.  $T_1 = T_0$ . Für die obere Schicht wird die Schichttemperatur entweder als Bemessungstemperatur vorgegeben, z.B. 300°C, oder sie wird auf der sicheren Seite liegend abgeschätzt, indem die ganze Brandleistung in eine Erhöhung der Schichttemperatur umgesetzt wird [5,6].

Mit der vereinfachten Massenbilanz für die heiße Schicht

$$m_{ab} = \dot{R} + m_{1,2} \quad (5.2)$$

und dem Plumemodell von Thomas (für sog. "große" Brände)

$$\dot{R} + m_{1,2} = 0.188 U s_r^{3/2} \quad (5.3)$$

mit  $U$  Umfang der Brandfläche [m]  
 $\dot{R}$  Abbrandrate [kg/s]

$m_{1,2}$  in den Plume einmischende Luftmenge [kg/s]

beträgt die erforderliche Abzugsfläche, damit ein stationärer Zustand sich einstellt:

$$\text{erf } A_{w,ab} = \frac{0.188 U s_r^{3/2}}{\rho_0 \sqrt{2 d_r g T_0 (T_2 - T_0) / T_2^2}} \quad [\text{m}^2] \quad (5.4)$$

Mit den gleichen Annahmen für die Schichttemperaturen und dem Plumemodell beträgt der über MA abzuziehende Volumenstrom

$$\text{erf } V_{w,ab} = \frac{0.188 U s_r^{3/2} T_2}{T_0 \rho_0} \quad [\text{m}^3/\text{s}] \quad (5.5)$$

Aus dem Vergleich von Gleichung (5.4) und (5.5) kann die von verschiedenen Autoren schon zitierte Äquivalenz MA-RA für vorgegebene oder geschätzte Temperaturen  $T_2$  errechnet werden.

Bei den RA ist der Einfluß der Schichttemperatur  $T_2$  nicht groß. Für Schichttemperaturen oberhalb 350 K ist die erforderliche RA-Fläche nur mehr sehr schwach abhängig von der Schichttemperatur  $T_2$ : Eine Erhöhung der Schichttemperatur von 350 auf 550 K bedingt eine Verringerung der erforderlichen Öffnungsfläche um 20 % und eine Erhöhung von 550 auf 750 K bewirkt eine Erhöhung der erforderlichen Öffnungsfläche von 4 %. Ingenieurmäßig ist somit der Einfluß der Schichttemperatur - im Rahmen des RA-Modells - vernachlässigbar.

Der über MA abzuziehende Volumenstrom ist demgegenüber linear abhängig von  $T_2$ . Eine Erhöhung der Schichttemperatur von 350 auf 550 K bedingt z.B. eine Erhöhung des abzuziehenden Volumenstroms um knapp 60 %. Im Vergleich zu RA ist bei maschinellen Abzügen eine genauere Ermittlung der Schichttemperatur unabdingbar.

Es zeigt sich, daß die erforderliche RA-Fläche insbesondere bei niedrigen Hallen etwas empfindlicher gegenüber Variationen der Dicke  $s_r$  der rauchfreien Schicht ist als der über MA abzuziehende Volumenstrom. Dieser Umstand wird hier dahingehend benützt, daß bei MA zumindest keine höheren Sicherheitszuschläge erforderlich sind als bei RA.

Beim Modell von Thomas und Hinkley ist ferner die erforderliche RA-Fläche schwach abhängig von der Raumhöhe (bzw. Dicke der Rauchsicht). Der über MA abzuziehende Volumenstrom ist unabhängig von der Raumhöhe - was durch die AGB Berechnungen näherungsweise bestätigt wurde.

Hinzuweisen ist auf die ausgeprägte Abhängigkeit von der Zuluft beim Modell von Thomas und Hinkley. Aus der Vernachlässigung der zeitabhängigen Massenstromänderung (instationärer Zustand) resultiert die strikte Begrenzung des ausströmenden Massenstroms durch den einströmenden Massenstrom, was erst für  $A_{w,zu} > 2 A_{w,ab}$  vernachlässigbar wird.

### 5.1.3 Vergleich des Thomas und Hinkley Modells mit den AGB Berechnungen

Unterstellt man, daß das Thomas und Hinkley Modell "in der Tendenz zutreffend" ist, müßte über den Vergleich mit den AGB Berechnungen eine entsprechende Verbesserung des Modells für Näherungslösungen möglich sein.

Ausgangspunkt ist:

$$\begin{aligned} \text{erf } V_{w,ab} &= 0.188 U s_r^{3/2} T_2 / T_0 \rho_0 && [\text{m}^3/\text{s}] \\ &= 0.188 (2 \sqrt{\pi} \sqrt{A_b}) s_r^{3/2} T_2 / T_0 \rho_0 && [\text{m}^3/\text{s}] \\ &= 6.9 T_2 \sqrt{A_b} s_r^{3/2} && [\text{m}^3/\text{h}] \end{aligned} \quad (5.6)$$

wobei  $A_b$  die Brandfläche ist. Nach  $s_r$  aufgelöst wird

$$s_r = \frac{V_{w,ab}}{6.9 T_2 \sqrt{A_b}} \quad (5.7)$$

Ein Vergleich der AGB Berechnungen (Simulationsergebnisse  $s_{sim}$ ) mit den nach (5.7) bestimmten Höhen der rauchfreien Schicht ist im nachfolgenden Bild dargestellt, wobei sich dieser Vergleich auf die 2 500 m<sup>2</sup> großen Brandräume beschränkt. Bei dem Vergleich wurden die Temperaturen der Rauchsicht in (5.7) durchweg mit  $T_2 = 573$  K angenommen.

Mit dieser Temperaturannahme ist aber letztlich eine Vorinformation aus den AGB Berechnungen verwendet worden - vgl. Abschnitt 3.5. Daher erklärt sich die relativ gute Übereinstimmung. "Unsichere" Ergebnisse erhält man z.B. für hohe Abbrandgeschwindigkeiten. Bei Einbeziehung der Ergebnisse für größere Brandräume würde sich der Punkthaufen geringfügig nach oben verschieben, vgl. Abschnitt 5.2.

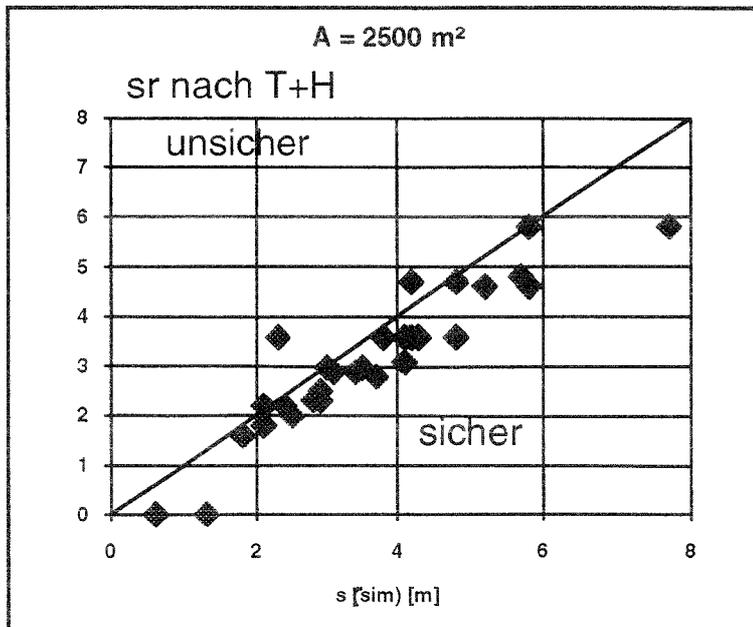


Bild 5.1 Höhe der rauchfreien Schicht, Simulationsergebnisse gegenüber Modell nach Thomas und Hinkley (Annahme:  $T_2 = 573$  K)

Ein Vergleich der Temperaturen der Rauchsicht, wie sie in den AGB Berechnungen ermittelt wurden, mit der zunächst unterstellten Temperatur  $T_2 = 573$  K ergab folgende mögliche empirische Verbesserung:

$$s_r = \frac{V_{w,ab}}{220 p^{0.3} \sqrt{A_b}} \quad (5.8)$$

mit  $p$  Brandleistung in kW (> 1000 kW).

In Tabelle 5.1 sind die nach (5.8) bestimmten Höhen der rauchfreien Schicht eingetragen. Möglicherweise wird der Einfluß der spez. Abbrandrate etwas überschätzt. Die entsprechende Gegenüberstellung der Näherung nach (5.8) mit den Simulationsergebnissen findet sich in Bild 5.3 (Abschnitt 5.2). Für Brandräume bis zu 2500 m<sup>2</sup> könnte eine genauere Auswertung der AGB Berechnungen (hinsichtlich der Temperaturen) Näherungen auf der Grundlage des Modells von Thomas und Hinkley liefern, welche die Simulationsergebnisse besser als (5.8) abdecken. Da bei großen Brandräumen weitere "Störeinflüsse" hinzutreten, ist die Höhe der rauchfreien Schicht nicht allein von  $T_2$  - neben den anderen hier genannten Parametern - abhängig. Daher wurde eine genauere Analyse hier nicht verfolgt.

		V[m <sup>3</sup> /h]				
		30000	60000	90000	120000	240000
10	20	3.5	5.5	7.2	8.7	> 10.0
	60	2.8	4.4	5.8	7.0	> 10.0
	120	2.4	3.8	5.0	6.1	9.7
20	20	2.4	3.8	5.0	6.0	9.6
	60	1.9	3.0	4.0	4.8	7.7
	120	1.7	2.7	3.5	4.2	6.7
40	20	1.7	2.6	3.4	4.2	6.6
	60		2.1	2.8	3.3	5.3
	120			2.4	2.9	4.6
80	20			2.4	2.9	4.6
	60			1.9	2.3	3.7
	120				2.0	3.2
160	20				2.0	3.2
	60					2.5
	120					2.2

Tabelle 5.1 Werte  $s_r$  (Höhe der rauchfreien Schicht) nach (5.8)

## 5.2 Statistische Auswertung der AGB-Rechenergebnisse

### 5.2.1 Regressionsanalyse - Brandräume 2500 m<sup>2</sup>

Zur Beurteilung des in Abschnitt 4.3 entwickelten Bemessungsvorschlags wurden die in der Anlage 3 zusammengestellten Simulationsergebnisse, den Ergebnissen des Bemessungsvorschlags gegenübergestellt und statistisch ausgewertet. Desweiteren wurde auch die auf der Grundlage des Thomas und Hinkley Modells abgeleitete Näherung (5.8) in gleicher Weise untersucht.

Gemäß dem Bemessungsvorschlag berechnet sich die Höhe der rauchfreien Schicht im stationären Zustand zu:

$$s_r = \frac{V}{50000} + 2.1 - \frac{6.3}{50000} p \quad (\text{Näherung 1})$$

Diese Schichthöhen sind im nachfolgenden Bild 5.2 den Simulationsergebnissen gegenübergestellt.

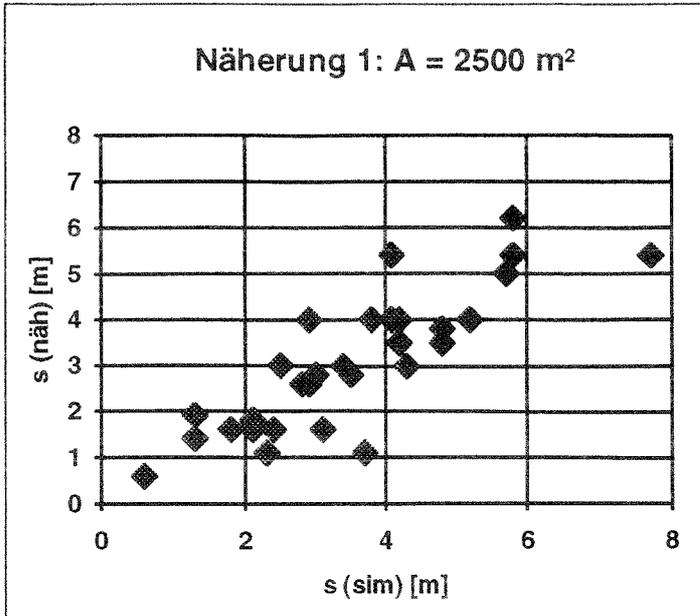


Bild 5.2 Simulationsergebnisse gegenüber Näherung 1

Zum Vergleich, die Näherung nach (5.8):

$$s_r = \left[ \frac{V}{220 p^{0.3} \sqrt{A_B}} \right]^{2/3} \quad (\text{Näherung 2})$$

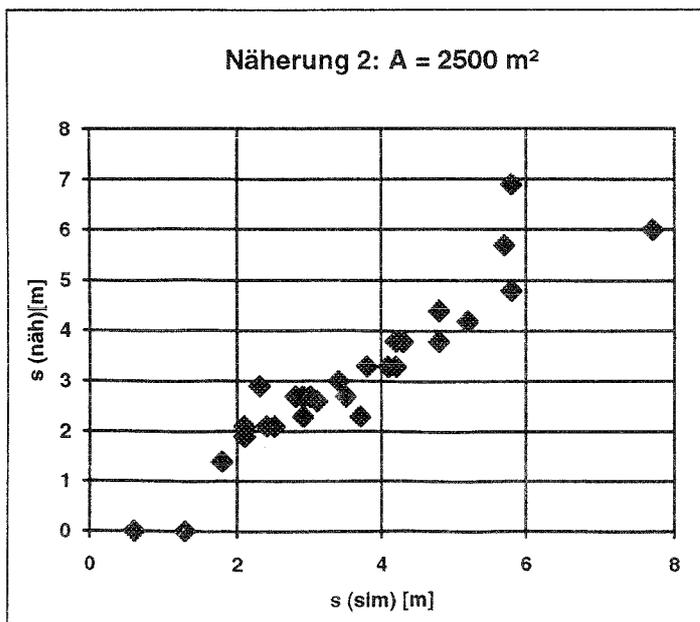


Bild 5.3 Simulationsergebnisse gegenüber Näherung 2

In beiden Fällen werden zunächst nur die Simulationsergebnisse für die 2 500 m<sup>2</sup> Halle (Ein-Raum-Modell) betrachtet. Die statistische Auswertung ergibt folgende Parameter:

Näherung 1:

$$\begin{array}{lll} m_e = -0,49 & m_s(\text{sim}) = 3,5 & m_s(\text{näh}) = 3,1 \\ s_e = 0,8 & s_s(\text{sim}) = 1,5 & s_s(\text{näh}) = 1,4 \end{array}$$

$$\rho = 0,84 \quad b = 0,8 \quad a = 0,23$$

wobei  $e$  der mittlere Fehler  
 $s$  Standardabweichungen von  $e$ ,  $s$   
 $\rho$  der Korrelationskoeffizient  
 $a, b$  Parameter der Regressionsbeziehung  
 $s(\text{näh}) = a + b \times s(\text{sim})$

Näherung 2:

$$\begin{array}{lll} m_e = -0,53 & m_s(\text{sim}) = 3,5 & m_s(\text{näh}) = 3,0 \\ s_e = 0,56 & s_s(\text{sim}) = 1,5 & s_s(\text{näh}) = 1,56 \end{array}$$

$$\rho = 0,94 \quad b = 0,95 \quad a = -0,36$$

Für eine "im Mittel" zutreffende Vorhersage der Simulationsergebnisse, wären beide Näherungen mit den Parametern  $a$  und  $b$  zu korrigieren:

$$s = s(\text{näh})/b - a/b$$

Die Güte der Näherung ist durch den Korrelationskoeffizienten und die Residualstreuung ( $s_e^2$ ) gekennzeichnet. Für das Ein-Raum-Modell scheint zunächst die Näherung 2 geeigneter zu sein als Näherung 1.

### 5.2.2 Regressionsanalyse - 2500 m<sup>2</sup>-10000 m<sup>2</sup>

Betrachtet man nun auch die Simulationsergebnisse der 5000 und 10000 m<sup>2</sup> großen Brandräume (2- und 3-Raum-Modell), wobei hierbei jeweils der ungünstigere Raum betrachtet wurde, erhält man eine Gegenüberstellung von Simulationsergebnissen und Näherung gemäß Bild 5.4 und 5.5.

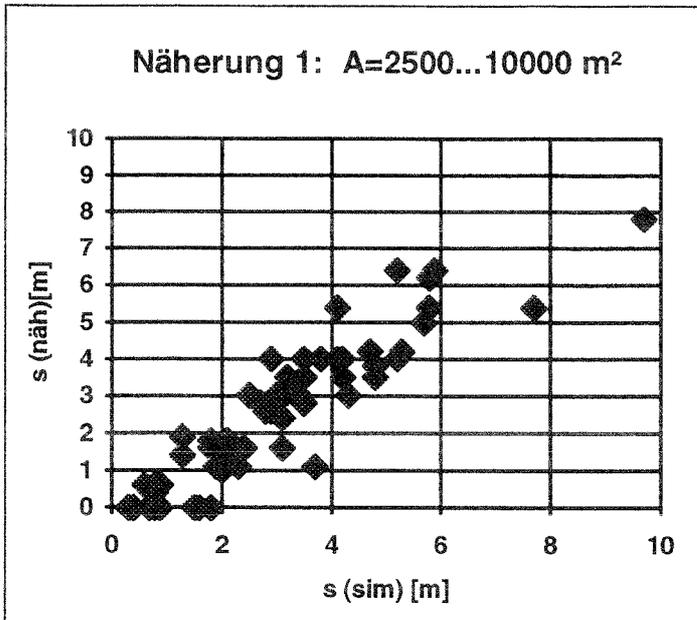


Bild 5.4 Simulationsergebnisse gegenüber Näherung 1

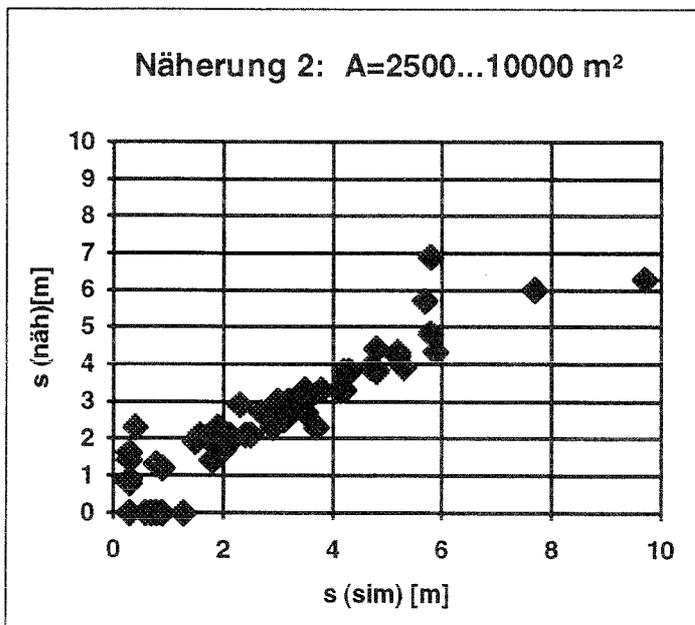


Bild 5.5 Simulationsergebnisse gegenüber Näherung 2

Für die 2500 bis 10000 m<sup>2</sup> großen Brandräume ergibt die statistische Auswertung:

Modell 1

$$\begin{array}{lll}
 m_e = -0,46 & m_S(\text{sim}) = 2,86 & m_S(\text{näh}) = 2,4 \\
 s_e = 0,75 & s_S(\text{sim}) = 1,95 & s_S(\text{näh}) = 1,96
 \end{array}$$

$$\rho = 0,93 \quad b = 0,93 \quad a = -0,27$$

Modell 2:

$$\begin{array}{lll} m_e = -0,36 & m_S (\text{sim}) = 2,86 & m_S (\text{näh}) = 2,5 \\ s_e = 0,64 & s_S (\text{sim}) = 1,94 & s_S (\text{näh}) = 1,6 \end{array}$$

$$\rho = 0,92 \quad b = 0,76 \quad a = 0,32$$

D.h. Näherung 1 ist etwas geeigneter um auch die Simulationsergebnisse des Mehr-  
raummodells abzudecken.

Betrachtet man nur Höhen der rauchfreien Schicht > 2.0 m erhält man folgende statisti-  
sche Auswertung

Näherung 1:

$$\begin{array}{lll} m_e = -0,30 & m_S (\text{sim}) = 4,33 & m_S (\text{näh}) = 4,03 \\ s_e = 0,71 & s_S (\text{sim}) = 1,51 & s_S (\text{näh}) = 1,30 \end{array}$$

$$\rho = 0,84 \quad b = 0,72 \quad a = 0,91$$

Näherung 2:

$$\begin{array}{lll} m_e = -0,46 & m_S (\text{sim}) = 3,83 & m_S (\text{näh}) = 3,37 \\ s_e = 0,54 & s_S (\text{sim}) = 1,18 & s_S (\text{näh}) = 1,76 \end{array}$$

$$\rho = 0,89 \quad b = 0,64 \quad a = 0,93$$

Der Unterschied zwischen beiden Näherungen ist nur gering; da die ggf. korrigierte  
Näherung 1 eine handlichere Bemessungsformel als Näherung 2 liefert, wird  
desweiteren nur Näherung 1 betrachtet.

### 5.2.3 Statistische Interpretation der vorgeschlagenen Bemessungsgleichung

Aufgrund der Regressionsbeziehungen wird zunächst die Mittelwertskorrektur vorge-  
nommen. Als Bemessungsgleichung wird die 10 %-Beziehung ermittelt, die dann - bei  
Ansatz von  $s_e$  - die Modellungenauigkeit der Näherung gegenüber den Simulations-  
ergebnissen berücksichtigt (Mittelwert -  $1.28 \times s_e$ ).

Anm.: Die Modellungenauigkeit der Simulation ist durch entsprechende, auf der siche-  
ren Seite liegende Annahmen, bei der Simulation berücksichtigt worden.

$$\underline{A = 2500 \text{ m}^2}$$

Mittelwert-Korrektur:

$$s = \frac{s(\text{näh}) - 0.23}{0.8}$$

10 % - Fraktile

$$s = \frac{s(\text{näh}) - 0.23}{0.8} - 1.28 \cdot 0.8 = \frac{s(\text{näh})}{0.8} - 1.31$$

$$\underline{A = 2500 \dots 10000 \text{ m}^2}$$

Mittelwert-Korrektur:

$$s = \frac{s(\text{näh}) + 0.27}{0.93}$$

und die 10 % - Fraktile

$$s = \frac{s(\text{näh}) + 0.27}{0.93} - 1.28 \cdot 0.75 = \frac{s(\text{näh})}{0.93} - 0.67$$

$$\underline{A = 2500 \dots 10000 \text{ m}^2, s > 2.0 \text{ m}}$$

Mittelwert-Korrektur:

$$s = \frac{s(\text{näh}) - 0.91}{0.72}$$

10 % Fraktile

$$s = \frac{s(\text{näh}) - 0.91}{0.72} - 1.28 \cdot 0.71 = \frac{s(\text{näh})}{0.72} - 2.17$$

In Bild 5.6 sind für die drei Auswertebereiche (2500 m<sup>2</sup>, 2500-10000m<sup>2</sup>, 2500-10000m<sup>2</sup> (s>2,0 m)) die 10 %-Beziehungen eingetragen. Es zeigt sich, daß Näherung 1 (ohne Korrekturen) schon nahezu der 10 % Linie entspricht und daß die Näherung nicht empfindlich ist gegenüber dem Auswertebereich, so daß es nahezu gleichgültig ist, ob die korrigierte oder die ursprüngliche Näherung 1 für die Bemessung gewählt wird.

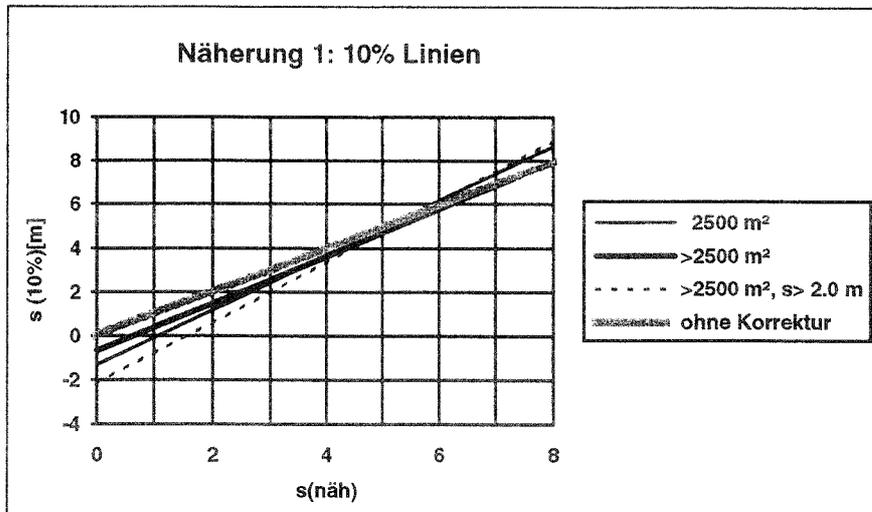


Bild 5.6 Modifikation von Näherung 1 als Bemessungsgleichung

#### 5.2.4 Bewertung

Die in Abschnitt 4.3 empirisch ermittelte Bemessungsgleichung entspricht etwa der 10 % Fraktile, d.h. in 90 % der Fälle ergeben die Simulationsergebnisse etwas größere rauchfreie Schichten.

Sicherlich gibt es auch andere Bemessungsgleichungen, welche die Simulationsergebnisse ebensogut - vielleicht noch besser - eingrenzen. Es wird jedoch auf die Ausführungen in Abschnitt 4.1 und 4.2 verwiesen, in denen als wesentliche Näherung für die Bemessung die Betrachtung des quasi-stationären Zustands angeführt wurde.

Abschließend sind in Bild 5.7 die Sicherheitsabstände, die sich

- aus Betrachtung des stationären Zustands
  - aus der Bemessungsgleichung als 10 % Linie
- ergeben, - nicht maßstäblich - veranschaulicht.

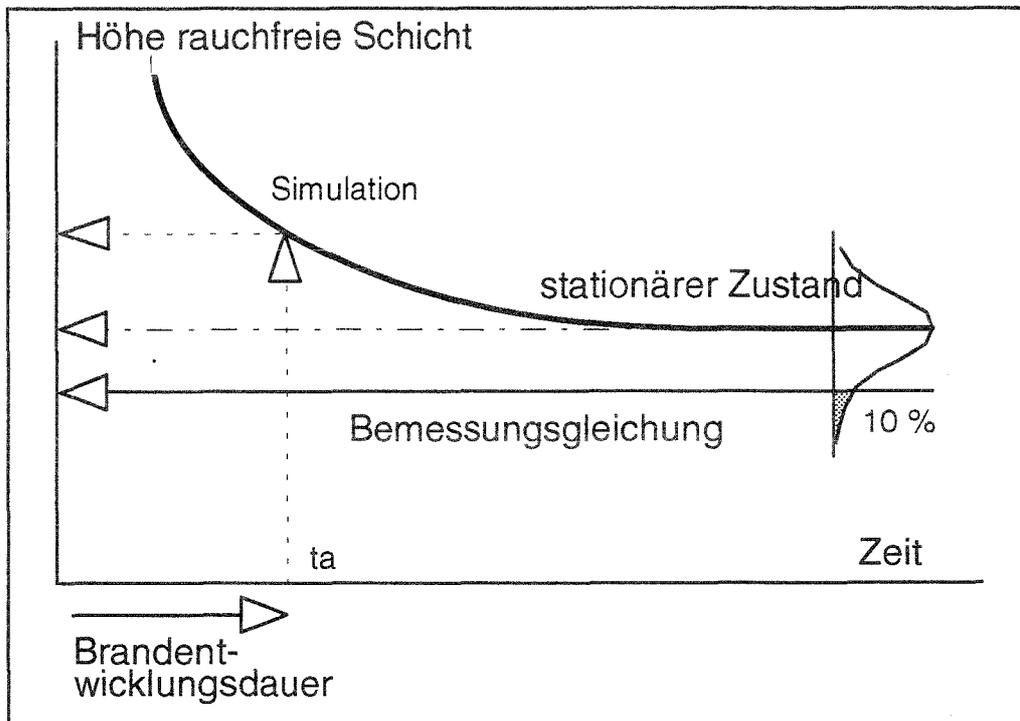


Bild 5.7 Vergleich Simulation mit Bemessungsgleichung (qualitativ)

## 6. Normenvorschlag

Analog zu den RA in 18 232 Teil 2 (und Entwurf Teil 3) werden den Bemessungsgruppen 1 bis 6 (und ggf. 7) Brandflächen zugeordnet. Unter der Maßgabe folgender Zuordnung

1	5 m <sup>2</sup>
2	10 m <sup>2</sup>
3	20 m <sup>2</sup>
4	40 m <sup>2</sup>
5	80 m <sup>2</sup>
6	160 m <sup>2</sup>
(7	320 m <sup>2</sup> )

erhält man für die vorgeschlagene Bemessungsgleichung

$$\text{erf } V_w = 50\,000 (s_r - 2.1) + 6.3 p \quad [\text{m}^3/\text{h}]$$

$$\text{mit } p = A_b r_{sp} H_u$$

erforderliche Volumenströme gemäß Tabelle 6.1, wobei

$$r_{sp} \times H_u = 60 [\text{kg}/\text{hm}^2] \times 4.8 [\text{kWh}/\text{kg}]$$

gesetzt wurde.

Höhe der Rauchfreien Schicht	Volumenströme x 10 <sup>3</sup> [m <sup>3</sup> /h]						
	Bemessungsgruppe						
	1	2	3	4	5	6	(7)
2.5 [m]	29	38	56	92	165	310	600
3	54	63	81	117	190	335	625
4	104	113	131	167	240	385	675
5	154	163	181	217	290	435	725
50 x 10 <sup>3</sup> für jeden weiteren Meter							

Tabelle 6.1 Zusammenstellung erforderlicher Volumenströme für maschinelle Rauchabzüge für Räume > 1000 m<sup>2</sup> (Vorschlag)

Die Arbeitsgemeinschaft Brandsicherheit (AGB) sieht die Tabelle 6.1 als eine Möglichkeit der Normung maschineller Rauchabzüge auf der Basis abgesicherter Rechenergebnisse an. Aus der Vielfalt der durchgeführten Berechnungen und vorliegenden Ergebnisse lassen sich sicher auch andere Vorschläge erarbeiten. Im Hinblick auf die Durchschaubarkeit des linearen Ansatzes und die daraus resultierende einfache Behandlung der äußerst komplexen Vorgänge, die bei einem maschinellen Rauchabzug in großen Brandräumen zu erwarten sind, erscheint die vorgeschlagene Methode als geeignet und praktikable. Statistisch gesehen ergeben sich Werte, die auf der sicheren Seite liegen, ohne daß eine deutliche Überbemessung der maschinellen Abzüge entsteht.

## 7 Zusammenfassung

Im Rahmen eines vom IfBt geförderten Forschungsvorhabens wurden Normenvorschläge für die Bemessung maschineller Rauchabzüge theoretisch erarbeitet. An dem Vorhaben beteiligt waren:

- die Arbeitsgemeinschaft Brandsicherheit (AGB)  
Prof. DDr. Schneider, Dr.-Ing. Kersken-Bradley, Dr.-Ing. Max,
- das Institut für Haustechnik der TU München,  
Akad. Dir. DI Zitzelsberger
- das Materialprüfungsamt Dortmund des Landes NRW  
Herr Dipl.-Phys. Ueberall.

Ziel dieses Vorhabens war, die vorhandenen Erkenntnisse über maschinelle Rauchabzüge theoretisch zu vertiefen und soweit möglich, die Entwicklung eines für die Normung geeigneten Bemessungsverfahrens unterstützend zu begleiten. Dazu wurden auf der Basis praktisch relevanter Parametersätze und unter Berücksichtigung realistischer Abbrandszenarien in Industrie- und Gewerbebauten umfangreiche Simulationsrechnungen mit einem Mehr-Raum-Zonen-Modell (MRFC) durchgeführt, um die zu erwartenden

- Temperaturen
- Rauchsichtdicken
- Verrauchungszeiten

zu berechnen. Brandabschnitte von 2500 bis 10.000 qm Grundfläche, mit Brandflächen bis 320 qm und Ventilationsraten bis 360.000 m<sup>3</sup>/h wurden untersucht. Die zugehörigen Parameterdaten und Rechenergebnisse sind in einem Anhang zu diesem Bericht vollständig zusammengestellt.

Aus den Rechenergebnissen wurde eine einfache Bemessungsgleichung, welche die Ventilation, Abbrandleistung und rauchfreie Schichtdicke untereinander linear verbindet, abgeleitet. Diese Gleichung liefert realistische und auf der sicheren Seite liegende Ventilationsraten für maschinelle Rauchabzüge im Rahmen des ausgewählten Parameterbereiches.

Die AGB schlägt vor, diesen Ansatz und die übrigen Ergebnisse der vorliegenden Studie in die Diskussion der Normvorschläge einzubeziehen.

Aufgrund der vorliegenden Berechnungen kann auch gesagt werden, daß in großen Brandabschnitten die Rauchgastemperaturen im allgemeinen die 300°C-Grenze nicht überschreiten. Eine mehrstündige Bemessung von Ven-

tilatoren für 600°C und mehr erscheint angesichts dieser Ergebnisse als nicht zweckmäßig.

Aus den Ergebnissen ist weiterhin abzuleiten, daß die Anordnung von Rauchschürzen eine Verbesserung der Rauchverteilung nur dann ermöglicht, wenn die Schürze mit Sicherheit nicht vom Rauch unterlaufen wird. Im Hinblick auf die praktischen Schwierigkeiten bei der Ausbildung von Rauchschürzen (Verlust an freiem Arbeitsraum) wird bei maschinellen Abzügen empfohlen, relativ große Rauchabschnitte zuzulassen bzw. auf Rauchabschnitte zu verzichten.

Aufgrund der begrenzten Forschungsmittel und des kurzen Forschungszeitraumes konnten in dem Vorhaben nicht alle Detailprobleme der maschinellen Rauchabfuhr behandelt werden. Soweit allgemeine Bemessungsvorschläge für z. B.

- zeitabhängig gesteuerte Zuluftöffnungen,
- nur punktuell absaugende Dachaggregate,
- sehr kleine Brandabschnitte,
- turmartige Räume

erforderlich werden, sind weiterführende Untersuchungen unabdingbar. Ob diese Fälle überhaupt als normungsfähig anzusehen sind, müßte erst diskutiert werden, weil in den o. g. Fällen u. a. eine nicht unerhebliche Auswirkung der Lage des Brandherdes auf die Rechenergebnisse zu erwarten ist. Es muß davor gewarnt werden, die Komplexität der maschinellen Rauchabfuhr durch zu grobe Vereinfachungen zu verwischen. Dieses führt ggf. zu physikalisch falschen Ergebnissen oder wirtschaftlich nicht mehr vertretbare Überbemessungen der Anlagen.

Für Sonderfälle sollte die Norm unseres Erachtens auf jeden Fall auch die Möglichkeit eines genaueren Einzelnachweises auf der Basis der hier verwendeten Eingangsdaten (spez. Abbrand, Brandausbreitungsgeschwindigkeit etc.) ermöglichen. Die vorgeschlagene Bemessungstabelle liegt auf der sicheren Seite, sodaß sich bei speziellen Bauausführungen im Hinblick auf besonders wirtschaftliche Lösungen ein genauerer Nachweis lohnen würde.

Es wird empfohlen, die Referenzdaten dieser Studie über die Brandszenarien in die Erläuterungen der Norm zu übernehmen, sodaß für den Einzelnachweis angepaßte Eingangsparameter zur Verfügung stehen. Damit wäre eine große Unsicherheit in bezug auf die Bewertung von Rechenergebnissen von vornherein ausgeräumt. Im übrigen wäre das Aufnehmen von diesen Daten in die Norm als Pionierarbeit in bezug auf die Einführung von nachprüfbareren Rechenverfahren in die Praxis zu bewerten.

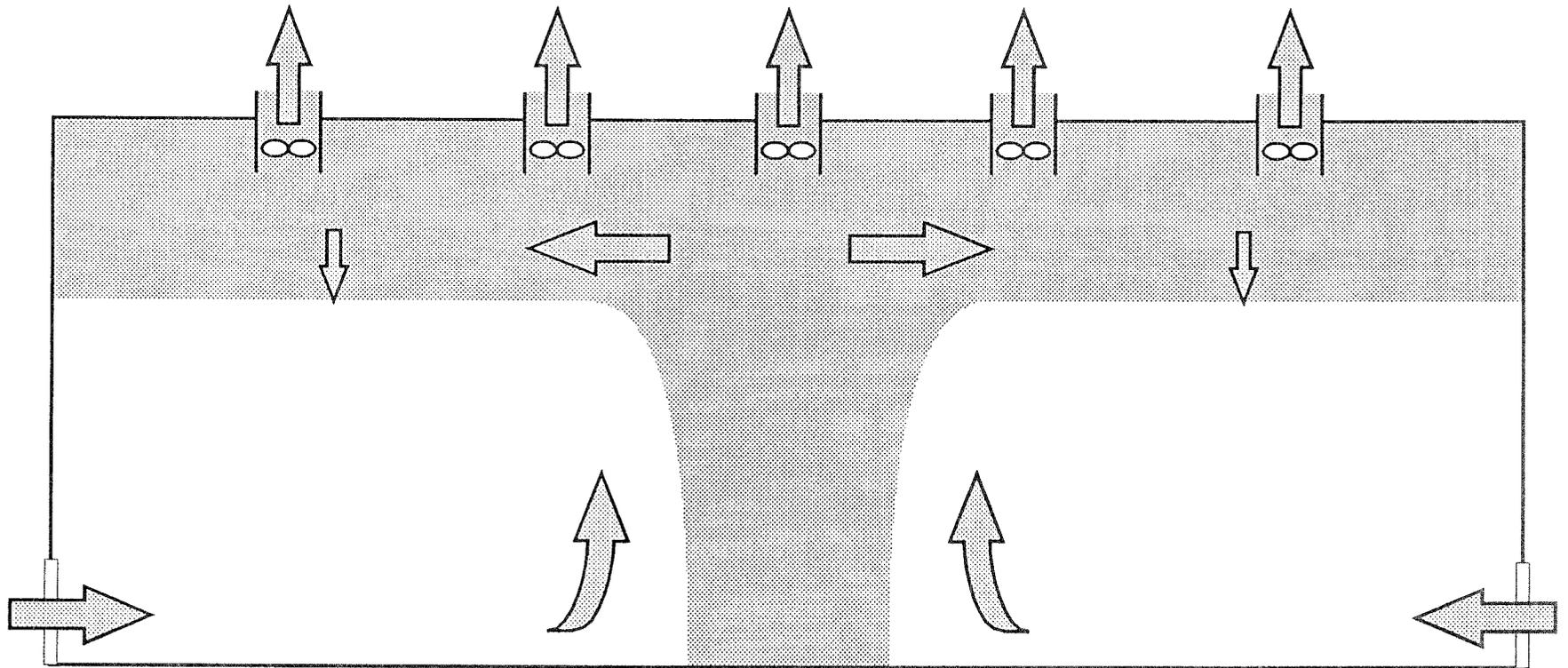
## 8 Literaturverzeichnis

- /1/ John, R.: Rauchabführung aus hohen und weitläufigen Bauwerken im Brandfall für den Personenschutz. Forschungsbericht Nr. 79, Forschungsstelle für Brandschutztechnik, Universität Karlsruhe, Dez. 1991
- /2/ Kramer, C. et al.: Bemessung von maschinellen Rauchabzügen. Abschlußbericht 3/1/64/86, Strömungslaboratorium FH Aachen, Okt. 1986
- /3/ Kramer, C. et al.: Grundlagen zur Bemessung maschineller Rauch- und Wärmeabzüge. Abschlußbericht 3/1/17/88, Strömungslaboratorium der FH Aachen, März 1988
- /4/ Theobald, C.R.: Growth and development of fire in industrial buildings. CP 40/78, BRE Fire Research Station, Borehamwood, 1978
- /5/ Hinkley, P.L.: Rates of production of hot gases in roof venting experiments. Fire safety Journal 10, page 57-65, Elsevier Sequoia, Amsterdam
- /6/ Hinkley, P.L.: Smoke and heat venting NFPA Fire Protection Handbook, Section 2, Chapter 3, p 2-33 to 2-44, New York, 1985
- /7/ Schneider, U. et al.: Neuberechnung der Wärmeabzugsfaktoren  $w$  für die DIN V 18 230 Teil 1 - Baulicher Brandschutz im Industriebau. Forschungsbericht der AGB, Institut für Bautechnik, Berlin 1990
- /8/ Max, U.: Zur Berechnung der Ausbreitung von Feuer und Rauch in komplexen Gebäuden. Dissertation GhK, Kassel, 1990
- /9/ Heins, T.: Untersuchungen über die Brand- und Rauchentwicklung in unterirdischen Verkehrsanlagen - Katastrophenschutz in Verkehrstunneln. Schriftenreihe Forschung des BM f. RB u. S., Heft Nr. 481, Bonn, 1990
- /10/ Schneider, U. et al.: Flucht- und Rettungswege in Gebäuden der Automobilindustrie. Abschlußbericht der AGB, Kassel, Sept. 1989
- /11/ Kramer, C. et al.: Windeffects on heat and smoke control of industrial buildings in case of a fire. J. of Wind Eng. and Ind. Aerodynamics, 36, p. 499-508, Elsevier Science Publ., Amsterdam
- /12/ Ueberall, T.: Untersuchungen und Auswertungen über die Abbrandleistungen bei Industriebränden, (persönliche Mitteilung), Erwitte, 1992
- /13/ Schneider, U. et al.: Beurteilung der Wirksamkeit maschineller Rauchabzüge. Bundesbaublatt, Heft 7, S. 556-561, Juli 1993

- /14/ Thomas, P.H.: Über neuere Untersuchungen von Bränden an Modellen. VFDB-Zeitschrift, 10, Nr. 4, S. 146-154, 1961
- /15/ Seeger, P. G.: Über Modellversuche in der Brandschutztechnik. VFDB-Zeitschrift, Nr. 1 und Nr. 2, S. 37 - 44 und S. 91-94, 1970
- /16/ Schneider, U.; Kersken-Bradley, M.: Bemessungsregeln für maschinelle Rauchabzüge auf der Grundlage von Wärmebilanzrechnungen. AGB Zwischenbericht Nr. 1/92, Wien, München, Nov. 1992
- /17/ Schneider, U.: Concrete at High Temperatures - A General Review. Fire Safety Journal, No. 13, p. 55-68, 1988

# 1 - Raum - Modell

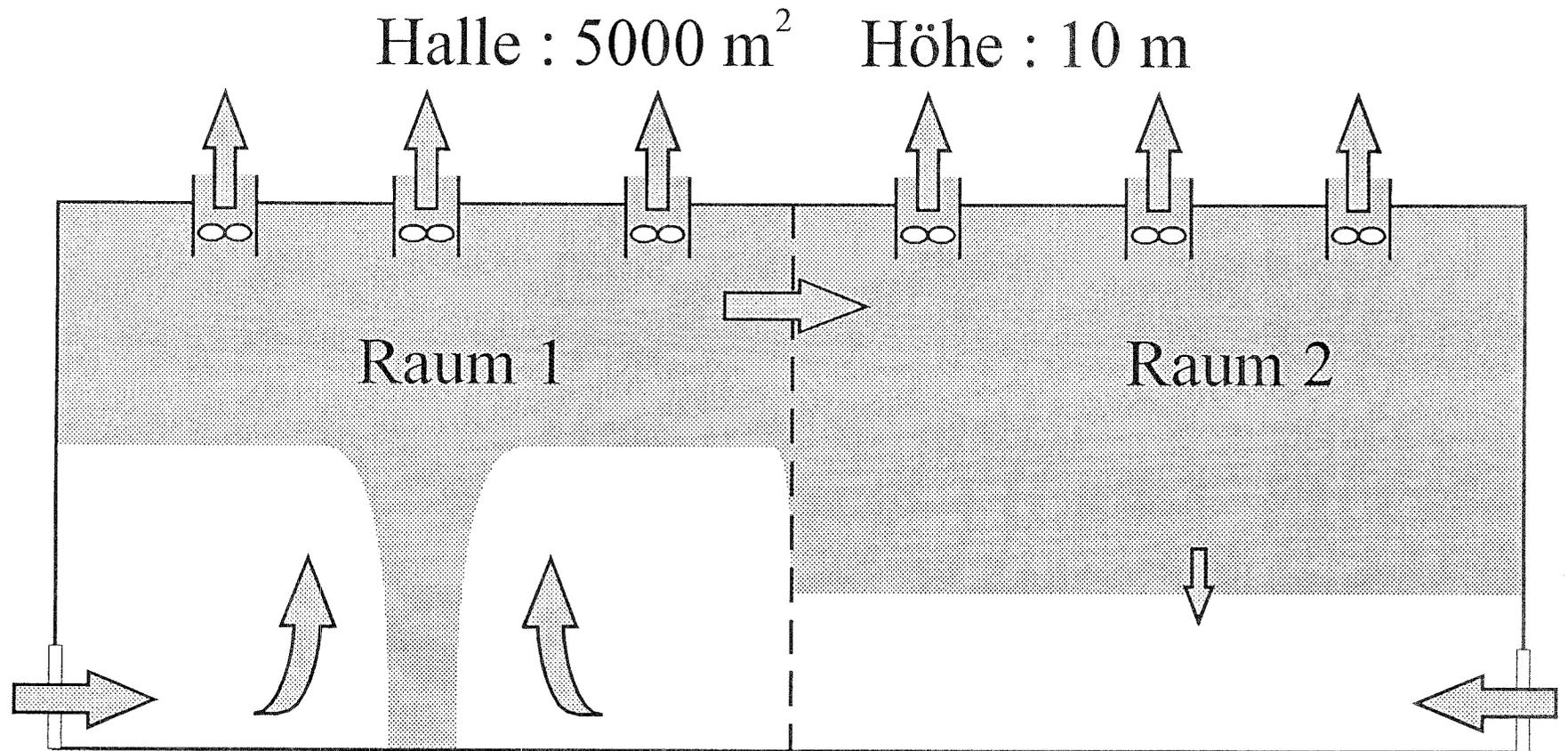
Halle : 2500 m<sup>2</sup> Höhe : 10 m



max. Zuluft : 0.64 % (Türöffnungen)  
max. Brandleistung : 11.5 MW (23 MW , 5.7 MW)  
masch. Abzug MA : gleichmäßig verteilt  
Auslösung MA : nach 2 Minuten

Abb.: 1 Szenarium des 2500 m<sup>2</sup> Brandbereiches zur Berechnung der maschinellen Rauchabfuhr

## 2 - Raum - Modell

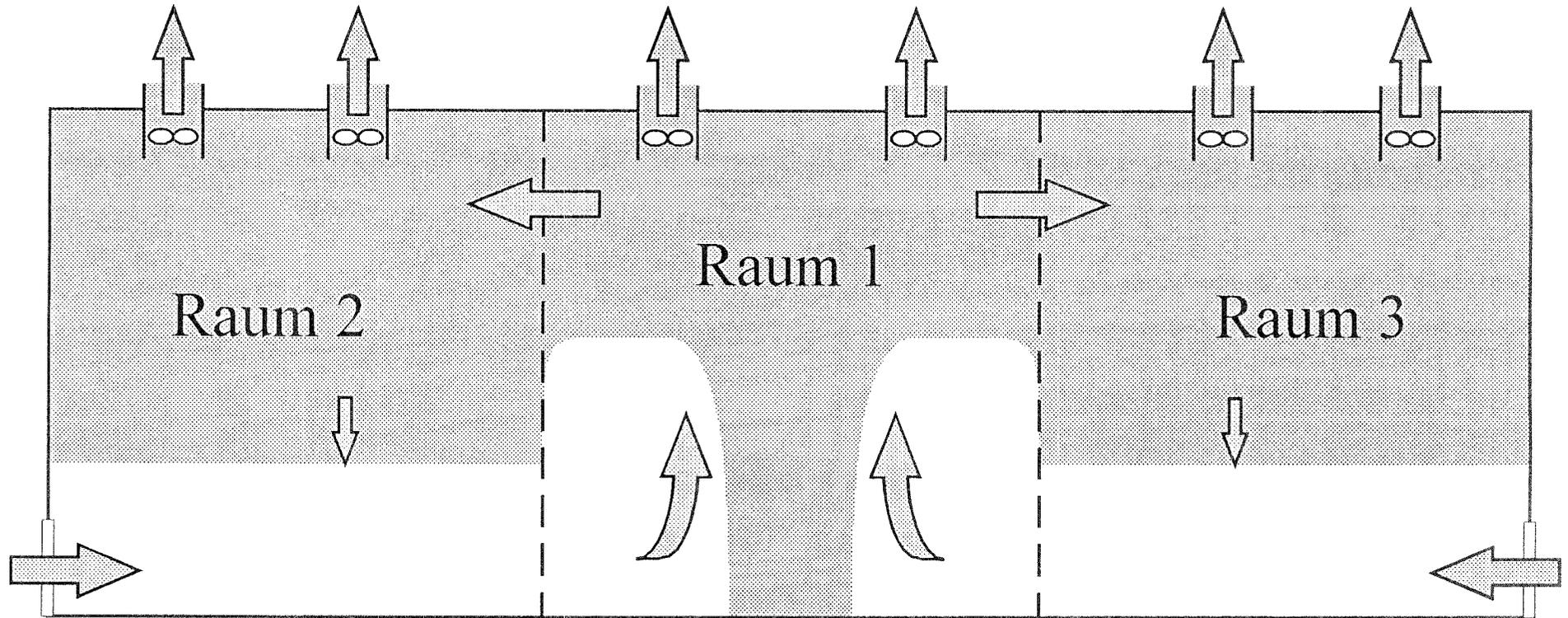


- max. Zuluft : 0.64 % (Türöffnungen)
- max. Brandleistung : 23 MW (46 MW , 11.5 MW)
- masch. Abzug MA : gleichmäßig verteilt
- Auslösung MA : nach 2 Minuten

Abb.: 2 Szenarium II des 5000 m<sup>2</sup> Brandbereiches zur Berechnung der maschinellen Rauchabfuhr

### 3 - Raum - Modell

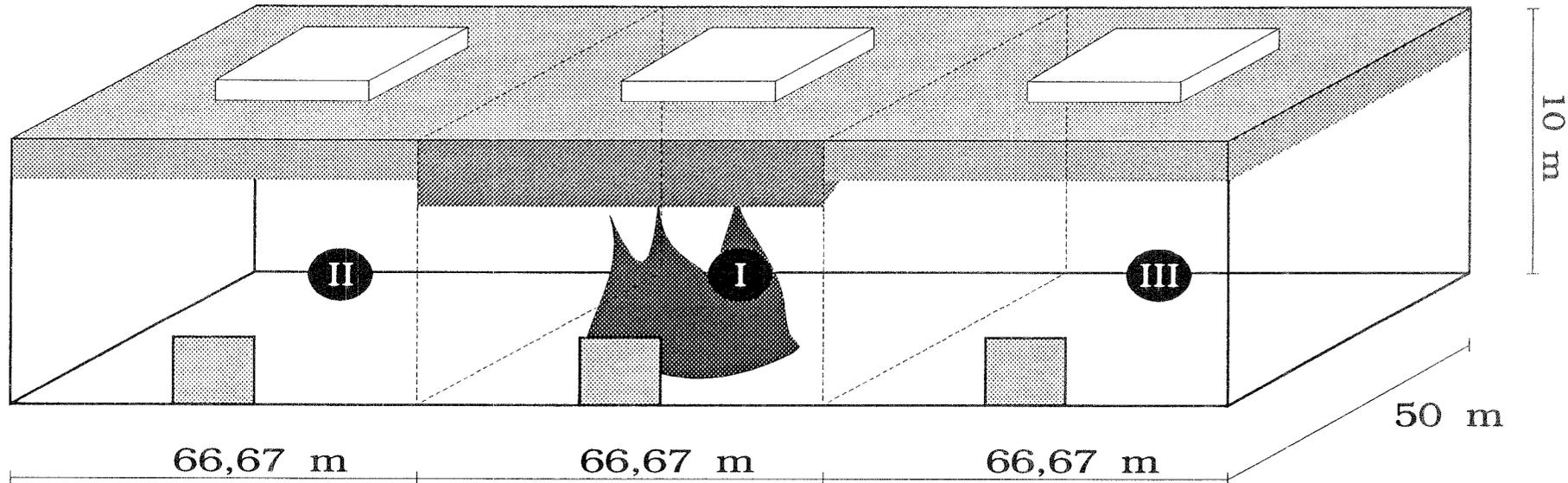
Halle : 10000 m<sup>2</sup> Höhe : 10 m



- max. Zuluft : 0.64 % (Türöffnungen)
- max. Brandleistung : 46 MW (92 MW , 23 MW)
- masch. Abzug MA : gleichmäßig verteilt
- Auslösung MA : nach 2 Minuten

Abb.: 3 Szenarium II des 10000 m<sup>2</sup> Brandbereiches zur Berechnung der maschinellen Rauchabfuhr

# Scenarium 10000 m<sup>2</sup> virtuelles 3-Raummodell

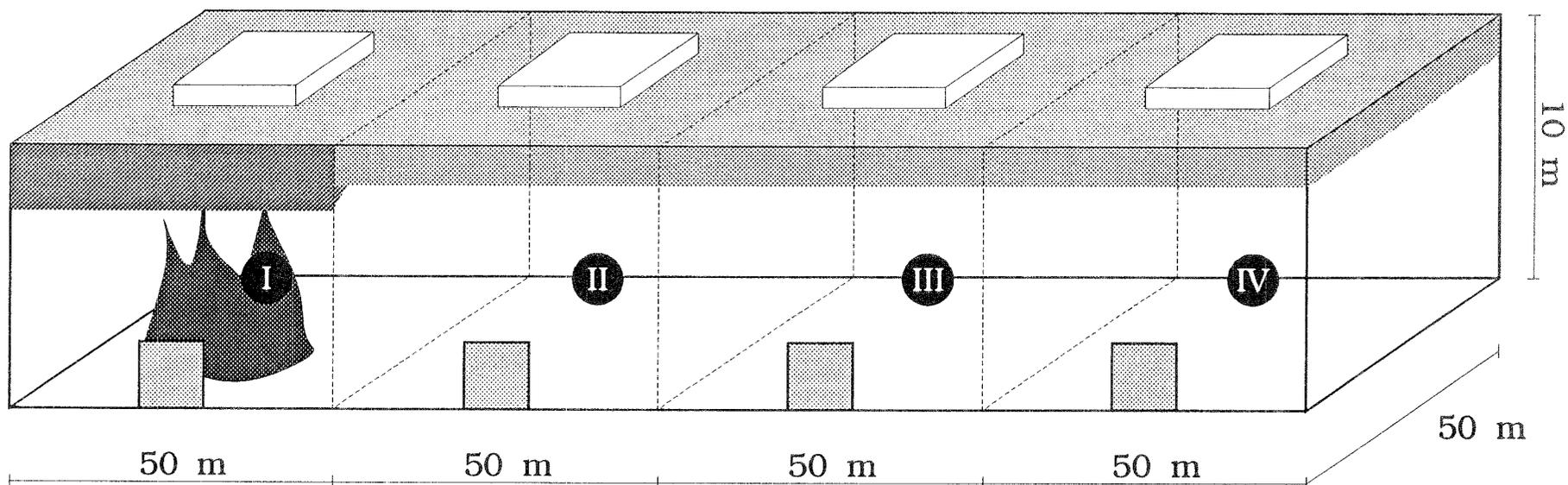


Zuluft (Fluchttüren)	:	64m <sup>2</sup>	8 x 2*2 m <sup>2</sup>
Brandherd	:	0,3x0,3 m	
maximale Brandfläche	:	20 m <sup>2</sup>	(40, 80, 160, 320 m <sup>2</sup> )
Abbrandgeschwindigkeit	:	60 kg/m <sup>2</sup> h	
Ventilation (nach 2 min)	:	120000 bis 360000 m <sup>3</sup> /h	

Abb.: 4 Brandszenarium II des 10000 m<sup>2</sup>  
Brandbereiches in räumlicher Darstellung

# Scenarium 10000 m<sup>2</sup>

virtuelles 4-Raummodell



Zuluft : 32m<sup>2</sup> 4 x 4\*2 m<sup>2</sup>

Brandherd : 0,3x0,3 m

Brandfläche : 20 m<sup>2</sup> 260 m<sup>2</sup>

Abbrandgeschwindigkeit : 20 60 120 kg/m<sup>2</sup>h

Ventilation (nach 2 min) : 4x30000m<sup>3</sup> 8x30000m<sup>3</sup>

Alternativ : Ausbreitung 1,0 m/min 260 m<sup>2</sup> 20 kg/m<sup>2</sup>h 4x30000m<sup>3</sup>

Abb.: 5 Brandszenarium III des 10000 m<sup>2</sup>  
Brandbereiches in räumlicher Darstellung

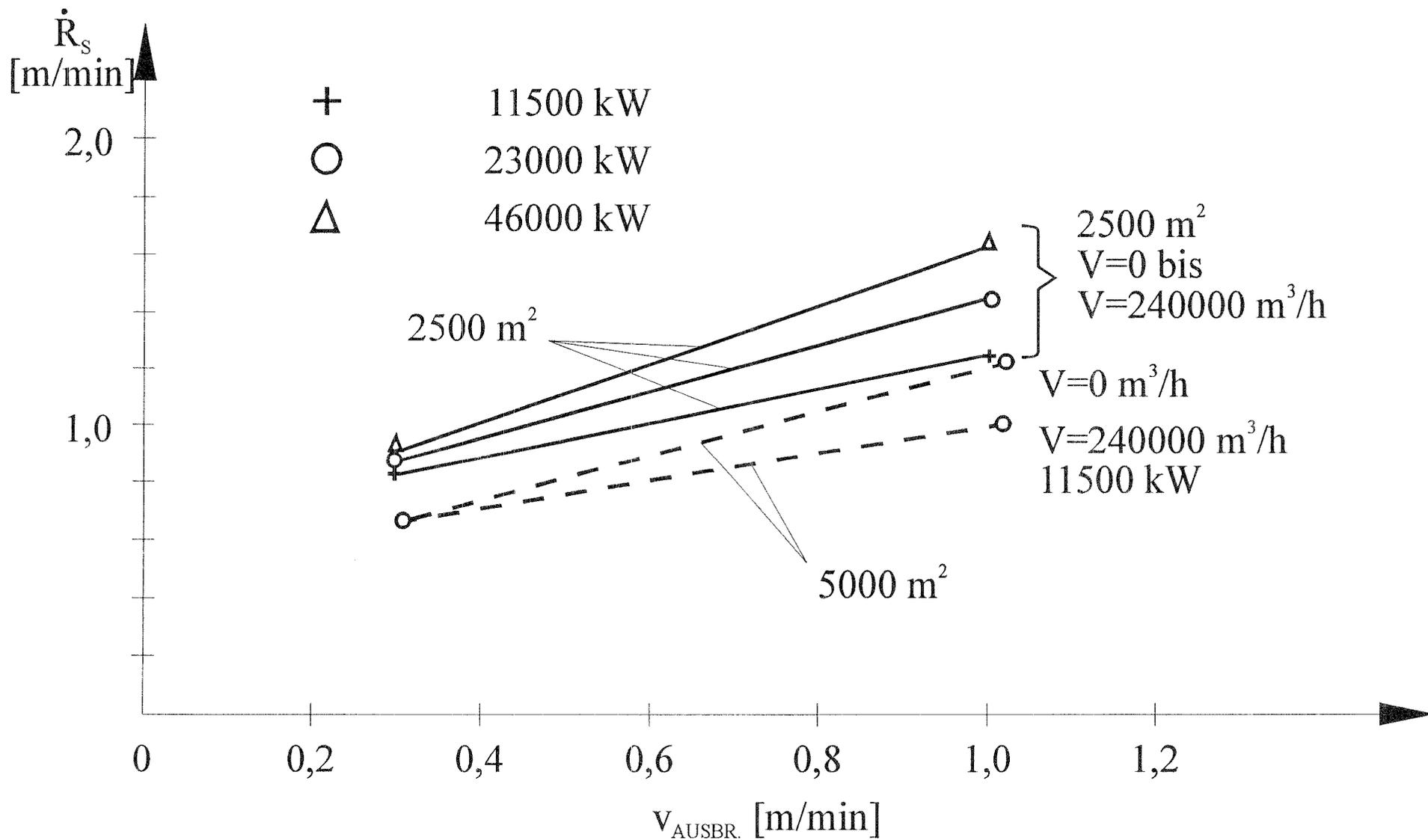


Abb.: 6 Berechnete Sinkgeschwindigkeiten der Rauchsichten in 2500 m<sup>2</sup> und 5000 m<sup>2</sup> großen Hallen bei maschineller Rauchabfuhr

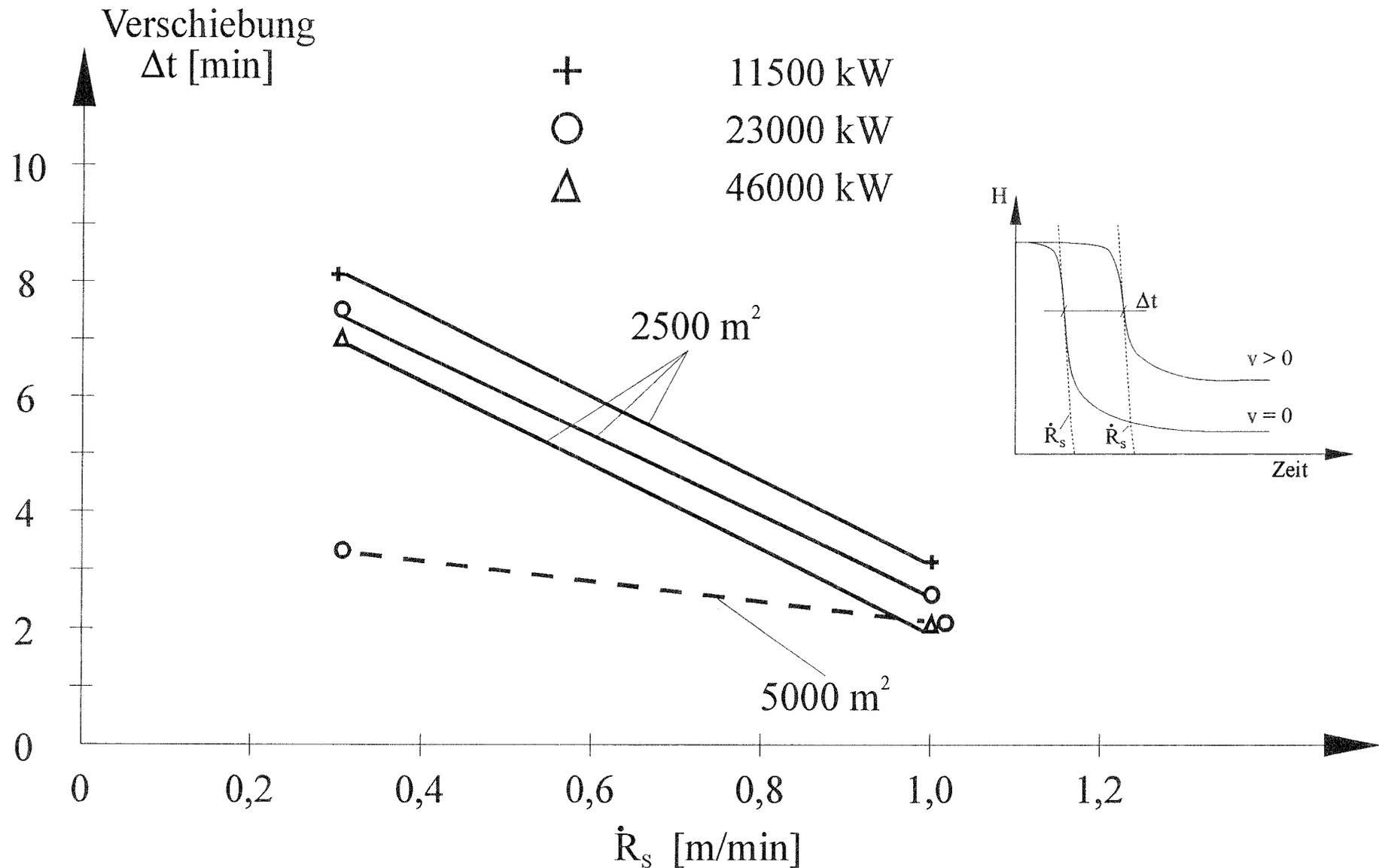


Abb.: 7 Zeitliche Verschiebung bis zum Absinken der Rauchsichten infolge der maschinellen Rauchabfuhr

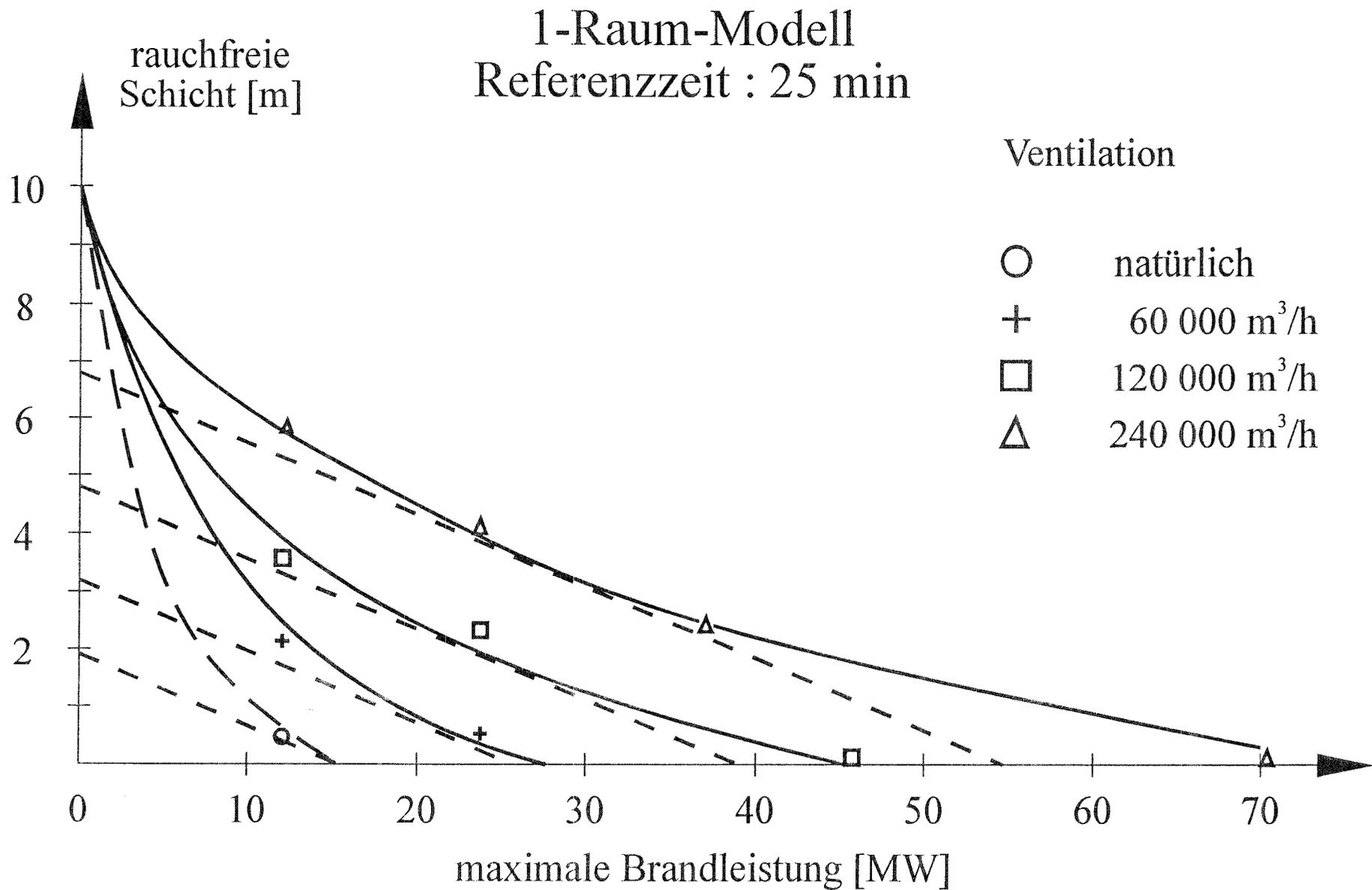


Abb.: 8 Entwicklung der Rauchsicht in einer 2500 m<sup>2</sup> Halle von 10 m Höhe bei maschineller Rauchabfuhr

# 1-Raum-Modell

Referenzzeit : 25 min

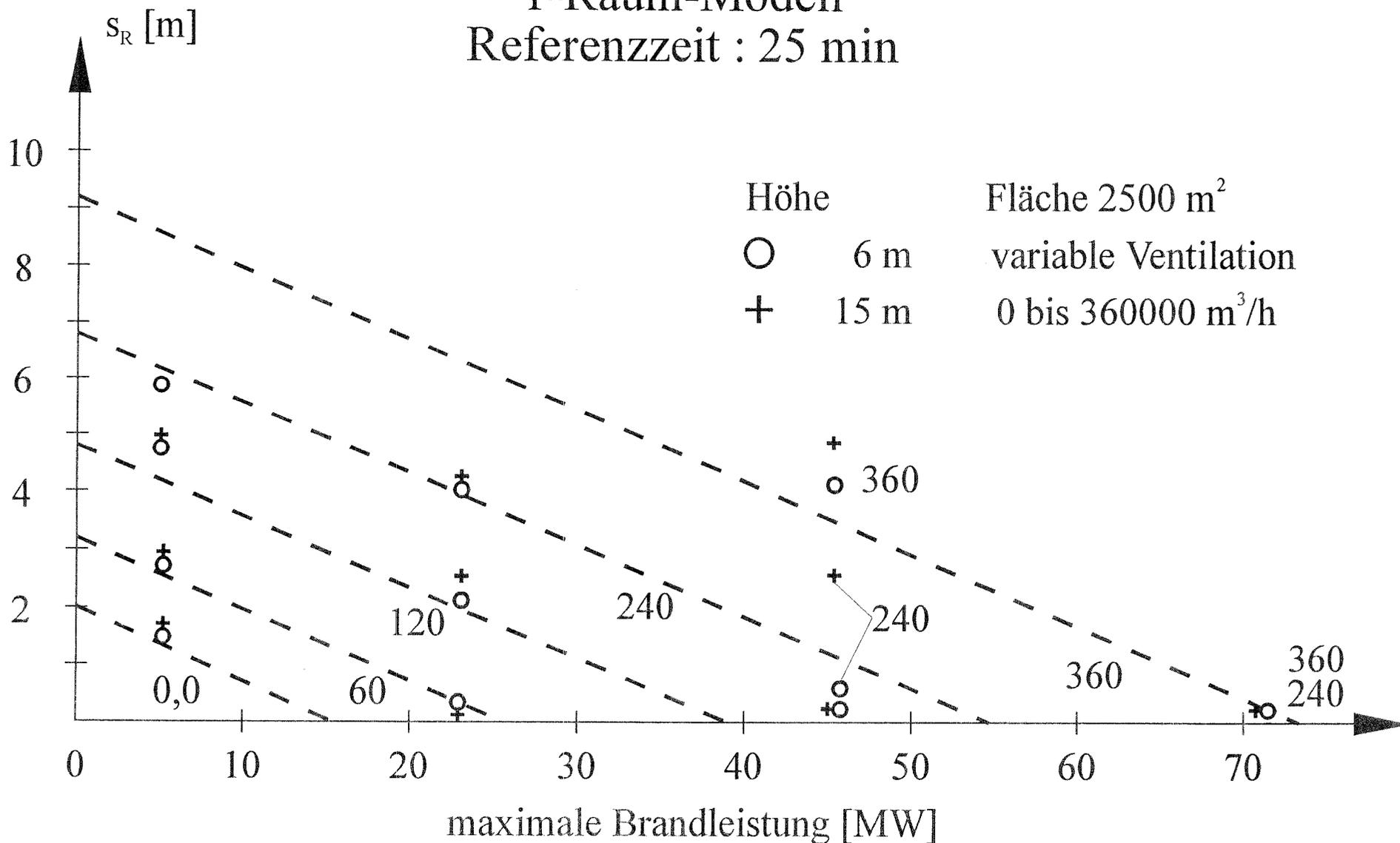


Abb.: 9 Entwicklung der Rauchsicht in einer 2500 m<sup>2</sup> Halle von 6 und 15 m Höhe bei maschineller Rauchabfuhr

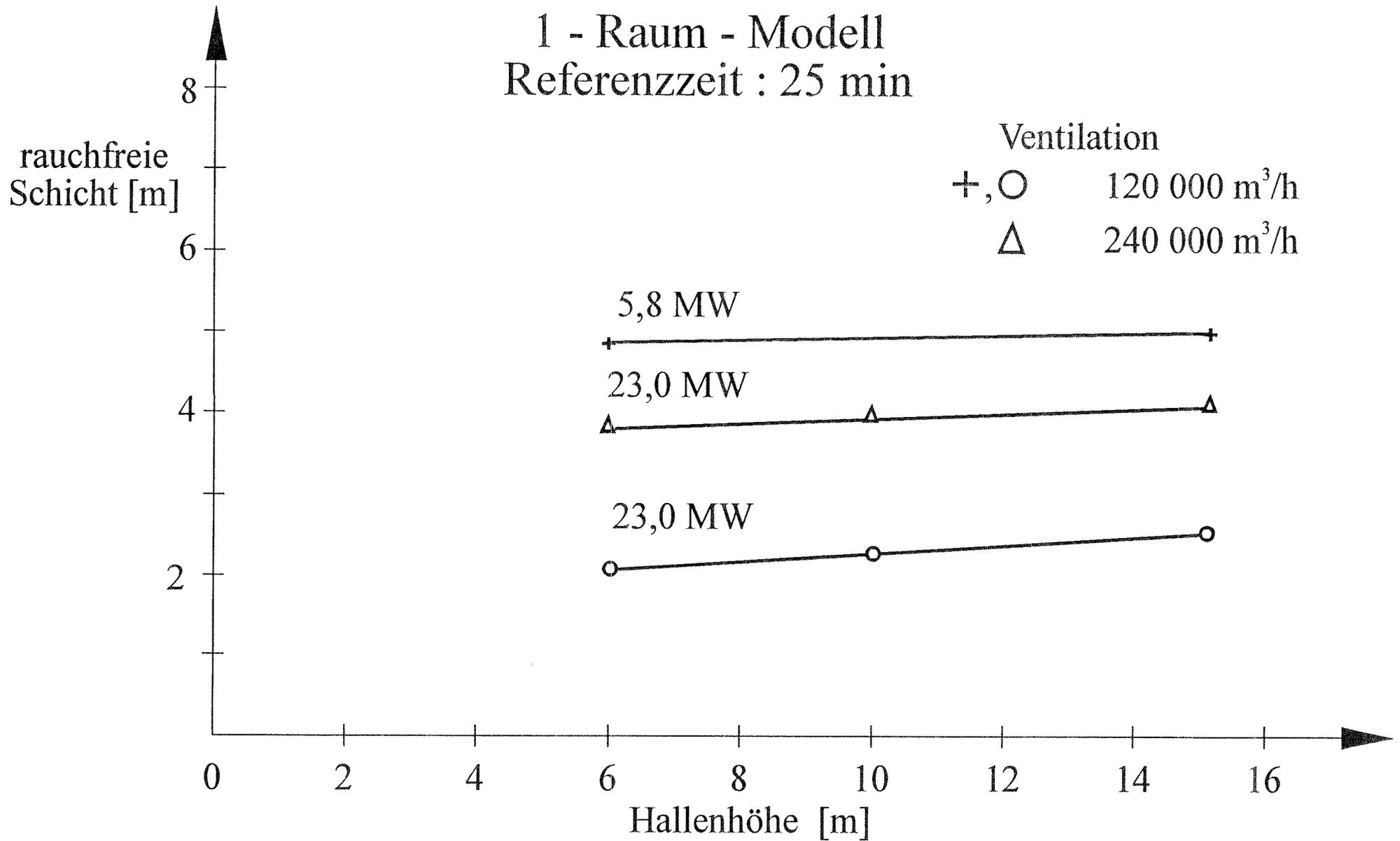


Abb.: 10 Einfluß der Hallenhöhe auf die rauchfreie Schicht in einer 2500 m<sup>2</sup> Halle bei maschineller Rauchabfuhr

## 2-Raum-Modell Referenzzeit : 25 min

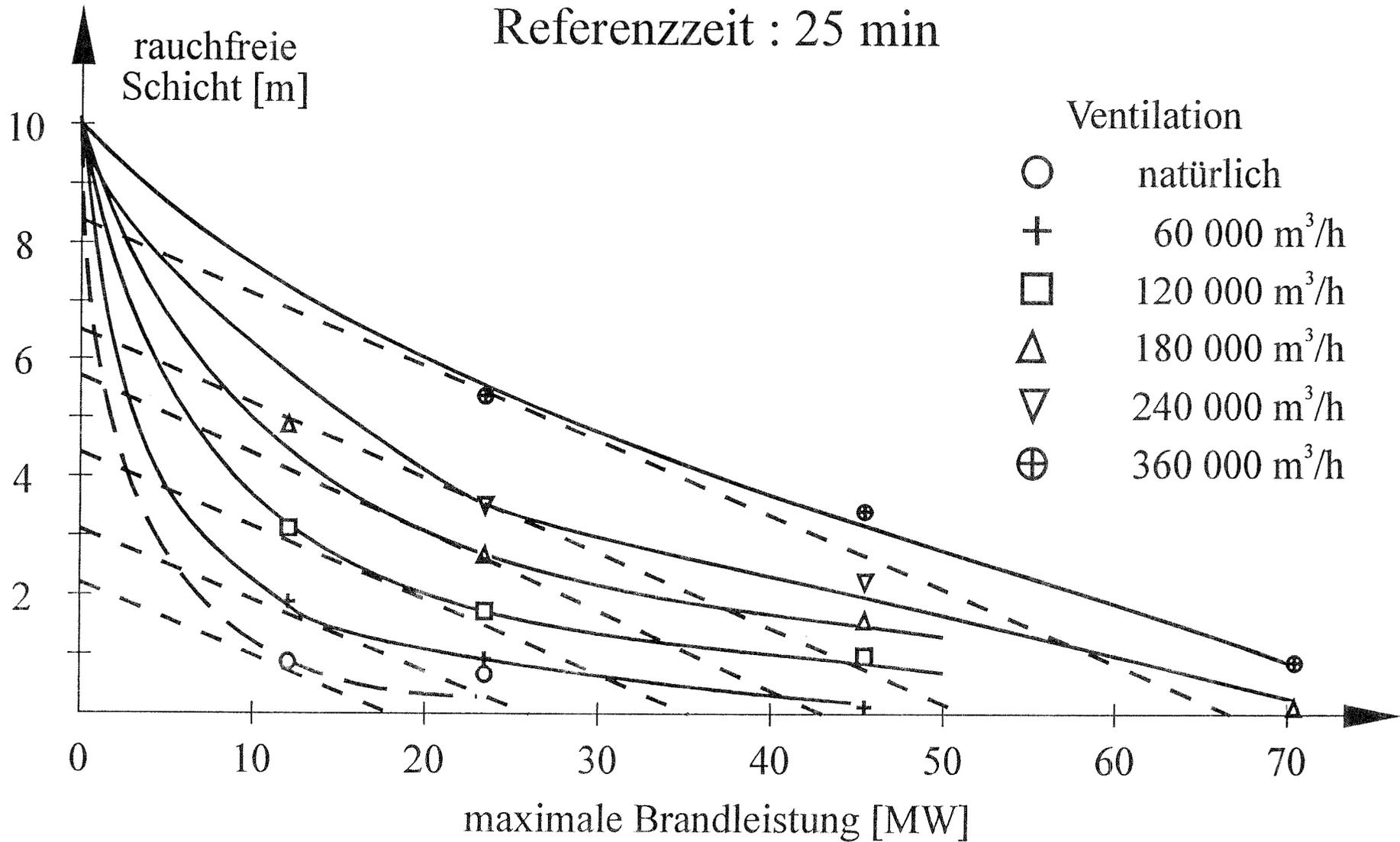


Abb.:11 Entwicklung der Rauchsicht in einer 5000 m<sup>2</sup> Halle von 10 m Höhe bei maschineller Rauchabfuhr

### 3-Raum-Modell Referenzzeit : 25 min

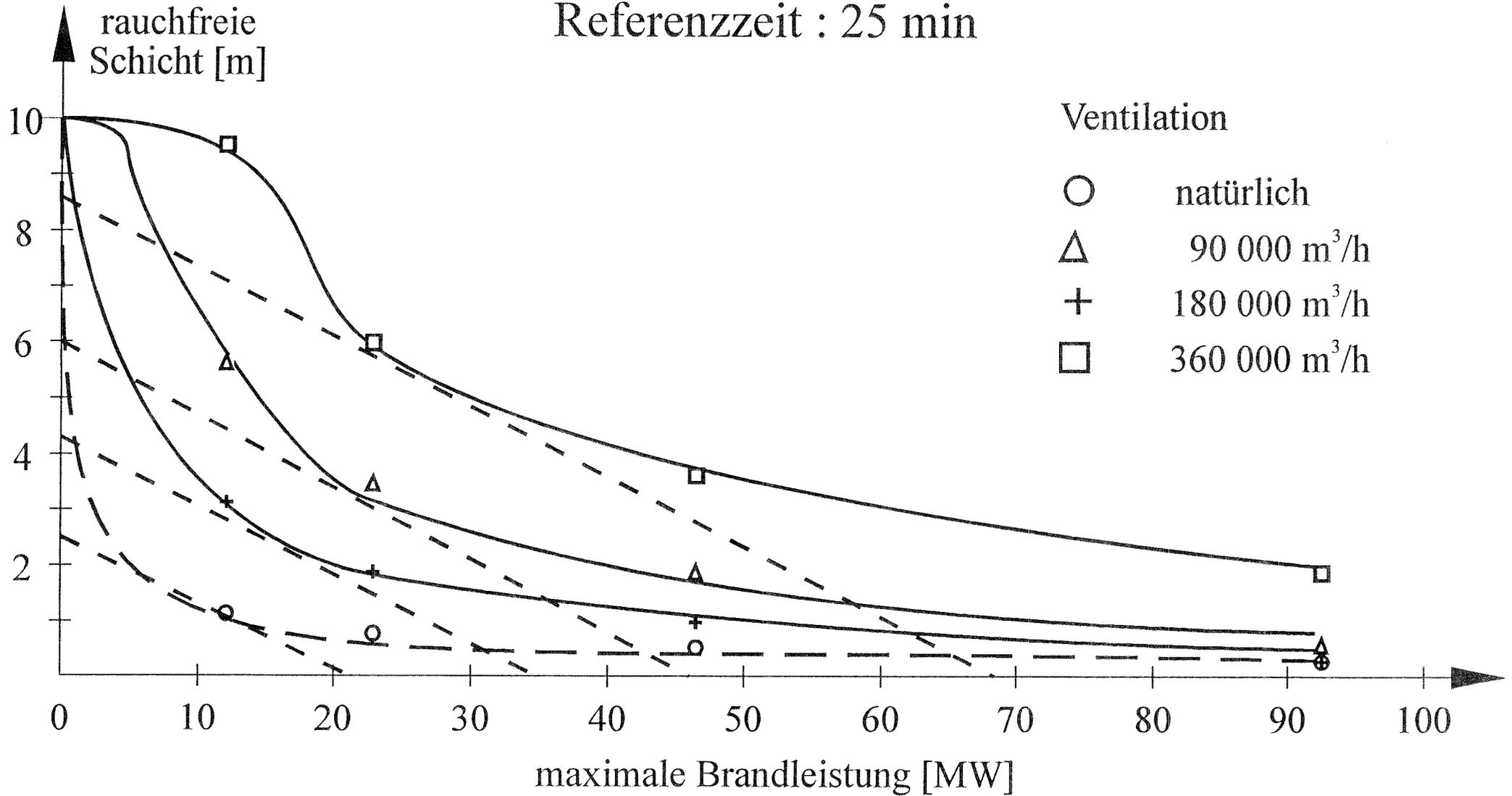


Abb.: 12 Entwicklung der Rauchsicht in einer 10000 m<sup>2</sup> Halle von 10 m Höhe bei maschineller Rauchabfuhr

Referenzzeit : 25 min

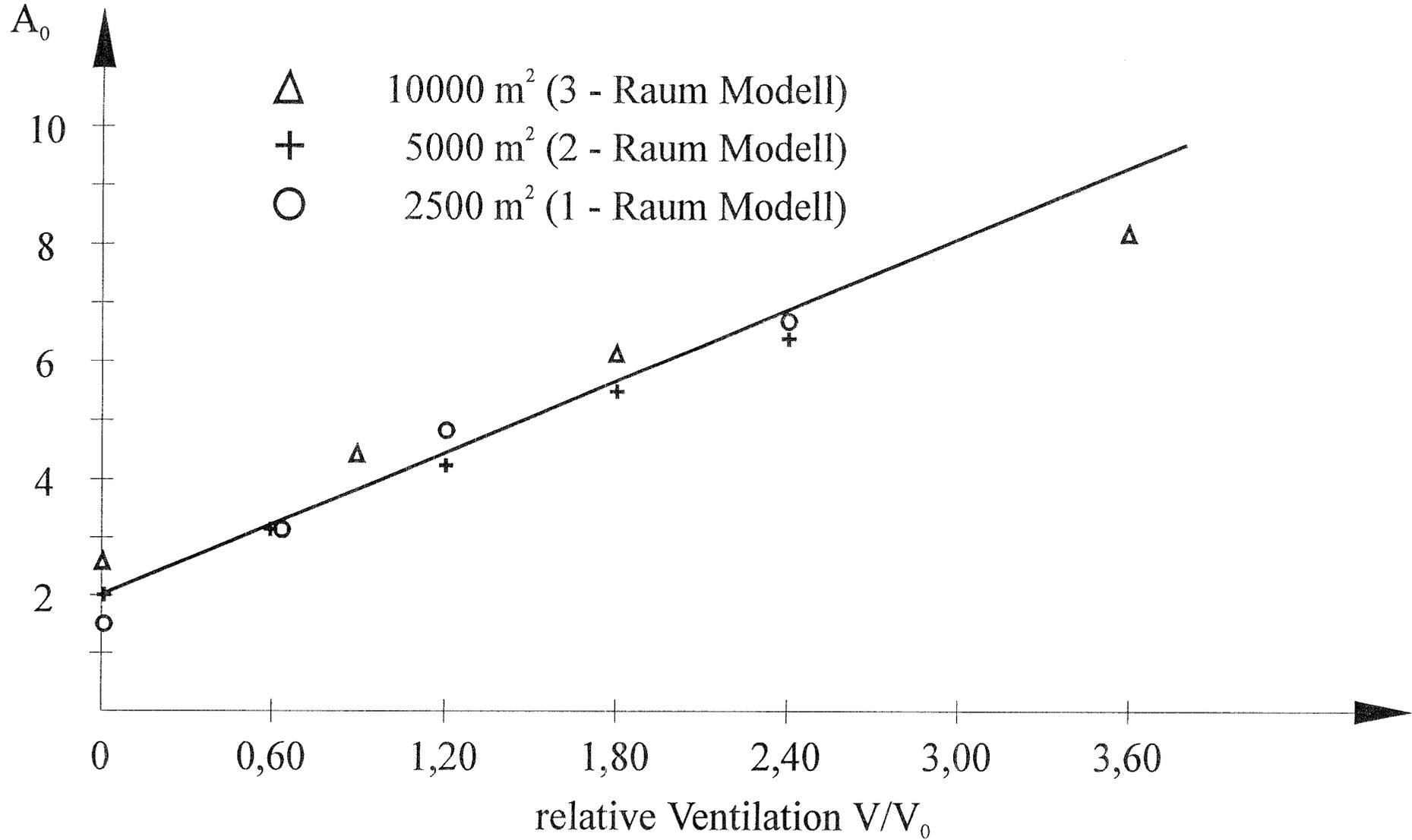


Abb.:13 Ventilationsfaktor des linearisierten Bemessungsmodell für maschinelle Rauchabzüge

T 2569/1-2

## **Bemessungsregeln für maschinelle Rauchabzüge auf der Grundlage von Wärmebilanzrechnungen**

### **Kurzfassung**

R  
Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens sollten die vorhandenen Kenntnisse über maschinelle Rauchabzüge vertieft werden um auch die Entwicklung von Bemessungsregeln unterstützend zu begleiten. Hierfür wurden umfangreiche Wärmebilanzrechnungen mit einem Mehr-Raum-Zonen-Modell (MRFC) durchgeführt. Parametersätze wurden so gewählt, daß sie Brandszenarien in Industriebauten abdecken. Dabei wurden u.a. folgende Parameter variiert: Die Raumgröße und -höhe, Ventilation, Abbrandleistung bzw. Größe des Brandes unter Berücksichtigung der Brandausbreitung. Simulationsergebnisse sind die zeitliche Entwicklung der Rauchsichtdicken und der Temperaturen im Brandraum bzw. in den verschiedenen Bereichen des Brandraumes.

Die entscheidenden Einflußgrößen auf die Entwicklung der Rauchsicht sind die Abbrandleistung und die Ventilation. Für den stationären Zustand wird eine einfache Bemessungsgleichung für die erforderliche Ventilation in Abhängigkeit der angestrebten Höhe der rauchfreien Schicht angegeben. Der Bemessungsvorschlag gilt für große Brandräume und liegt auf der sicheren Seite. Für Sonderfälle wie turmartige Bauwerke oder nur punktuelle Abzugstellen werden weiterhin Einzelnachweise erforderlich sein.

### **Design rules for mechanical smoke extracts on the basis of heat balance calculations**

#### **Summary**

A  
The objective of this research project was to improve the basic knowledge on the mechanical extract for smoke control and to support the development of practical design rules in this field. With this intention a large number of heat balance calculations using a multy room zone model (MRFC) were performed. Sets of parameters were selected to represent fire scenarios in large industrial compartments. Parameter variations include compartment size and hight, mass flow rate of fans, heat output or size of fire, accounting for fire growth. Results of calculation comprise the temperatures in the compartment and depth of smoke layers as they develope in time - globally within the compartment or at different places in the compartment.

Decisive parameters for the increase of depth of smoke layers are the heat output and the flow rate of fans. A simple design rule giving the required flow rate of fans depending on the anticipated hight of the smoke-free layer is developed for stationary conditions. The design rule applies to large compartments and is on the safe side. For special cases as tower type compartments or local venting only, individual design calculations will still be required.

T 2569/1-2

## Règles de dimensionnement d'aspirateurs de fumée mécaniques sur la base de calculs du bilan calorifique

### Résumé

Dans le cadre de ce projet de recherche, on avait l'intention d'approfondir encore les connaissances déjà existantes sur des aspirateurs de fumée mécaniques en vue d'être à même de contribuer à l'élaboration de règles de dimensionnement  $\gamma$ -relatives. On est procédé à un grand nombre de calculs du bilan calorifique en utilisant un modèle MRFC (modèle de plusieurs zones dans un local). Les groupes de paramètres ont été choisis de façon à représenter les scénarios rencontrés dans les bâtiments industriels. Entre autres choses, les paramètres suivants ont été variés: la grandeur et la hauteur des locaux, la ventilation, la vitesse massique de combustion ou l'intensité du feu, respectivement, tout en tenant compte de la propagation du feu. Les résultats de calcul obtenus portent sur le développement des épaisseurs de couches de fumée dans le temps ainsi que sur les températures rencontrées dans le local ou dans les différents endroits du local exposé au feu.

Les paramètres influençant de manière décisive le développement de la couche de fumée sont la vitesse massique de combustion et la ventilation. Pour le régime stationnaire, on donne une équation simple pour le dimensionnement de la ventilation requise en fonction de la hauteur désirée de la couche sans fumée. La règle de dimensionnement proposée s'applique à des locaux grands et peut être considérée comme étant au côté sûr. En ce qui concerne des cas spéciaux comme par exemple des ouvrages sous forme de tour ou des canals de fumée seulement ponctuels il y aura encore lieu aussi au future de procéder à des vérifications individuelles.