

BRANDSCHUTZ - FORSCHUNG

DER BUNDESLÄNDER

BERICHTE

Brand- und Löschversuche mit gasförmigen
Löschmitteln in Räumen natürlicher Größe

Teil 2: Ermittlung der Volumenströme durch
Türöffnungen zur Rauchfreihaltung von
Rettungswegen.

35

ARBEITSGEMEINSCHAFT DER INNENMINISTERIEN DER BUNDESLÄNDER
ARBEITSKREIS V - UNTERAUSSCHUSS "FEUERWEHRANGELEGENHEITEN"

Arbeitsgemeinschaft der Innenministerien der Bundesländer
Arbeitskreis V - Unterausschuß "Feuerwehrangelegenheiten"

Forschungsbericht Nr. 35

Brand- und Löschversuche mit gasförmigen Lösch-
mitteln in Räumen natürlicher Größe

Teil 2: Ermittlung der Volumenströme durch
Türöffnungen zur Rauchfreihaltung
von Rettungswegen.

von
Dipl.-Ing.R.John

Forschungsstelle für Brandschutztechnik
an der Universität Karlsruhe (TH)

Karlsruhe
Oktober 1978

FA.Nr. 73 (3/76)

INHALTSVERZEICHNIS

	Seite	
1.	EINLEITUNG	1
2.	GRUNDLAGEN ZUR RAUCHFREIHALTUNG VON RETTUNGSWEGEN	1
3.	VERSUCHE ZUR ERMITTLUNG DER ERFORDERLICHEN LUFTVOLUMENSTRÖME, UM RETTUNGSWEGE RAUCHFREI ZU HALTEN	2
3.1.	Ziel der Brand- und Lüftungsversuche	3
3.2.	Versuchsanlage	3
3.2.1	Versuchsraum	3
3.2.2.	Meßeinrichtungen	4
4.	VERSUCHSDURCHFÜHRUNG	6
4.1.	Kaltversuche	6
4.2.	Brandversuche	7
5.	VERSUCHSERGEBNISSE UND DISKUSSION	8
5.1.	Kaltversuche	8
5.2.	Brandversuche	11
6.	ZUSAMMENFASSUNG	19
7.	FORMELZEICHEN	21
8.	LITERATURVERZEICHNIS	22
9.	TABELLE UND ZEICHNUNGEN	23

1. EINLEITUNG

Die Auswirkung eines Brandes in einem Gebäude auf die sich darin befindenden Personen wird zu einem wesentlichen Teil davon bestimmt, wie sicher diese Personen das Gebäude verlassen können. Bei hohen und weitläufigen Gebäuden können Personen nur über die vorgesehenen Rettungswege das Gebäude verlassen. Die unbehinderte Benutzbarkeit der Rettungswege im Brandfall ist deshalb insbesondere in hohen und weitläufigen Gebäuden eine unabdingbare Voraussetzung für die Sicherheit der Personen in diesem Gebäude.

Neben anderen Faktoren kann die Benutzbarkeit der Rettungswege im Brandfall durch eindringende Rauchgase behindert bzw. unmöglich werden. Die Rauchgase in Rettungswegen gefährden in mehrfacher Weise den Menschen. Neben der direkten gesundheitlichen Gefährdung durch Giftgase, wie z.B. CO, ergeben sich durch die Sichtbehinderung unter Umständen so große psychologische und physiologische Auswirkungen, daß die Rettungswege nicht mehr benutzt werden bzw. benutzt werden können. Es ist daher erforderlich, das Eindringen von Rauchgasen in Rettungswege durch geeignete Maßnahmen zu verhindern. Diese zum Schutz der Rettungswege gegen das Eindringen von Rauchgasen vorgesehenen Einrichtungen müssen auch dann funktionsfähig bleiben, wenn Türen zwischen einem Brandraum und dem Rettungsweg sowie zwischen dem Rettungsweg und der freien Umgebung offenstehen.

2. GRUNDLAGEN ZUR RAUCHFREIHALTUNG VON RETTUNGSWEGEN

Um das Eindringen von Rauchgasen in die Rettungswege zu verhindern ist es erforderlich, die Gesetzmäßigkeiten zu kennen, nach denen sich Rauchgase vom Brandraum aus in die angrenzenden Räume ausbreiten.

Rauchgasvolumenströme vom Brandraum in angrenzende Räume werden wie alle Strömungsvorgänge durch Druckdifferenzen hervorgerufen. Sieht man von Windeinflüssen und Lüftungsanlagen ab, so ergeben sich diese Druckdifferenzen auf Grund unterschiedlicher Gasdichten und / oder unterschiedlicher Temperaturen in diesen Räumen. Die durch Temperaturunterschiede zwischen aneinander angrenzenden Räumen hervorgerufenen Strömungsvorgänge sind in [1, 2] theoretisch dargelegt worden.

Berechnungen über die erforderlichen Luftvolumenströme zum Schutz der Rettungswege vor einer Verqualmung sind in [3, 4] durchgeführt worden. Bei einem realen Brandversuch in einem Bürohausneubau [5] mit einem Druckbelüftungssystem zum Schutz des innenliegenden Treppenraumes konnten die nach [3] durchgeführten Berechnungen der zum Schutz des Treppenraumes gegen den Raucheintritt erforderlichen Luftvolumenströme bestätigt werden.

Da die bei diesem Brandversuch durchgeführten Messungen nur bei den während des Versuches vorliegenden Verhältnissen möglich waren, konnte die Übereinstimmung der theoretischen Berechnungen mit den Versuchsergebnissen nur für einen sehr begrenzten Temperaturbereich bestätigt werden.

3. VERSUCHE ZUR ERMITTLUNG DER ERFORDERLICHEN LUFTVOLUMENSTRÖME, UM RETTUNGSWEGE RAUCHFREI ZU HALTEN

Um die theoretisch berechneten Luftvolumenströme zur Rauchfreihaltung von Rettungswegen bei realen Bränden zu überprüfen, sind weitere Untersuchungen in natürlichem Maßstab durchgeführt worden.

3.1. Ziel der Brand- und Lüftungsversuche

Ziel der Brand- und Lüftungsversuche war es, die theoretisch in Abhängigkeit von den Temperaturen im Brandraum und in den angrenzenden Räumen, zum Beispiel Schleusen, berechneten Volumenströme durch Öffnungen zwischen diesen Räumen, die erforderlich sind, um einen Raucheintritt in diese Räume zu verhindern, experimentell nachzuprüfen.

Weitere Untersuchungen wurden durchgeführt, um den Volumenstrom durch Türöffnungen z.B. zwischen einer Schleuse und dem Treppenraum bei gleichen Temperaturen in den aneinander angrenzenden Räumen bei verschiedenen Türöffnungswinkeln in Abhängigkeit vom Überdruck zu ermitteln.

3.2. Versuchsanlage

3.2.1 Versuchsraum

Die Versuche wurden in einem in der Versuchshalle der Forschungsstelle für Brandschutztechnik erstellten Brandversuchsraum durchgeführt. An diesen Versuchsraum wurde eine Schleuse angebaut.

Der Grundriß des Versuchsraumes ist im Bild 1 dargestellt. An den Brandraum 1, der eine Grundfläche von ca. 21 m^2 hat, ist die Schleuse 2, Grundfläche ca. 4 m^2 , angebaut. Die Raumhöhe des Brandraumes sowie der Schleuse beträgt $2,5 \text{ m}$. Der Boden des Brandraumes ist als Waageplattform ausgebildet und ruht auf 4 Druckkraftaufnehmern.

Im Gegensatz zu dem in Massivbauweise errichteten Brandraum ist die Schleuse eine Holzbalkenkonstruktion. Die Wände, die Decke und der Boden bestehen aus Asbestzementplatten. Diese Ausführung ermöglicht es, Veränderungen der Schleuse leicht durchzuführen. Die im Bild 1 eingezeichnete Fensteröffnung 3 im Brandraum ist 2 m breit und 1 m hoch. Die Unterkante der Öffnung liegt $0,85 \text{ m}$ über dem Boden des Brandraumes. Bei den Türen 4 und 5 handelt es sich um

Fh - Türen mit einer lichten Breite von 820 mm und einer Höhe von 2 000 mm. Die Tür 4 schlägt in die Schleuse auf, die Tür 5 in die Versuchshalle. Der Schleuse wird an der Stelle 6 in Bild 1 die Frischluft über ein Rohr mit einem Innendurchmesser von 800 mm zugeführt. Die Frischluft wird außerhalb der Versuchshalle von dem Axialgebläse 7 angesaugt. Der Volumenstrom, maximal ca. $25\ 000\ \text{m}^3/\text{h}$, kann durch die mit einem Stellmotor angetriebene Drosselklappe 8 verändert werden. Nach der Drosselklappe ist der aus 32 Einzelrohren von 120 mm \varnothing bestehende Strömungsgleichrichter 9 angeordnet.

3.2.2. Meßeinrichtungen

In dem in Bild 1 dargestellten Versuchsraum wurden die im Folgenden aufgeführten Meßeinrichtungen eingebaut (siehe Bild 2).

Der Luftvolumenstrom, der in die Schleuse strömt, wurde über die Strömungsgeschwindigkeit in der Zuluftleitung ermittelt. Zur Bestimmung der Strömungsgeschwindigkeit waren in der Zuluftleitung hinter dem Strömungsgleichrichter die Prandtlrohre Pr 1 bis Pr 5 so angeordnet, daß mit jedem der Prandtlrohre die repräsentative Geschwindigkeit von $1/5$ des Rohrquerschnittes ermittelt werden konnte. Zur Messung der Staudrücke wurden die einzelnen Prandtlrohre mit Hilfe eines mechanischen Umschalters nacheinander auf ein Feinmeßmanometer geschaltet. Die Druckdifferenz zwischen Schleuse und der Versuchshalle (P2 - P3) bzw. zwischen der Schleuse und dem Brandraum (P2 - P1) wurde je nachdem, durch welche Tür die Luft aus der Schleuse abströmte, ebenfalls über den mechanischen Umschalter auf das Feinmeßmanometer gegeben. Die Druckmeßstellen P1 und P2 im Brandraum und in der Schleuse befanden sich unter der Decke. Die Druckmeßstelle P 3 befand sich in ca. 2 m Höhe über dem Boden der Versuchshalle.

Der Luftvolumenstrom durch die Türöffnung zwischen der Schleuse und dem Brandraum wurde ebenfalls über die Strömungsgeschwindigkeit berechnet. Zur Messung der Strömungsgeschwindigkeit waren in der Ebene der Tür Schleuse / Brandraum 6 Prandtlrohre in 3 verschiedenen Höhen eingebaut. Die Höhe dieser Meßstellen ist in Bild 2 angegeben. Der Abstand der in gleicher Höhe angeordneten Prandtlrohre innerhalb des Türrahmens betrug 400 mm.

Zur Bestimmung der optischen Rauchdichte in der Schleuse waren in 2 Höhen die Rauchdichte-Meßstrecken RD 1 und RD 2 eingebaut. Diese Meßstrecken bestanden aus je 1 Lichtquelle, die über ein Linsensystem das Licht einer normalen Glühlampe (5 W) auf eine Selenzelle abstrahlt. Diese Selenzellen waren über einen Widerstand von ca. 10Ω kurzgeschlossen. Die Spannung an diesem Widerstand, die sich linear in Abhängigkeit von der Beleuchtungsintensität der Selenzellen ändert, wurde als Maß für die optische Rauchdichte in der Schleuse registriert. Da die Schleuse während des Versuches nicht beleuchtet und die Flammeneinstrahlung aus dem Brandraum auf die Selenzellen abgeschirmt war, wurde auf eine Fremdlichtkompensation verzichtet. Helligkeitsschwankungen der Lichtquelle infolge von Spannungsänderungen waren im Rahmen dieses Versuches vernachlässigbar, da die Lichtquelle aus einem sehr konstanten Labornetzgerät gespeist wurde.

Zur Bestimmung der Temperaturen im Brandraum und in der Schleuse waren 12 Mantelthermoelemente mit einem Durchmesser von 1,6 mm eingebaut. Die Anordnung der Temperaturmeßstellen ergibt sich ebenfalls aus Bild 2. Mit den Thermoelementen Th 1 und Th 2 wurden die Temperaturen 50 mm unterhalb der Decke des Brandraumes im Bereich der Tür zur Schleuse gemessen. Mit den Thermoelementen Th 3 bis Th 8 wurden die Temperaturen vor der Tür auf der Brandraumseite erfaßt. Die Temperaturen der in den Brandraum einströmenden Luft

wurde von den Thermoelementen Th 10 bis Th 12 gemessen.

Bild 3 zeigt die Schleuse mit der Luftzuführung. Um in der Schleuse keine Luftverluste durch Spalte zu erhalten, wurden alle Stoßstellen der Asbestzementplatten sowie die übrigen Spalte mit Asbestschaum oder Polyurethanschaum abgedichtet. Einen Blick von der Schleuse in den Brandraum zeigt Bild 4. Auf diesem Bild sind die Gehäuse der Selenzellen zur Messung der optischen Rauchdichte sowie die Prandtlrohre Pr 6 bis Pr 11 in der Türebene zu erkennen.

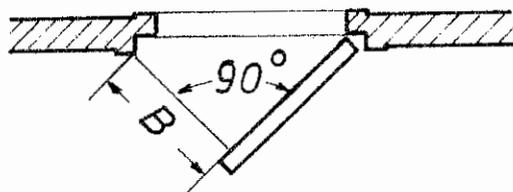
4. VERSUCHSDURCHFÜHRUNG

Mit dem beschriebenen Versuchsaufbau wurden Versuche durchgeführt, bei denen der Luftvolumenstrom durch die Türen der Schleuse sowohl bei gleichen Temperaturen der Luft in der Schleuse und in den angrenzenden Räumen (Kaltversuch) als auch bei unterschiedlich hohen Temperaturen zwischen Brandraum und Schleuse (Brandversuch) bestimmt wurde.

4.1. Kaltversuche

Die bei gleichen Temperaturen der Luft in der Schleuse und in den angrenzenden Räumen durchgeführten "Kaltversuche" waren erforderlich, um die Luftvolumenströme berechnen zu können, die bei geöffneten Türen zum Erreichen eines bestimmten Überdruckes in der Schleuse bzw. in einem Vorraum erforderlich sind.

Der Luftvolumenstrom von der Schleuse in den angrenzenden Brandraum bzw. in die Versuchshalle wurde bei verschiedenen Türöffnungsbreiten B bestimmt. Die Öffnungsbreite B der Tür wurde dabei entsprechend der folgenden Skizze gemessen:



Das Maß B ist dabei der kleinste, senkrecht zum Türblatt gemessene Abstand zwischen Türblatt und vorderster Kante des Türrahmens.

4.2. Brandversuche

Bei den Brandversuchen wurde ermittelt, welche Luftvolumenströme in Abhängigkeit von der Temperatur im Brandraum bei etwa konstanter Lufttemperatur in der Schleuse von der Schleuse durch die vollständig geöffnete Tür in den Brandraum strömen müssen, um einen Raucheintritt in die Schleuse zu verhindern. Hauptkriterium dafür, daß keine Rauchgase in die Schleuse strömen, ist ein positiver dynamischer Druck an den Prandtlrohren Pr 6 bis Pr 11.

Die Brandversuche wurden mit unterschiedlichem Brandgut durchgeführt.

- a.) Brandgut: 5 l Brennspritus in einer Blechwanne, Grundriß 0,5 m x 0,5 m, Höhe 0,1 m
Brandlast: 107,5 MJ bzw. 5,12 MJ/m²
- b.) Brandgut: 6 l Brennspritus in zwei Blechwannen, Abmessungen der Wannen wie bei a.)
Brandlast: 129,0 MJ bzw. 6,14 MJ/m²
- c.) Brandgut: 1 l Brennspritus in einer Blechwanne, Abmessungen wie bei a.) darüber ca. 15 kg Holzstäbe und seitlich 2 Polsterkissen
Brandlast: ca. 323 MJ bzw. 15,4 MJ/m²
- d.) Brandgut: 207 kg Altmöbel, 100 kg grobe Holzscheite
3 kg Holzstäbe als Zündkrippe
0,5 l Brennspritus in Blechwanne
Brandlast: 5203 MJ bzw. 247,7 MJ/m²

In den Bildern 5, 6 und 7 sind die Vorgänge im Brandraum bei dem Brandversuch mit der unter d.) aufgeführten Brandlast dargestellt. Bild 5 zeigt den Versuch ca. 8 min nach dem Entzünden der Zündkrippe mit 0,5 l Brennspritus. Etwa 14 min nach dem Entzünden herrscht die in Bild 6 gezeigte Situation im Brandraum. Zu diesem Zeitpunkt wurde noch keine Luft in die Schleuse eingeblasen. Bei einer Versuchszeit von 15 min wurde das Lüftungssystem eingeschaltet. Bild 7 zeigt die Wirkung des von der Schleuse in den Brandraum einströmenden Luftvolumenstromes bei einer Versuchszeit von ca. 16 min.

5. VERSUCHSERGEBNISSE UND DISKUSSION

5.1. Kaltversuche

In den Bildern 8 und 9 sind für die Kaltversuche die Luftvolumenströme, die der Schleuse zugeführt wurden, in Abhängigkeit von der sich dadurch zwischen Schleuse und den angrenzenden Räumen einstellenden Druckdifferenz bei verschiedenen Werten für B dargestellt. Da die Schleuse völlig dicht ist, entspricht der der Schleuse zugeführte Luftvolumenstrom dem Luftvolumenstrom durch den Türspalt der Breite B.

Die im Bild 8 aufgetragenen Werte gelten für den Fall, daß der der Schleuse zugeführte Luftvolumenstrom über die Türöffnung zur Versuchshalle abströmte. Die Luftvolumenströme sind hierbei über der zwischen der Schleuse und der Versuchshalle auftretenden Druckdifferenz aufgetragen. Dabei ergaben sich unterschiedliche Luftvolumenströme zwischen der in Bild 3 gezeigten Anordnung (kein Boden unter der geöffneten Tür Schleuse/Versuchshalle) zu dem Fall, bei dem im Bereich der Tür Schleuse/Versuchshalle ein Boden in Höhe des Schleusenboden angebaut war (Boden unter der Tür Schleuse/Versuchshalle). Der Fall, kein Boden unter der geöffneten Tür liegt z.B. vor, wenn sich vor einer Tür nur ein Laufgitter befindet.

Im Bild 9 sind die Werte aufgetragen, die ermittelt wurden, wenn der der Schleuse zugeführte Luftvolumenstrom durch die Türöffnung zum Brandraum abströmte. Die Volumenströme sind hierbei über der Druckdifferenz zwischen der Schleuse und dem Brandraum aufgetragen. Die Türöffnungsbreite B beträgt sowohl für die Tür Schleuse/Versuchshalle als auch für die Tür Schleuse/Brandraum maximal 0,82 m.

Aus den in den Bildern 8 und 9 dargestellten Ergebnissen wurden die in Bild 10 in Abhängigkeit von der Türöffnungsbreite B für verschiedene Differenzdrücke Δp_{SU} aufgetragene Volumenströme ermittelt. Die in Bild 10 angegebenen Volumenströme sind auf eine Temperatur von 273 K und 1,0132 bar bezogen. Die Darstellung in Bild 10 ermöglicht einen Vergleich der Luftvolumenströme bei gleicher Druckdifferenz und gleicher Öffnungsbreite bei dem Durchströmen der Tür Schleuse/Brandraum sowie der Tür Schleuse/Versuchshalle mit und ohne Boden unter der geöffneten Tür. Der geringste Luftvolumenstrom bei gegebenen B und Δp_{SU} tritt durch die Tür Schleuse/Versuchshalle aus, wenn sich unter der geöffneten Tür ein Boden befindet. Der Volumenstrom steigt über die Werte des Volumenstromes durch die Tür Schleuse/Brandraum an, wenn der Boden unter der geöffneten Tür Schleuse/Versuchshalle entfernt wird. Die Unterschiede der Luftvolumenströme durch vergleichbare Stellungen der Türen Schleuse/Brandraum und Schleuse/Versuchshalle sind auf die verschiedenen Anströmrichtungen der Türblätter sowie auf die unterschiedlich ausgebildete Strömung der Luft beim Durchströmen der Türöffnungen zurückzuführen.

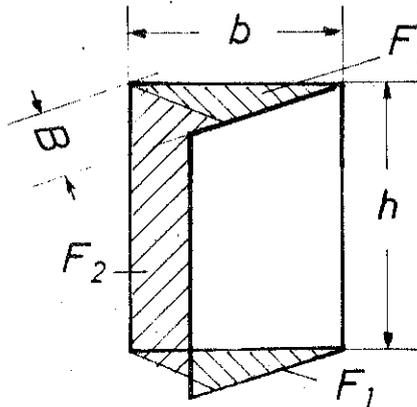
Für den Volumenstrom durch eine Öffnung gilt:

$$\dot{V} = F c = F \alpha \sqrt{\frac{2}{\rho}} \sqrt{\Delta p} \quad (1)$$

Daraus wird:

$$\alpha = \frac{\dot{V}}{F \sqrt{\frac{2}{\rho}} \sqrt{\Delta p}} = \frac{c}{\sqrt{\frac{2}{\rho}} \sqrt{\Delta p}} \quad (2)$$

Wird als Fläche F die Spaltfläche F_T beim Öffnen einer Tür eingesetzt, so wird hierbei die Ausströmfläche durch die Tür entsprechend der Skizze wie folgt berechnet:



Danach gilt:

$$F_1 = \frac{B \sqrt{b^2 - B^2}}{2} \quad (3)$$

$$F_2 = B \cdot h \quad (4)$$

Für die Tür Schleuse/Brandraum und für die Tür Schleuse/Versuchsraum mit Boden unter der geöffneten Tür wird die Gesamtöffnungsfläche $F_{T 4}$ bzw. $F_{T 5m}$

$$F_{T 4} = F_{T 5m} = F_1 + F_2 = B \left[\frac{\sqrt{b^2 - B^2}}{2} + h \right] \quad (5)$$

Für die Tür Schleuse/Versuchshalle ohne Boden unter der geöffneten Tür gilt

$$F_{T 50} = 2 F_1 + F_2 = B \left[\sqrt{b^2 - B^2} + h \right] \quad (6)$$

Mit den mit Gleichung 5 bzw. 6 berechneten Querschnittsflächen $F_{T 4}$, $F_{T 5m}$ und $F_{T 50}$ sind die Strömungsbeiwerte aus den in Bild 10 aufgetragenen Volumenströmen berechnet worden.

Diese berechneten Strömungsbeiwerte $\alpha_{T 4}$, $\alpha_{T 5m}$ und $\alpha_{T 50}$ sind in Bild 11 in Abhängigkeit von der auf die Türbreite b bezogene Öffnungsbreite B/b dargestellt.

Die in Bild 11 dargestellten Strömungsbeiwerte $\bar{\alpha}_T$ zeigen eine starke Abhängigkeit von der Größe B/b und von der Druckdifferenz zwischen der Schleuse und den angrenzenden Räumen. Die Abhängigkeit des Strömungsbeiwertes $\bar{\alpha}_T$ der vollständig geöffneten Türen 4 und 5 von der Druckdifferenz Schleuse/Brandraum bzw. Schleuse/Versuchshalle ist in Bild 12 dargestellt. Durch die vollständig geöffnete Tür Schleuse/Versuchshalle wurde sowohl mit als auch ohne Boden unter der geöffneten Tür die gleichen Luftvolumenströme gemessen. Da auch die Flächen F_{T5m} und F_{T50} für die ganz geöffnete Tür gleich sind, ergibt sich für $\bar{\alpha}_{T5m}$ und $\bar{\alpha}_{T50}$ der gleiche Wert ($\bar{\alpha}_{T5}$). Aus den Darstellungen in den Bildern 11 und 12 können die Strömungsbeiwerte $\bar{\alpha}_T$ entnommen werden, die bei der Berechnung von Leckagevolumenströme durch teilweise bzw. ganz geöffnete Türen bei gegebenen Druckdifferenzen zugrunde zu legen sind, wenn die Temperaturen der Luft auf beiden Seiten der Türen etwa gleich sind.

5.2. Brandversuche

Die von der Schleuse in den Brandraum strömenden Luftvolumenströme wurden über die gemessenen dynamischen Drücke in der Türebene Schleuse/Brandraum ermittelt. Zur Berechnung wurde aus den beiden, mit den in gleicher Höhe im Türrahmen angeordneten Prandtlrohren gemessenen dynamischen Drücken der Mittelwert gebildet. In Bild 13 sind diese bei den Versuchen 3, 7 und 9 in jeweils 3 Höhen ermittelten Mittelwerte eingetragen. Bei diesen Versuchen wurde der in die Schleuse einströmende Luftvolumenstrom mit Hilfe der Drosselklappe so eingeregelt, daß der dynamische Druck an den Prandtlrohren p_{r10} und p_{r11} (siehe Bild 2) geringfügig über dem Wert 0 N/m^2 lag. Aus den gemessenen Druckdifferenzen Δp_{dyn} wurde die Geschwindigkeit c_T in der Türöffnung nach der Beziehung

$$c_T = \sqrt{\frac{2\Delta p_{\text{dyn}}}{\rho}} \quad (7)$$

berechnet.

(ρ ist hierin die Dichte der der Schleuse zugeführten Luft)

Die den dynamischen Drücken Δp_{dyn} in Bild 13 entsprechenden Strömungsgeschwindigkeiten c sind in Bild 14 dargestellt.

Der Volumenstrom, der von der Schleuse in den Brandraum strömt, ergibt sich zu:

$$\dot{V}_{\text{SB}} = b \int_{h=0}^{h=2} c dh \quad (8)$$

Da für die Geschwindigkeitskurve in Bild 14 keine mathematische Gleichung vorliegt, wird der unter dem Integralzeichen stehende Wert

$$\frac{\dot{V}_{\text{SB}}}{b} = \int_{h=0}^{h=2} c dh \quad (9)$$

durch eine graphische Integration ermittelt. Bei einer freien Türbreite von 0,82 m ergeben sich die mit in das Bild 14 eingetragenen Volumenströme \dot{V}_{SB} für die entsprechenden Versuche.

Bei einigen der durchgeführten Versuche hat sich, wie z.B. bei dem Versuch 9 in den Bildern 13 und 14 gezeigt, daß der dynamische Druck und damit die Geschwindigkeit c an der oberen Kante der Tür Werte größer 0 ergeben haben. Der geringste Luftvolumenstrom, der zur Rauchfreihaltung der Schleuse erforderlich ist, wird aber nur erreicht, wenn diese Werte 0 sind. Um den dadurch entstandenen Fehler abschätzen zu können, ist für den Versuch 9 eine Korrektur durchgeführt worden. Dabei wurde der 0-Punkt der x - Achse in Bild 13 um den Betrag nach rechts verschoben, der erforderlich ist, um bei der Höhe $h_{\text{T}} = 2$ m für den dynamischen Druck den Wert 0 zu erhalten. Dadurch haben sich alle Werte des dynamischen Druckes um den gleichen Betrag verringert. Aus diesen korrigierten dynamischen Drücken ist der in Bild 14 eingezeichnete Geschwindigkeitsverlauf $c_{\text{corr } 9}$ berechnet worden. Ent-

sprechend der Fläche unter der Kurve $c_{\text{g,corr } 9}$ ergibt sich daraus ein Luftvolumenstrom von $4,22 \text{ m}^3/\text{s}$ gegenüber einem Luftvolumenstrom von $4,46 \text{ m}^3/\text{s}$ entsprechend der Kurve c_9 . Da diese Verringerung des Volumenstromes im Bereich der durch die Meßgenauigkeit gegebenen Fehlergrenzen liegt, ist auf eine Korrektur der übrigen Werte, die alle geringere Abweichungen als die Kurve c_9 aufweisen, verzichtet worden.

Die bei den Versuchen 3, 7 und 9 gemessenen Temperaturen sind als Mittelwerte über die Zeit von ca. 3 min, in der auch die in Bild 13 aufgezeichneten dynamischen Drücke ermittelt wurden, im Bild 15 dargestellt. Bei den in diesem Bild eingetragenen Temperaturwerten ist zu berücksichtigen, daß insbesondere an den Meßstellen Th 4 bis Th 12 (siehe Bild 2) höhere Werte gemessen wurden, als es dem jeweiligen Luft- bzw. Gasstrom an dieser Stelle entsprach. Diese Verfälschung der Temperaturanzeige ergibt sich aus der Wärmeeinstrahlung auf die ungeschützten Thermoelemente aus dem Brandraum. Mit steigender Brandraumtemperatur steigt der durch Strahlung den Thermoelementen zugeführte Wärmestrom und damit auch deren Temperatur an. Die Differenzen der gemessenen zu den tatsächlichen Temperaturen zeigt sich deutlich an den Meßstellen 5, 7, 8, 11 und 12, die ständig in dem der Schleuse zugeführten Firschlufvolumenstrom von ca. $13 \text{ }^\circ\text{C}$ lagen.

In Bild 16 sind die von der Schleuse in den Brandraum bei allen Versuchen ermittelten einströmenden Frischluftvolumenströme, die zur Rauchfreihaltung der Schleuse erforderlich waren, über dem an der Stelle Th 1 (siehe Bild 2) zur Zeit der Volumenstrommessung ermittelten zeitlichen Mittelwerte der Temperaturen aufgetragen.

In dieses Bild 16 ist zusätzlich zu den Meßwerten die Kurve eingetragen, die nach [2] theoretisch den

erforderlichen Frischluftvolumenstrom in Abhängigkeit von der Brandraumtemperatur wiedergibt.

$$\dot{V}_{th} = \alpha \cdot \frac{2}{3} \sqrt{2 g \left(1 - \frac{T_S}{T_B}\right)} \cdot b \cdot h_T^{3/2} \quad (10)$$

mit $\alpha = 0,707$ nach [2].

Für diese Berechnung ist eine Temperatur T_L in der Schleuse von 286 K, eine Türbreite von 0,82 m und eine Türhöhe von 2 m eingesetzt worden.

Von den bei den Versuchen erhaltenen Luftvolumenströmen stimmen 6 Werte sehr gut mit dem theoretischen Wert überein, während 3 Werte größer als die berechneten Werte bei der entsprechenden Temperatur sind.

Eine befriedigende Erklärung, warum die Meßwerte teilweise über den theoretischen Werten liegen, ist bei der geringen Anzahl der vorliegenden Versuche noch nicht möglich. Mit der bei diesen Versuchen vorgenommenen Anordnung der Prandtlrohre in der Türebene hat sich gezeigt, daß es nicht mit ausreichender Genauigkeit möglich ist, den minimal erforderlichen Luftvolumenstrom zur Rauchfreihaltung der Schleuse einzustellen. Bei weiteren Versuchen ist es daher erforderlich, an der obersten Kante der Tür eine zusätzliche Meßstelle anzubringen, mit der der Beginn des Einströmens von Rauchgasen in die Schleuse genau erfaßt werden kann.

Aus den bei diesen Versuchen erhaltenen Meßergebnissen lassen sich die theoretischen Betrachtungen nach [2] und [3] überprüfen.

Der theoretische Verlauf der Druckdifferenzen an der Tür zwischen dem Brandraum und dem davorliegenden Rettungsweg, hier die Schleuse, ist von der Temperaturdifferenz zwischen den beiden Räumen abhängig.

Damit keine Rauchgase aus dem Brandraum in den Rettungsweg strömen, muß nach [3] die Druckdifferenz an der obersten Kante der Tür 0 sein. Unter dieser Bedingung ergibt sich die Druckdifferenz zwischen Brandraum und Schleuse zu

$$\Delta p_{th} = f(h_x) = (h_T - h_x) g \cdot \rho_o T_o \left(\frac{1}{T_s} - \frac{1}{T_B} \right) \quad (11)$$

Für die bei den Versuchen 3, 7 und 9 gemessenen Temperaturen an der Meßstelle Th 1 (siehe Bild 15), sind die theoretisch berechneten Druckdifferenzen Δp_{SB} zwischen Schleuse und Brandraum mit in das Bild 13 eingetragen. Als maximale Druckdifferenz Δp_{th2} ergeben sich dabei die Werte $5,75 \text{ N/m}^2$, $14,78 \text{ N/m}^2$ und $18,30 \text{ N/m}^2$ an der untersten Stelle der Tür.

Diese Druckdifferenzen führen zu den Strömungsgeschwindigkeiten

$$c_{th} = \alpha \sqrt{\frac{2 \Delta p_{th}}{\rho}} \quad (12)$$

Setzt man für Δp_{th} die Beziehung nach Gleichung (11) ein, so wird:

$$c_{th} = \alpha \sqrt{2 (h_T - h_x) g \left(1 - \frac{T_s}{T_B} \right)} \quad (13)$$

Mit dem Wert $\alpha = 0,707$ nach [2] ergeben sich die in Bild 14 eingezeichneten Kurven c_{th} für die Versuche 3, 7 und 9.

Der Luftvolumenstrom durch die Tür entsprechend den Geschwindigkeiten c_{th} ist:

$$\dot{V}_{th} = b \int_{h_x=2}^{h_x=0} c_{th} d(h_T - h_x) \quad (14)$$

Wird die Gleichung (13) eingesetzt und integriert,

so wird:

$$\dot{V}_{th} = \bar{\alpha}_T \cdot \frac{2}{3} \sqrt{2g \left(1 - \frac{T_s}{T_B} \right)} \cdot b \cdot h_T^{3/2} \quad (15)$$

$\bar{\alpha}_T$ ist darin der mittlere Strömungsbeiwert für die Strömung durch die Tür.

Damit können theoretisch die erforderlichen Luftvolumenströme durch die Türöffnung Schleuse / Brandraum berechnet werden.

Ein Vergleich der in Bild 13 dargestellten gemessenen dynamischen Drücke Δp_{dyn} mit den theoretisch ermittelten Druckdifferenzen Δp_{th} ist bezüglich der daraus berechneten Geschwindigkeiten nicht möglich, da entsprechend der Gleichung (12) für die Umsetzung der Druckdifferenzen in Geschwindigkeiten noch der Strömungsbeiwert α berücksichtigt werden muß.

Der dynamische Druck für die theoretische Geschwindigkeit c_{th} ist:

$$\Delta p_{dyn th} = \frac{\rho}{2} c_{th}^2 \quad (16)$$

bzw.

$$c_{th} = \sqrt{\frac{2 \Delta p_{dyn th}}{\rho}} \quad (17)$$

Zusammen mit der Gleichung (12) wird:

$$\sqrt{\frac{2 \Delta p_{dyn th}}{\rho}} = \alpha_T \sqrt{\frac{2 \Delta p_{th}}{\rho}} \quad (18)$$

Aus dieser Beziehung ergibt sich:

$$\alpha_T = \sqrt{\frac{\Delta p_{dyn}}{\Delta p_{th}}} \quad (19)$$

Geht man davon aus, daß im Brandraum eine lineare Abhängigkeit der Druckdifferenz zwischen Brandraum und Schleuse entsprechend Gleichung (11) vorliegt, so ergibt

sich aus dem Verhältnis nach Gleichung (19) die Abhängigkeit des Strömungsbeiwertes α_T von der Höhe. Da aber die Druckdifferenzen zwischen dem Brandraum und der Schleuse in Abhängigkeit von der Höhe nicht gemessen wurden, ergibt diese Beziehung keine Aussage über den von der Höhe abhängigen Wert α_T . Als Mittelwert α_T über die gesamte Höhe kann damit jedoch das Verhältnis des gemessenen Volumenstromes zu dem theoretisch berechneten Volumenstrom angegeben werden.

Zur Berechnung der erforderlichen Luftvolumenströme zum Schutz der Schleuse bzw. der Rettungswege gegen das Eindringen von Rauch ist es daher erforderlich, diesen mittleren Strömungsbeiwert $\bar{\alpha}_T$ für die gesamte Höhe der Tür zu ermitteln. Dieser Strömungsbeiwert erfaßt alle Abweichungen der nach Gleichung (15) mit $\bar{\alpha}_T = 1$ berechneten Volumenströme \dot{V}_{th} gegenüber den tatsächlichen Volumenströmen.

In Tabelle 1 sind für die durchgeführten Versuche die gemessenen und berechneten Volumenströme eingetragen und daraus der mittlere Strömungsbeiwert $\bar{\alpha}_T$ berechnet worden.

$$\bar{\alpha}_T = \frac{\dot{V}_{gem}}{\dot{V}_{th}} \quad (20)$$

Der Mittelwert aller berechneter $\bar{\alpha}_T$ - Werte aus den 9 vorliegenden Versuchsergebnissen beträgt

$$\bar{\alpha}_{Tm} = 0,786$$

Aus diesem Ergebnis folgt, daß der nach [2] für die Gleichung (15) angegebene Strömungsbeiwert von 0,707 auf 0,786 erhöht werden muß. Da dieser Wert aber nur aus den bisher durchgeführten 9 Versuchen erhalten wurde,

wird aus Sicherheitsgründen vorgeschlagen, bei der Berechnung der erforderlichen Luftvolumenströme nach Gleichung (15) einen Wert für $\bar{\alpha}_T$ von 0,8 einzusetzen. Der mit einem Strömungsbeiwert von 0,8 mit Gleichung (15) berechnete Luftvolumenstrom für eine Tür von 0,82 m Breite und einer Höhe von 2,0 m ist für eine Lufttemperatur T_S in der Schleuse von 286 K in Abhängigkeit von der Brandraumtemperatur T_B mit in Bild 16 eingetragen.

Der Überdruck der Schleuse gegenüber der Versuchshalle konnte nur bei einem Versuch mit befriedigender Genauigkeit gemessen werden. Diese Meßwerte sind in Abhängigkeit von der Brandraumtemperatur mit in das Bild 16 eingezeichnet. Die Größe des Überdruckes zwischen der Schleuse und der Versuchshalle bzw. der Umgebung ist wesentlich für die Berechnung des Luftvolumenstromes, der zum Aufrechterhalten dieser Druckdifferenz bei weiteren Öffnungen zwischen der Schleuse und den angrenzenden Räumen zusätzlich erforderlich ist. Dieser Luftvolumenstrom \dot{V}_L , der zusätzlich zu dem Luftvolumenstrom \dot{V}_{SB} aufgebracht werden muß, ergibt sich zu:

$$\dot{V}_L = \sum_{i=1}^{i=n} \left[\alpha_i F_{Leck\ i} \sqrt{\frac{2\Delta p_{SUi}}{\rho}} \right] \quad (21)$$

Bei dem vorliegenden Versuchsaufbau ergab sich ein Leckageluftvolumenstrom nur, wenn die Tür Schleuse / Halle geöffnet war. Zur Berechnung dieses Leckageluftvolumenstromes ist in Gleichung (21) für α_i der Wert einzusetzen, der sich entsprechend Bild 11 ergibt und für F_L die Querschnittsfläche der Türöffnung F_{T5} . Die Druckdifferenz Δp_{SU} läßt sich nach [2] zunächst für den Fall berechnen, daß keine Luft von der Schleuse in den Brandraum strömt. Für diese Berechnung ist es jedoch erforderlich, den Verbrennungsablauf, der sich mit der Temperatur im Brandraum ändert, zu kennen bzw. abzuschätzen. Wird Luft von der Schleuse in den Brandraum

eingeblassen, so ändert sich im Brandraum unter Umständen der Verbrennungsablauf und damit auch die Temperaturen im Brandraum. Diese Temperaturänderung müßte bei der Berechnung des erforderlichen Luftvolumenstromes zur Rauchfreihaltung der Schleuse nach Gleichung (15) mit berücksichtigt werden. Aussagen über die möglichen Veränderungen des Brandablaufes und die sich dabei einstellenden Druckdifferenzen zwischen Schleuse und Umgebung sind erst nach weiteren theoretischen und experimentellen Untersuchungen möglich. Dabei ist es u.a. auch erforderlich, durch Versuche festzustellen, ob, bzw. wie sich die Abbrandgeschwindigkeit und die Temperaturen in einem Brandraum gegenüber dem freien Brand ändern, wenn Luft zur Rauchfreihaltung der angrenzenden Räume in den Brandraum strömt.

6. ZUSAMMENFASSUNG

Um das Eindringen von Rauchgasen vom Brandraum in Rettungswege durch z.B. offene Türen zu verhindern, sind in früheren Arbeiten die Gesetzmäßigkeiten untersucht worden, nach denen sich Rauchgase vom Brandraum aus in die angrenzenden Räume ausbreiten. Diese theoretischen Untersuchungen sind bisher nur bei einem realen Brandversuch in einem Bürohausneubau nachgeprüft worden.

In der Versuchshalle der Forschungsstelle für Brandschutztechnik sind deshalb weitere Brandversuche in natürlicher Größe zur Ermittlung der zur Rauchfreihaltung von Rettungswegen erforderlichen Luftvolumenströmen durchgeführt worden.

An einem Brandversuchsraum von 21 m^2 Grundfläche wurde eine Schleuse von ca. 4 m^2 Grundfläche angebaut. Die Höhe dieser Räume beträgt $2,5 \text{ m}$. Über ein Axialgebläse kann der Schleuse ein Luftvolumenstrom von maximal $25\,000 \text{ m}^3/\text{h}$ zugeführt werden. Der Lufteintritt erfolgt in der Deckenebene der Schleuse. In der ersten Versuchsreihe wurde untersucht, welche Luftvolumenströme der Schleuse bei unterschiedlichen Öffnungsbreiten der Türen zugeführt werden müssen, um einen vorgegebenen Überdruck in der

Schleuse gegenüber den angrenzenden Räumen zu erreichen. Aus diesen Ergebnissen wurden Strömungsbeiwerte berechnet, mit denen eine Vorausberechnung des notwendigen Luftvolumenstromes bei gegebenem Öffnungsquerschnitt und geforderter Druckdifferenz zwischen der Schleuse und der freien Umgebung möglich ist.

In einer weiteren Versuchsreihe wurde der Luftvolumenstrom ermittelt, der von der Schleuse in den Brandraum durch die voll geöffnete Tür Schleuse / Brandraum strömen muß, um das Eindringen von Rauchgasen in die Schleuse zu verhindern. Diese Messungen wurden bei unterschiedlichen Temperaturen im Brandraum durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Versuche wurden mit den theoretischen Werten verglichen. Aus dem Vergleich ergab sich ein mittlerer Strömungsbeiwert, nach dem nun ebenfalls die zum Schutz der Rettungswege gegen den Eintritt von Rauchgasen erforderlichen Luftvolumenströme durch die Öffnungen von Rettungsweg zum Brandraum berechnet werden können.

7. FORMELZEICHEN

- b Breite der Tür in m
B Öffnungsbreite der Tür (siehe Seite 6) in m
c Strömungsgeschwindigkeit in m/s
F Fläche in m^2
g Erdbeschleunigung $9,81 \text{ m/s}^2$
h Höhe in m
p Druck in bar
 Δp Druckdifferenz in N/m^2
t Temperatur in $^{\circ}C$
T Temperatur in K ($T_0 = 273 \text{ K}$)
 \dot{V} Volumenstrom in m^3/s
 α Strömungsbeiwert
 ρ Dichte der Luft bei T und p in kg/m^3
 ρ_0 Dichte der Luft bei T_0 und $p = 1,013 \text{ bar}$ in kg/m^3

Indices

- B Brandraum
corr corregiert
dyn dynamisch
gem gemessen
H Versuchshalle
L Leckage
m arithmetischer Mittelwert
S Schleuse
Sp Spalt
T, T 4,5 Tür, Tür 4,5
T 5 o,m ohne bzw. mit Boden unter der geöffneten Tür 5
th theoretisch
U Umgebung
x an der Stelle x

8. LITERATURVERZEICHNIS

- [1] Seeger, P.G.:
Luft- und Rauchgasströme
in einem Gebäude im Brand-
fall.
VFDB-Zeitschrift
26 (1977) H.3, S. 90 - 99,
- [2] John, R.:
Rauchgas- und Luftvolumen-
ströme durch Öffnungen im
Brandraum.
5. Internationales Brand-
schutz-Seminar der VFDB
Karlsruhe 1976,
Band I, S. 39 - 61.
- [3] John, R.:
Maßnahmen zum Schutz der
Rettungswege gegen Rauch-
gaseintritt.
VFDB-Zeitschrift
27 (1978) H. 1, S. 34 - 36,
H.2, S. 56 - 58.
- [4] Wakamatsu, T.:
Calculation methods for
predicting smoke movement
in buildings fires and
designing smoke control systems.
ASTM STP 614 American Society
for Testing and Materials.
1977, S. 168 - 193.
- [5] Seeger, P.G.
John, R. :
Rauchfreihaltung eines innen-
liegenden Treppenraumes mittels
eines Druckbelüftungssystems.
VFDB-Zeitschrift
26 (1977) H.3, S. 77 - 86

Tabelle 1. Aus den gemessenen und berechneten Luftvolumenströmen ermittelter mittlerer Strömungsbeiwert $\bar{\alpha}_T$

Versuch Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Temperatur im Brandraum (T_b) °C	79	93	102	105	105	178	468	621	915
\dot{V}_{gem} m ³ /s	1,85	3,68	1,94	2,55	3,61	3,59	3,29	3,81	4,46
\dot{V}_{th} ($\bar{\alpha}_T = 1$) m ³ /s	2,97	3,20	3,34	3,38	3,38	4,14	5,37	5,65	5,97
$\bar{\alpha}_T$	0,624	1,150	0,581	0,754	1,068	0,867	0,613	0,674	0,747

$$\bar{\alpha}_{Tm} = \frac{1}{9} \sum \bar{\alpha}_T = 0,786$$

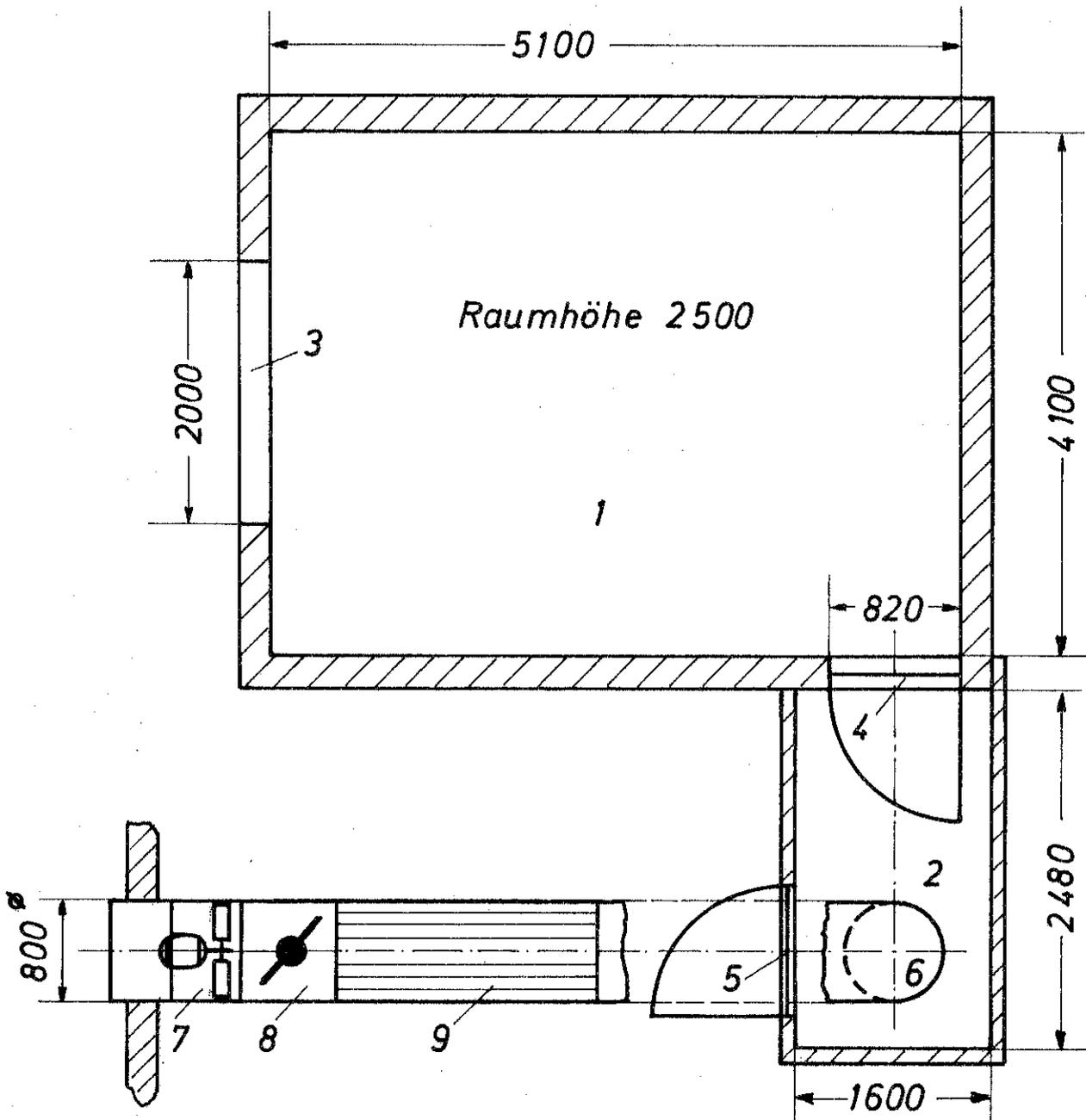


Bild 1: Grundriß des Versuchsraumes

- | | | | |
|---|----------------------------|---|------------------------|
| 1 | Brandraum | 6 | Frischlufteintritt |
| 2 | Schleuse | 7 | Axialgebläse |
| 3 | Fensteröffnung | 8 | Drosselklappe |
| 4 | Tür Schleuse/Brandraum | 9 | Strömungsgleichrichter |
| 5 | Tür Schleuse/Versuchshalle | | |

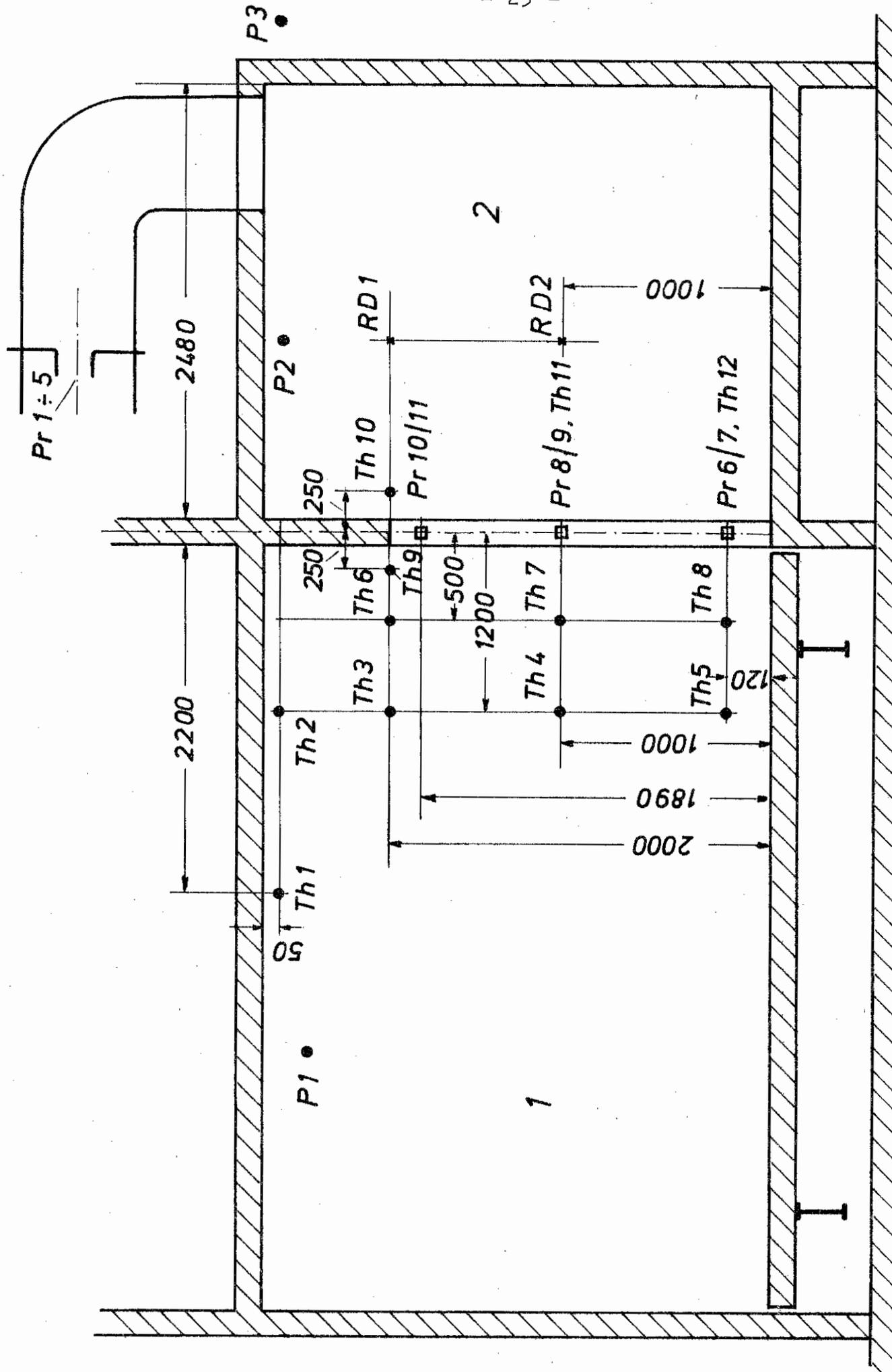


Bild 2: Schematische Darstellung der Anordnung der Meßstellen
1 Brandraum
2 Schleuse
Th 1 - Th 12 Thermoelemente
Pr 1 - Pr 11 Prandtlrohre
RD 1, RD 2 optische Rauchdichte Meßstrecken
P 1 - P 3 Druckmeßstellen



Bild 3: Schleuse mit Luftzuführung



Bild 4: Blick von der Schleuse in den Brandraum



Bild 5

Brandversuch
ca. 8 min nach dem
Entzünden, Lüftungssystem
nicht in Betrieb

Tür Schleuse/Brandraum



Bild 6

Brandversuch
ca. 14 min nach dem
Entzünden, Lüftungssystem
nicht in Betrieb

Tür Schleuse/Brandraum

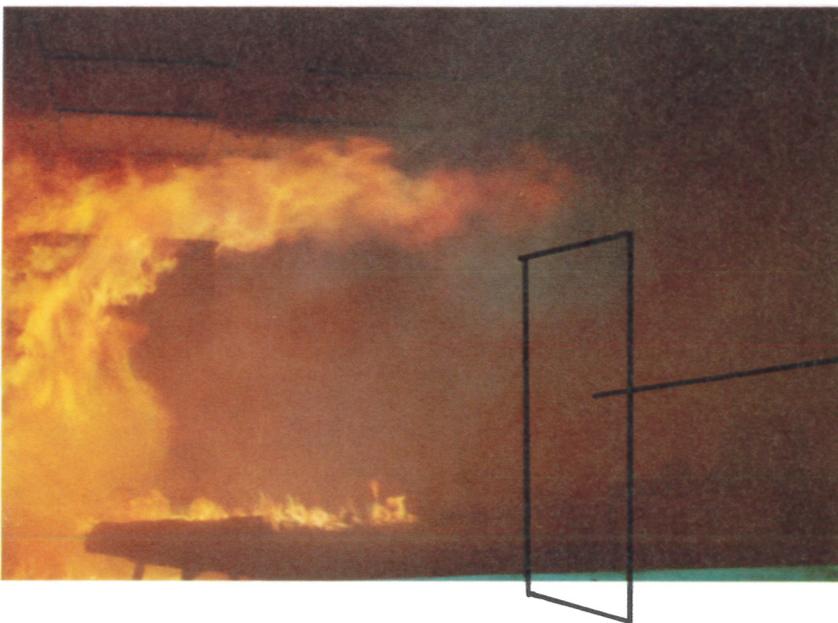


Bild 7

Brandversuch
ca. 16 min nach dem
Entzünden, Lüftungssystem
in Betrieb

Tür Schleuse/Brandraum

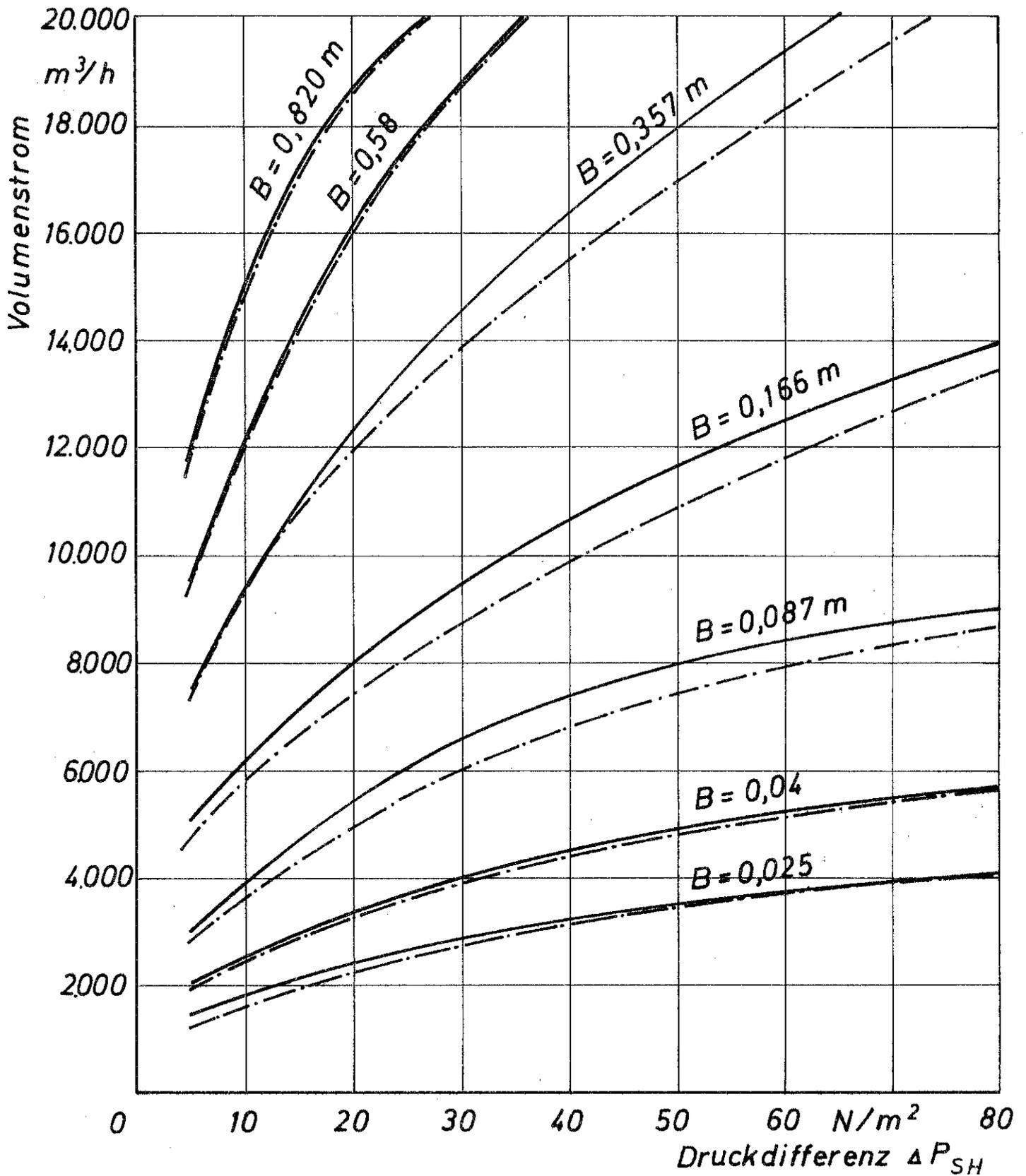


Bild 8: Luftvolumenstrom durch den Spalt B der Tür Schleuse/Brandraum in Abhängigkeit von der Druckdifferenz zwischen Schleuse und Versuchshalle

— kein Boden unter der geöffneten Tür
- - - Boden unter der geöffneten Tür

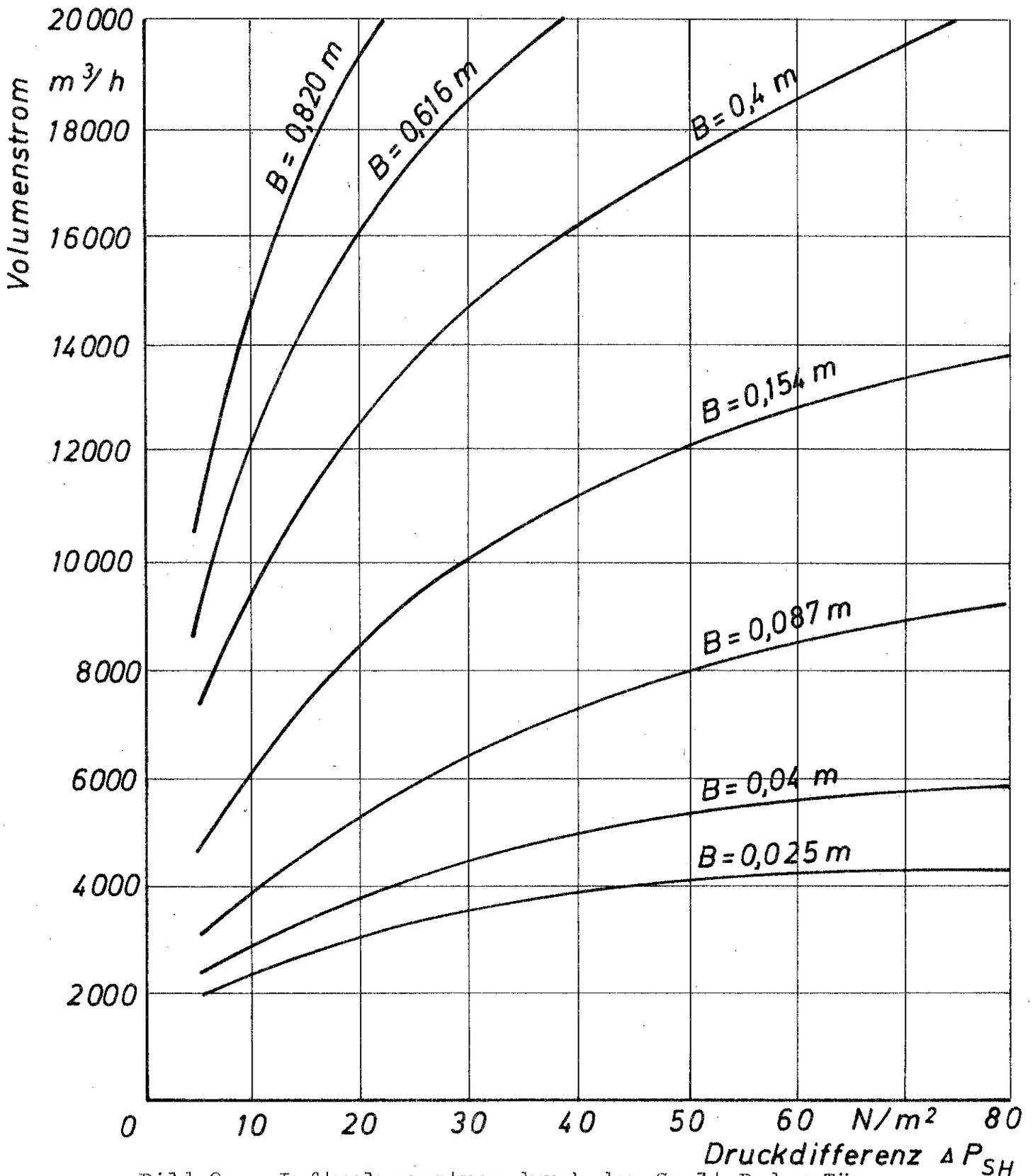


Bild 9: Luftvolumenstrom durch den Spalt B der Tür Schleuse/Brandraum in Abhängigkeit von der Druckdifferenz zwischen Schleuse und Brandraum.

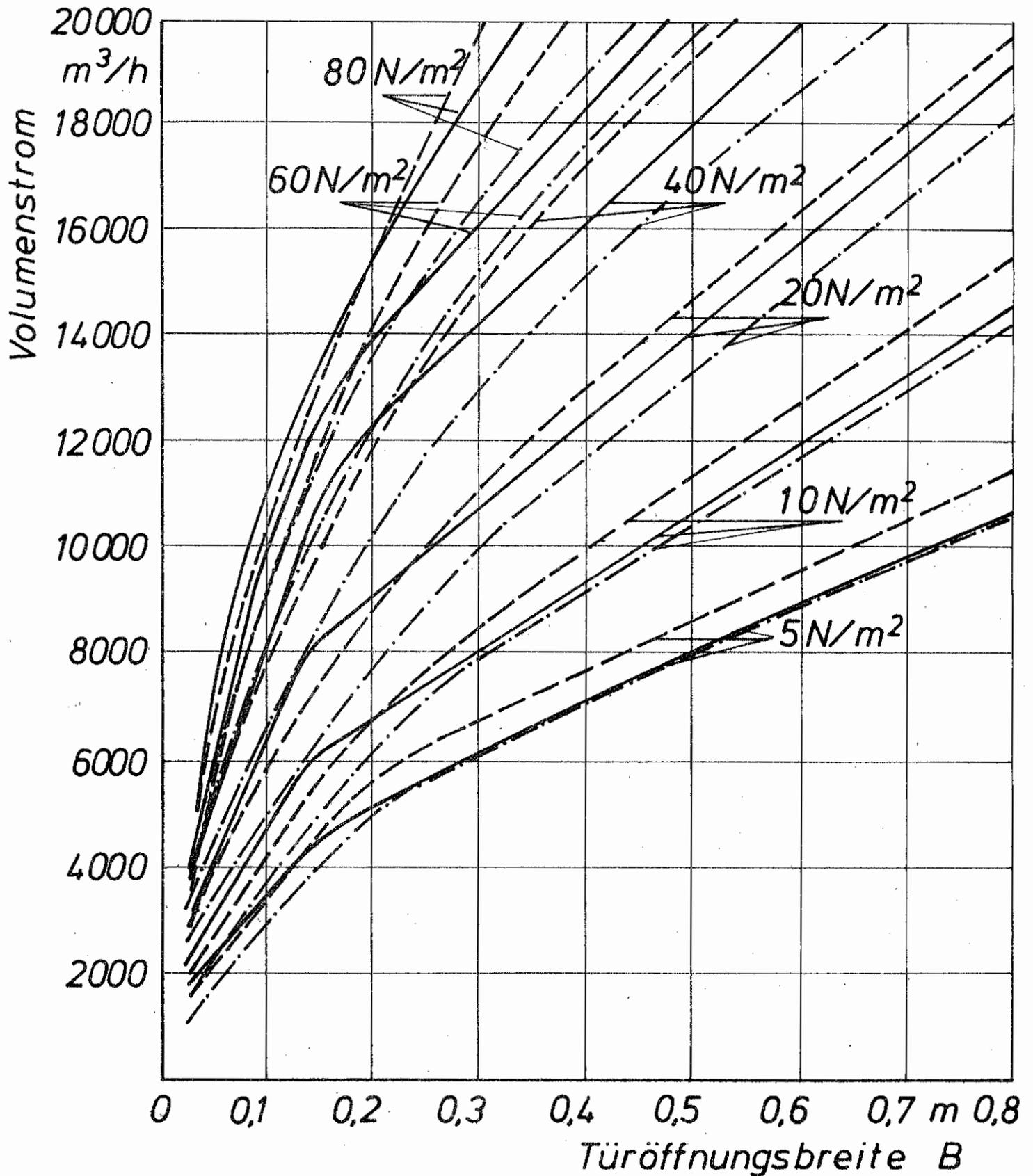


Bild 10: Erforderlicher Volumenstrom durch die Türspalte in Abhängigkeit von der Spaltbreite B zur Aufrechterhaltung eines vorgegebenen Überdrucks zwischen der Schleuse und den angrenzenden Räumen

- Tür Schleuse/Brandraum
- - - Tür Schleuse/Versuchshalle ohne Boden unter der Tür
- · - Tür Schleuse/Versuchshalle mit Boden unter der Tür

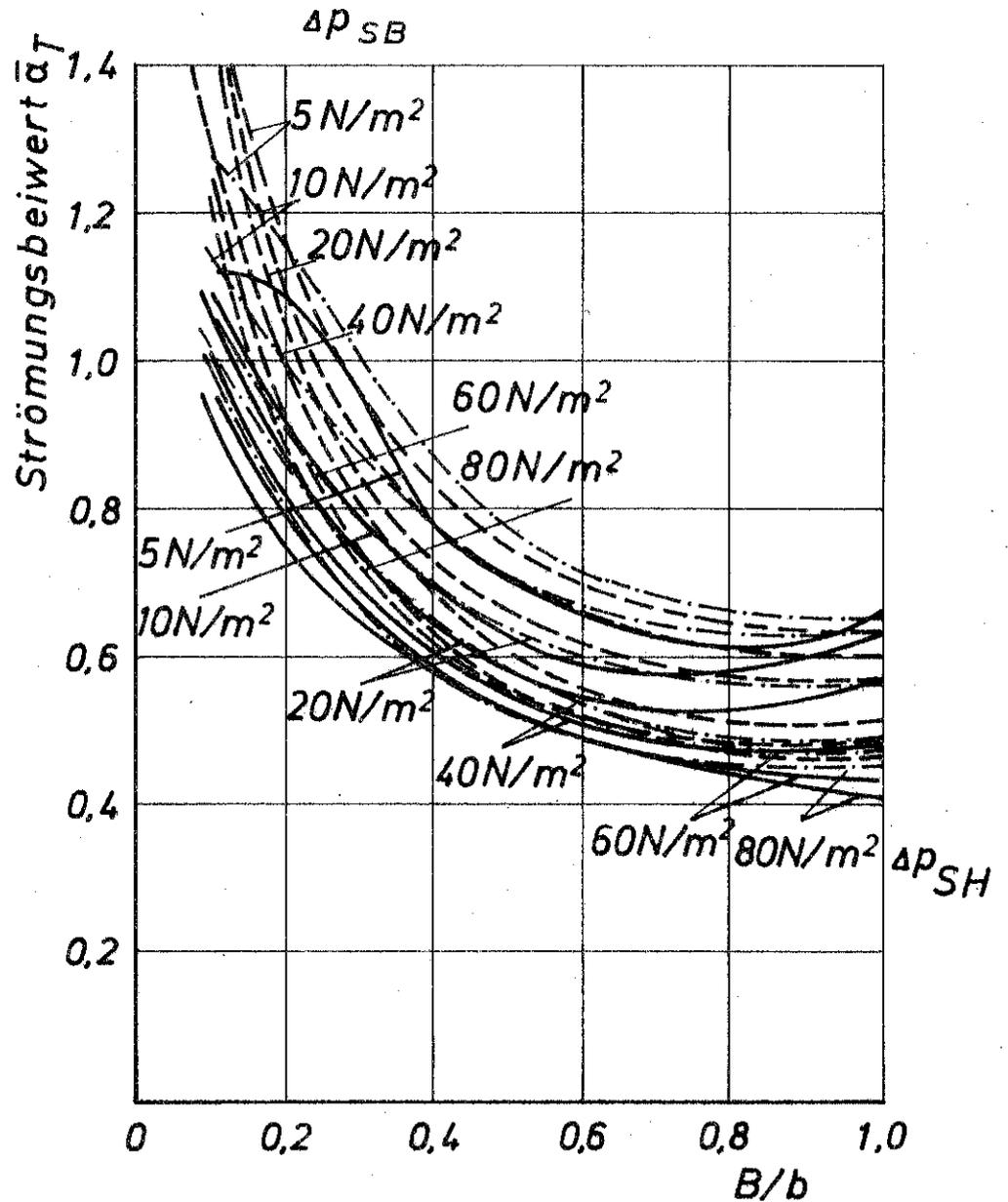


Bild 11: Strömungsbeiwert α_T in Abhängigkeit von der auf die Türbreite b bezogene Spaltbreite B bei verschiedenen Druckdifferenzen zwischen Schleuse und den angrenzenden Räumen.

- — — Tür Schleuse/Brandraum
- Tür Schleuse/ Versuchshalle ohne Boden unter der Tür
- · — · Tür Schleuse/ Versuchshalle mit Boden unter der Tür

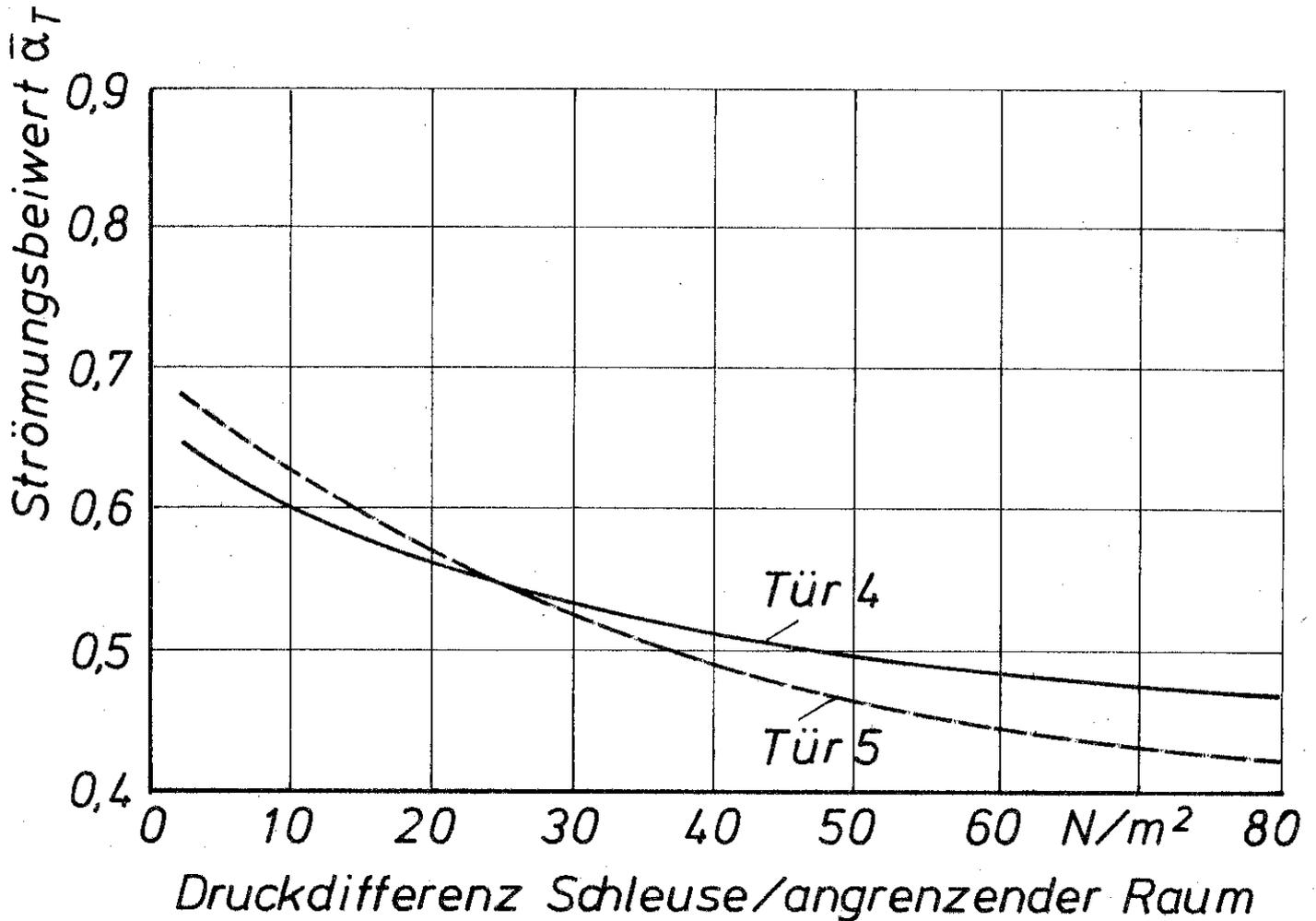


Bild 12: Abhängigkeit des Strömungsbeiwertes $\bar{\alpha}_T$ für die vollständig geöffneten Türen von der Δp Druckdifferenz zwischen der Schleuse und den angrenzenden Räumen.

— Tür Schleuse/Brandraum
- - - Tür Schleuse/Versuchshalle

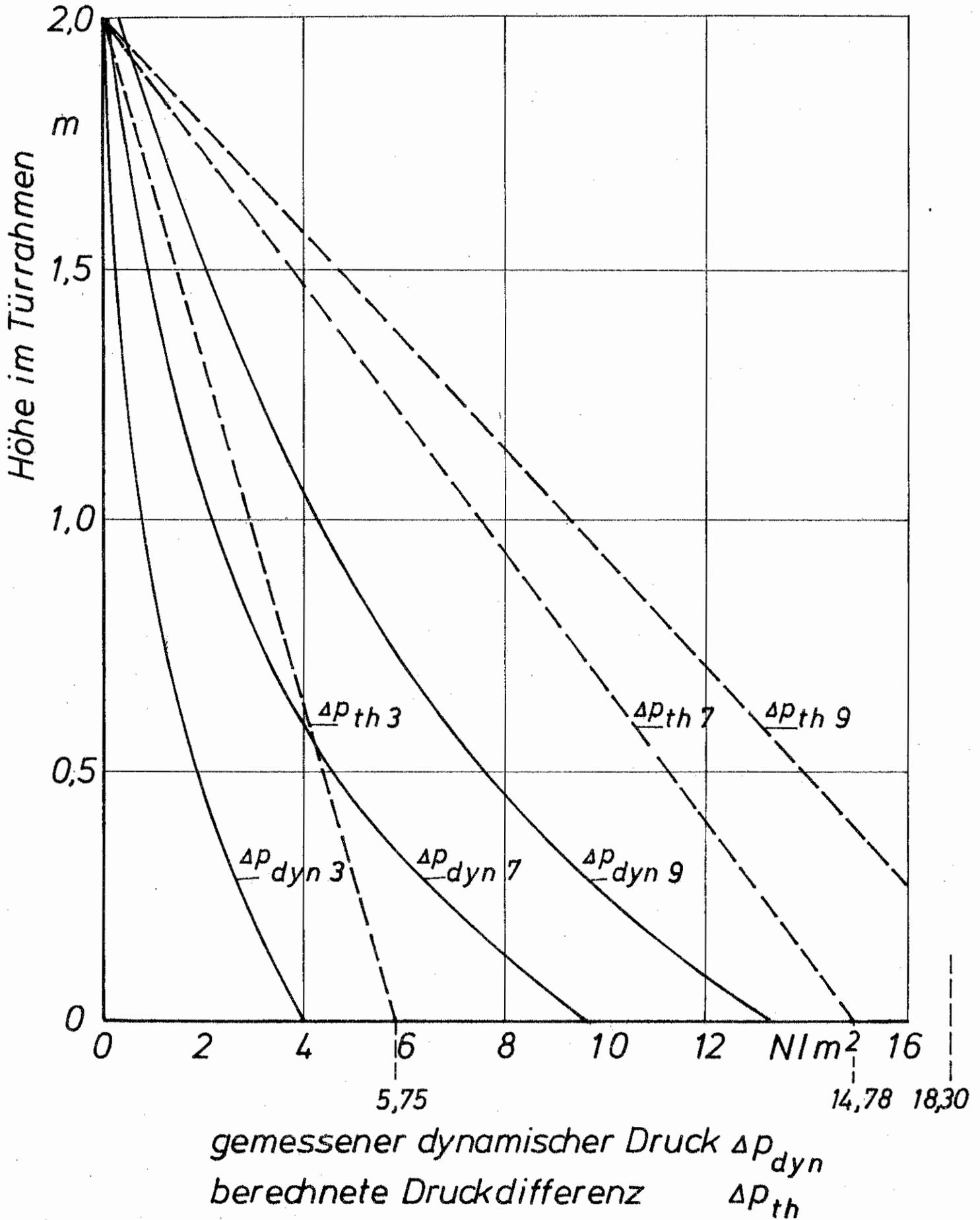


Bild 13: Gemessener dynamischer Druck Δp_{dyn} und berechnete theoretische Druckdifferenz Δp_{th} in verschiedenen Höhen im Türrahmen für die Versuche 3, 7 und 9.

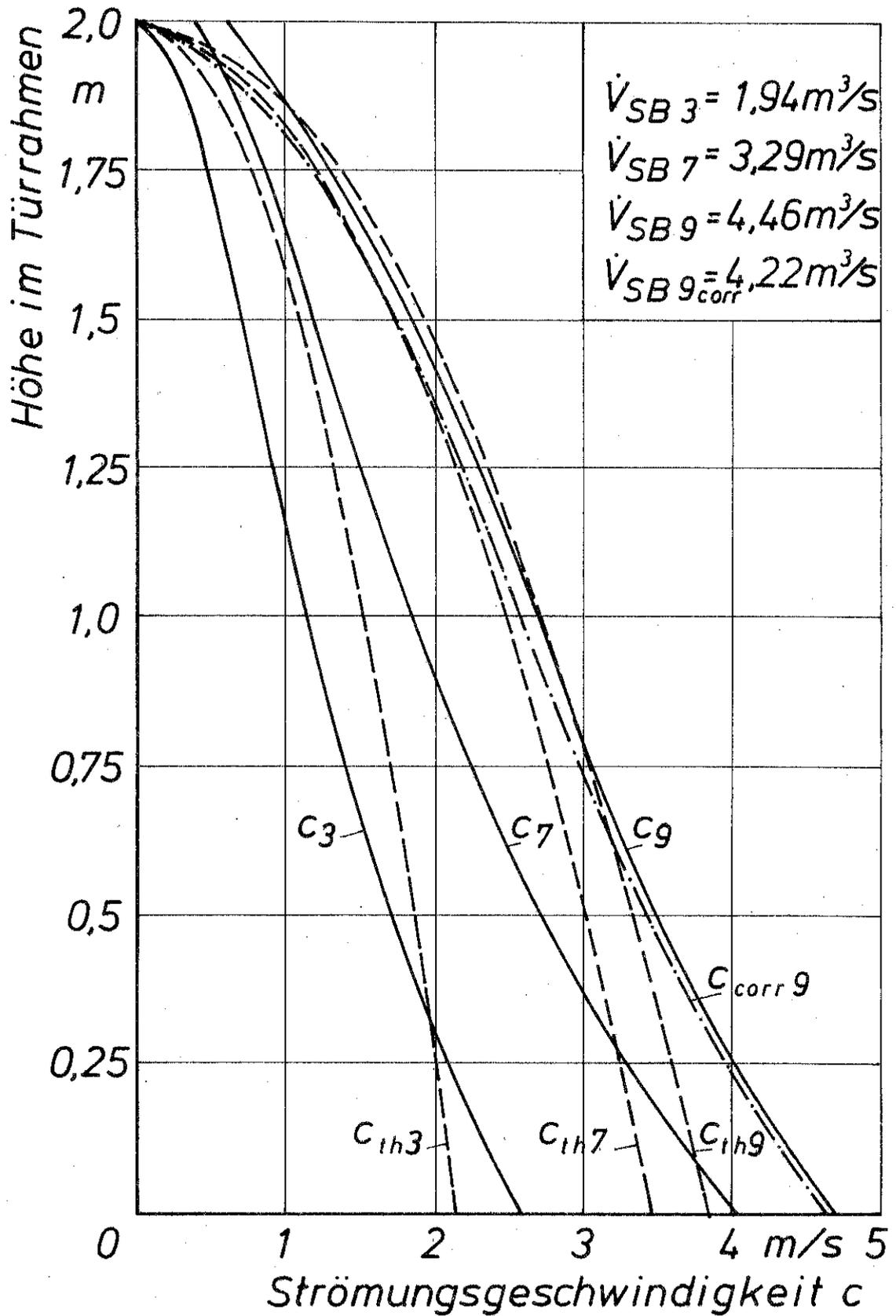


Bild 14: Strömungsgeschwindigkeit aus den in Bild 13 aufgetragenen Druckdifferenzen Δp_{dyn} und Δp_{th}

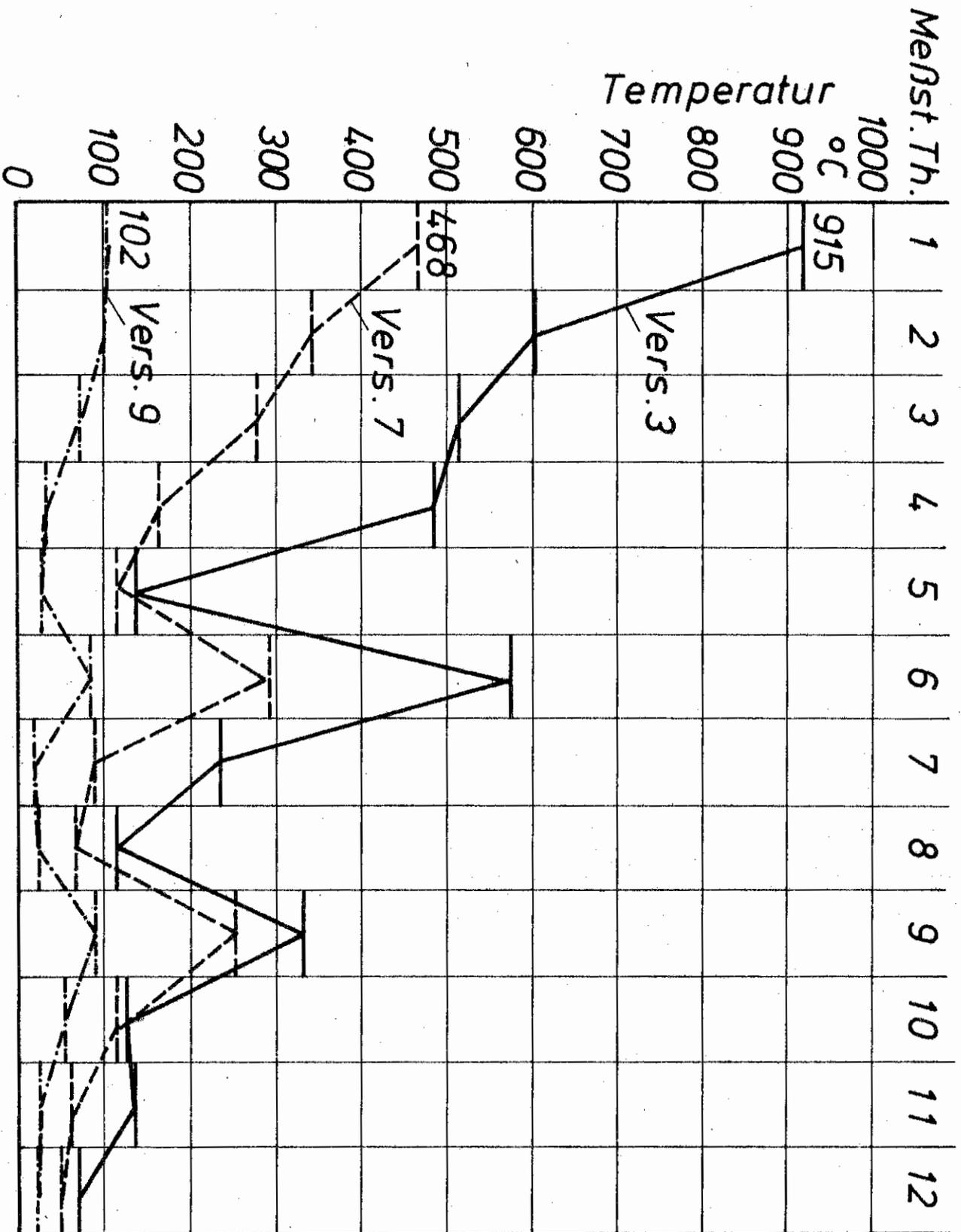
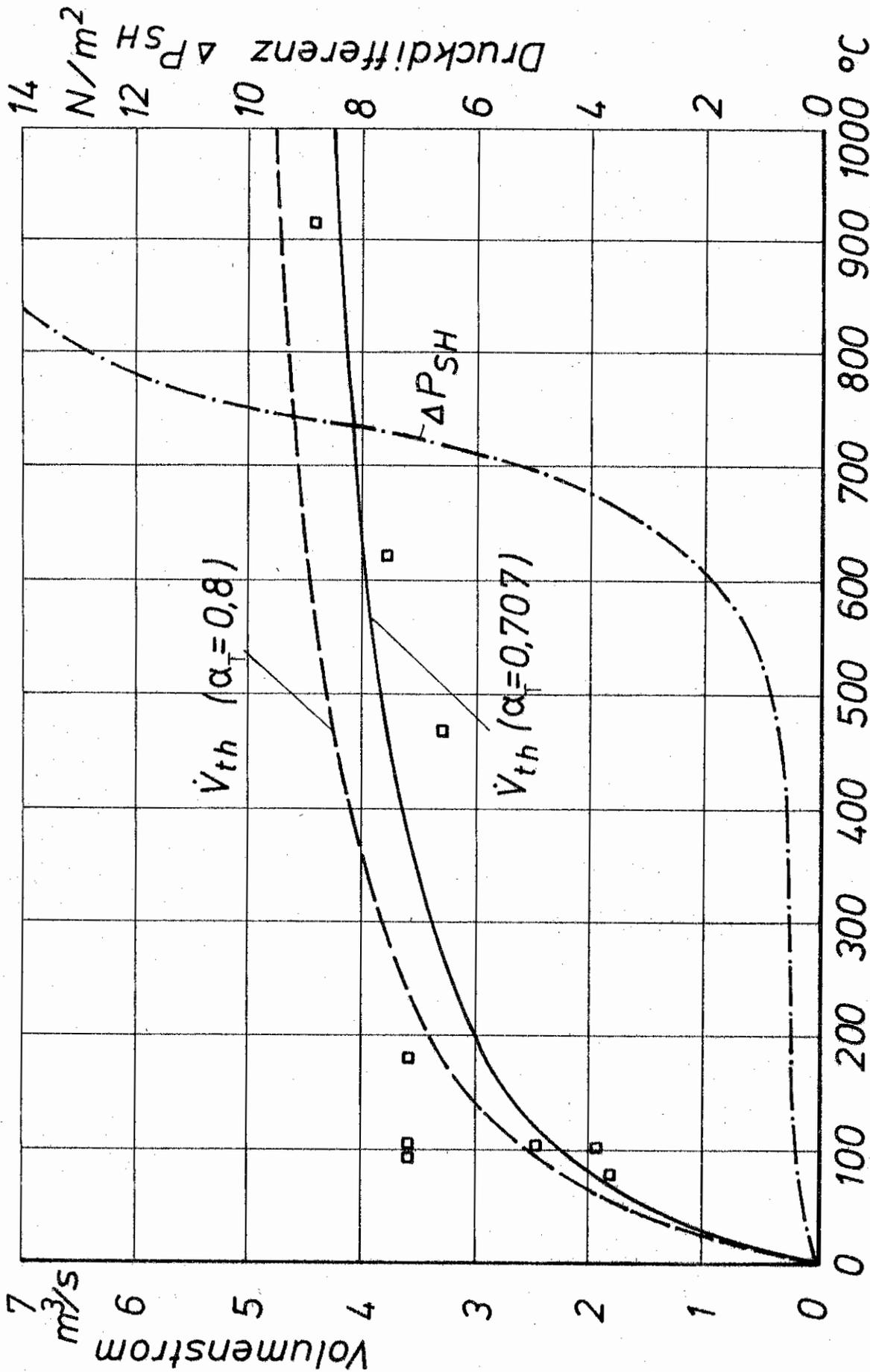


Bild 15: Zeitlicher Mittelwert der Temperaturen während der Zeit der Druckmessungen für die Versuche 3, 7 und 9



Brandraumtemperatur

Bild 16: Luftvolumenstrom durch die Türöffnung Schleuse/Brandraum in Abhängigkeit von der Brandraumtemperatur (Meßstelle $Th 1$)

\square Meßwerte
 ———— theoretische Werte mit $\alpha_T = 0,707$ nach [2]
 - - - - theoretische Werte mit $\alpha_T = 0,8$