

BRANDSCHUTZ - FORSCHUNG

DER BUNDESLÄNDER

BERICHTE

Brand- und Löschversuche mit gasförmigen
Löschmitteln in Räumen natürlicher Größe

Teil 4: Ermittlung der Volumenströme durch
Türöffnungen zur Rauchfreihaltung von
Rettungswegen.

39

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

Forschungsbericht Nr.39

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

Teil 4: Ermittlung der Volumenströme durch
Türöffnungen zur Rauchfreihaltung
von Rettungswegen.

(Fortsetzung von Forschungsbericht Nr. 35)

von

Dipl.-Ing.R.John

Forschungsstelle für Brandschutztechnik
an der Universität Karlsruhe (TH)

Karlsruhe

Januar 1980

1. EINLEITUNG

Bei einem Brand in einem Gebäude ergeben sich für die Personen innerhalb dieses Gebäudes erhebliche gesundheitliche Gefahren, durch die bei dem Brand entstehenden Brandgase. Diese Brandgase haben u.a. eine erhebliche toxische Wirkung und führen durch ihre optische Dichte dazu, daß Rettungswege nicht mehr benutzt werden können. Diese toxische und sichbehindernde Wirkung der Brandgase geht nahezu von allen brennbaren Stoffen aus. Sie wird durch die Ausrüstung der brennbaren Stoffen mit Mitteln, die die Entflammbarkeit verringern, noch gesteigert. Die unbehinderte Benutzbarkeit der Rettungswege im Brandfall ist deshalb eine wesentliche Forderung bei der Planung und Ausführung von Gebäuden.

In /1/ wurden Versuche beschrieben, bei denen der Rauchaustritt aus dem Brandraum in die unmittelbar daran angrenzende Schleuse durch einen entsprechend großen Luftvolumenstrom verhindert wurde. Die Ergebnisse dieser Versuche konnten mit Hilfe theoretischer Ansätze bestätigt werden.

Die hier durchgeführten Untersuchungen dienen dem Zweck, durch zusätzliche Maßnahmen die Luftvolumenströme zur Rauchfreihaltung von Rettungswegen gegenüber den in /1/ berechneten und gemessenen Werten zu verringern.

2. THEORETISCHE GRUNDLAGEN FÜR MASSNAHMEN ZUR RAUCHFREIHALTUNG VON RETTUNGSWEGEN

Die Rauchfreihaltung von Rettungswegen kann dadurch erreicht werden, daß durch entsprechende Luftvolumenströme, die in der Regel mechanisch erzeugt werden, die durch Temperaturunterschiede hervorgerufene Druckdifferenzen zwischen einem Brandraum und einem angrenzenden Rettungs-

weg aufgehoben werden. Die theoretischen Grundlagen für die durch Temperaturunterschiede zwischen angrenzenden Räumen hervorgerufenen Druckdifferenzen und den daraus folgenden Strömungsvorgänge sind in /2,3/ dargelegt worden. In /4,5/ sind Berechnungen über die erforderlichen Luftvolumenströme zum Schutz der Rettungswege vor einer Verqualmung durchgeführt worden. Die in /4/ durchgeführten Berechnungen werden durch die in /1/ durchgeführten Versuche bestätigt.

3. MASSNAHMEN ZUR VERRINGERUNG DER ERFORDERLICHEN LUFTVOLUMENSTRÖME

Bei der in /1/ gewählten Anordnung des Brandraumes zur Schleuse werden relativ hohe Luftvolumenströme zur Rauchfreihaltung der Schleuse (Rettungsweg) benötigt. Der zur Rauchfreihaltung erforderliche Luftvolumenstrom kann wesentlich verringert werden, wenn zwischen der Schleuse und dem Brandraum ein Vorraum angeordnet wird, in dem im Brandfall eine Verqualmung und höhere Temperaturen zugelassen werden.

Bild 1 zeigt die entsprechende Anordnung von Brandraum, Vorraum, Schleuse und Rettungsweg mit der Eintrittsstelle der Zuluft in die Schleuse sowie mit den Richtungen der bei einem Brand auftretenden Luft- bzw. Rauchgasströme. Von dem der Schleuse zugeführten Luftvolumenstrom \dot{V}_L strömt der Anteil \dot{V}_V in den Vorraum und der Anteil \dot{V}_U in den Rettungsweg. Für die weitere Betrachtung wird zunächst angenommen, dass $\dot{V}_U = 0$ ist, d.h. die Tür Schleuse/Rettungsweg ist geschlossen und vollkommen dicht. Die Türen Schleuse/Vorraum und Vorraum/Brandraum werden als vollständig geöffnet angenommen.

Da der Luftvolumenstrom \dot{V}_V in den Vorraum und damit vom Vorraum in den Brandraum kleiner als der nach /1/ zum Schutz der Rettungswege bei einem direkt angrenzenden Brandraum erforderliche Luftvolumenstrom ist, werden auch Rauchgase (\dot{V}_R) vom Brandraum in den Vorraum eindringen. Im Vorraum mischen sich diese Volumenströme und es stellt sich dort die Mischungstemperatur t_V bzw. T_V ein. Da keine Rauchgase in die Schleuse eintreten dürfen, muß das Rauchgasluftgemisch

$$\dot{V}_{VR} = \dot{V}_V + \dot{V}_R$$

wieder in den Brandraum zurückströmen. Nach /3/ und /4/ ergeben sich für die Berechnungen folgende Beziehungen: Der minimale Luftvolumenstrom \dot{V}_V , der einen Rauchgas-eintritt in die Schleuse verhindert, beträgt:

$$\dot{V}_V = \alpha \frac{2}{3} \cdot b_{T3} \cdot h_{T3}^{1,5} \cdot \sqrt{2 \cdot g \left(1 - \frac{T_L}{T_V}\right)} \quad (1)$$

Der Rauchgasvolumenstrom vom Brandraum in den Vorraum ergibt sich nach der Beziehung:

$$\dot{V}_R = \alpha \frac{2}{3} \cdot b_{T2} \cdot (h_{T2} - h_{OT2})^{1,5} \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot \left(\frac{T_R}{T_V} - 1\right)} \quad (2)$$

Mit der entsprechend geänderten Gleichung (1) kann der Volumenstrom des Rauchgasluftgemisches vom Vorraum in den Brandraum berechnet werden.

$$\dot{V}_{VR} = \alpha \cdot \frac{2}{3} \cdot b_{T2} \cdot h_{OT2}^{1,5} \cdot \sqrt{2 \cdot g \left(1 - \frac{T_V}{T_R}\right)} \quad (3)$$

Außerdem gilt:

$$\dot{V}_{VR} = T_V \left(\frac{\dot{V}_V}{T_L} + \frac{\dot{V}_R}{T_R} \right) \quad (4)$$

In den Gleichungen (1) bis (4) sowie bei allen weiteren Berechnungen wird die Dichte des Rauchgases der Dichte von Luft bei gleicher Temperatur gleichgesetzt.

Weiterhin muß gelten:

$$T_V = \frac{\dot{m}_V \cdot C_{pmV} \cdot t_V + \dot{m}_R \cdot C_{pmR} \cdot t_R}{\dot{m}_V \cdot C_{pmV} + \dot{m}_R \cdot C_{pmR}} + 273 \quad (5)$$

$$\text{mit } \dot{m}_V = \dot{V}_V \cdot \rho_O \cdot \frac{273}{T_V} \quad \text{und} \quad \dot{m}_R = \dot{V}_R \cdot \rho_O \cdot \frac{273}{T_R}$$

Die spezifische Wärme der Luft- und Rauchgase ist von der Temperatur abhängig und kann nach folgender Beziehung ermittelt werden:

$$C_{pmV} = C_L = 0,972 + 0,094 \cdot \frac{T_L}{1000} \quad \text{in kJ/kg K} \quad (6)$$

$$C_{pmR} = C_R = 0,947 + 0,143 \cdot \frac{T_R}{1000} \quad \text{in kJ/kg K} \quad (7)$$

Dabei ist für die Rauchgase folgende Zusammensetzung angenommen worden:

$$20 \text{ Vol.}\% \text{CO}_2, \quad 1 \text{ Vol.}\% \text{CO}, \quad 0,5 \text{ Vol.}\% \text{O}_2, \quad 78,5 \text{ Vol.}\% \text{N}_2$$

Die Höhe h_{OT2} in der die neutrale Druckzone zwischen Vorraum und Brandraum liegt, ergibt sich aus dem Verhältnis der Volumenströme \dot{V}_{VR} und \dot{V}_R und kann nach /3/ mit der Gleichung

$$h_{OT2} = h_{T2} \left/ \left(1 + A \sqrt{\frac{T_R}{T_V}} \right)^{2/3} \right. \quad (8)$$

mit

$$A = (\dot{V}_R \cdot T_V) / (\dot{V}_{VR} \cdot T_R)$$

berechnet werden.

Mit den Gleichungen (1) bis (8) kann iterativ die Vorraumtemperatur t_V bzw. T_V berechnet werden. Dazu wird von einer angenommenen Temperatur T_V' ausgegangen, die zwischen der Temperatur des Brandraumes und der der Zuluft liegt. Mit diesem Wert von T_V' wird mit Gleichung (1) der minimale Luftvolumenstrom \dot{V}_V' berechnet, der einen Rauchgaseintritt in die Schleuse verhindert. Um den Luftvolumenstrom \dot{V}_V' mit der Temperatur T_L auf die Temperatur T_V' zu erwärmen, muß der Rauchgasvolumenstrom \dot{V}_R' zugemischt werden. Dieser Volumenstrom kann aus der Gleichung (5) berechnet werden:

$$\dot{V}_R' = \frac{\dot{V}_V \left[C_{Lt_V}' \cdot t_V' - C_{Lt_V} \cdot t_L \right]}{C_{Rt_R} \cdot t_R - C_{Rt_V}' \cdot t_V'} \cdot \frac{T_R}{T_V'} \quad (9)$$

Mit der Gleichung (4) wird der Volumenstrom \dot{V}_{VR}' , der vom Vorraum in den Brandraum strömen muß, berechnet. Aus den Werten \dot{V}_V' , \dot{V}_R' und \dot{V}_{VR}' kann nach Gleichung (8) der Wert h_{OT2} berechnet werden. Jetzt kann über die Gleichung (2) oder (3) nachgeprüft werden, ob die gewählte Temperatur T_V' richtig ist. Bei der richtigen Wahl von T_V' muß der Betrag von \dot{V}_R' nach Gleichung (9) mit dem Betrag von \dot{V}_R' nach Gleichung (2) übereinstimmen, wenn in diese Gleichung der berechnete Wert für h_{OT2} und der angenommene Betrag T_V' eingesetzt werden. Stimmen die Beträge nicht überein, so muß T_V' verändert werden. Um unmittelbar die Übereinstimmung der Temperaturen für das gewählte Iterationsverfahren vergleichen zu können, wurde Gleichung (2) umgestellt und mit dem aus Gleichung (9) berechneten Wert \dot{V}_R' eine Temperatur T_V'' berechnet.

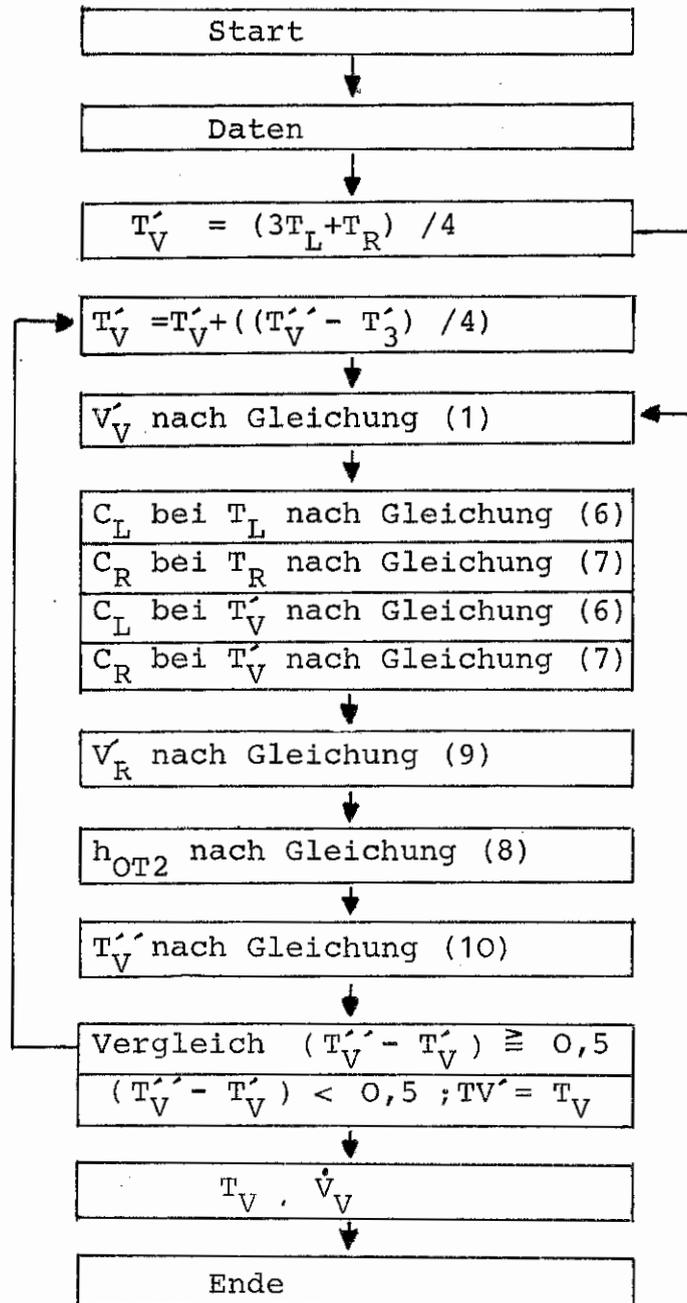
$$T_V'' = \frac{T_R}{\frac{3 V_R''}{2 \alpha b_{T2} (h_{T2} - h_{OT2})^{1,5}}} \cdot \frac{1}{2g} + 1 \quad (10)$$

Diese Temperatur wäre im Vorraum erforderlich, um bei den berechneten Werten \dot{V}_R und h_{OT2} den Rauchgasvolumenstrom vom Brandraum in den Vorraum zu ergeben. Bei der richtigen Wahl von T_V' gilt:

$$T_V' = T_V'' \text{ nach Gleichung (10) } = T_V$$

Weichen die beiden Temperaturwerte T_V' und T_V'' voneinander ab, so ist die Berechnung mit einem neuen Wert für T_V' zu wiederholen.

Die mit einer Rechenanlage durchgeführten Berechnungen erfolgten nach folgendem Schema:



Die so berechneten Werte für die Vorraumtemperatur T_V und die minimalen Luftvolumenströme \dot{V}_V sind im Bild 2 in Abhängigkeit von der Brandraumtemperatur aufgetragen. Ihnen liegen folgende Daten zugrunde:

Höhe der Türen $h_{T2} = h_{T3} = 2,0$ m

Breite der Türöffnungen $b_{T2} = b_{T3} = 1,0$ m

Temperatur der Zuluft $t_V = 0$ °C, 20 °C und 40 °C

Strömungsbeiwert an den Türen 2 und 3 $\alpha = 0,8$ nach /1/.

Damit der Luftvolumenstrom \dot{V}_V von der Schleuse in den Vorraum strömt, ist in der Schleuse ein Überdruck erforderlich. Dieser Überdruck läßt sich aus den durch die vorangegangene Berechnung ermittelten Werten T_V und h_{OT2} berechnen, wenn zusätzlich die Lage und Höhe der Öffnungen im Brandraum zur freien Umgebung (z.B. zerstörtes Fenster) bekannt sind.

In der Fensteröffnung sowie der Türöffnung 2 des Brandraumes gibt es jeweils eine Höhe, in der der Druck im Brandraum in dieser Höhe mit dem Druck der angrenzenden Räume in dieser Höhe übereinstimmt. In dieser neutralen Druckzone erfolgt, da $\Delta p = 0$ ist, keine Strömung. Nach /3/ kann die Höhe der neutralen Druckzone zwischen einem Brandraum mit einer Öffnung, z.B. Fensteröffnung, zur freien Umgebung berechnet werden (siehe Bild 1).

$$h_{OF} = m_{OF} \cdot F_1 + F_2 \quad (11)$$

darin ist:

$$m_{OF} = \frac{1}{1 + \left[B \cdot \sqrt{\frac{T_R}{T_L}} \right]^{2/3}} \quad (12)$$

mit

$$B = (V_{RO} + (\lambda - 1) \cdot V_{LO}) / (V_{LO} \cdot \lambda) \quad (13)$$

Die Höhe der neutralen Druckzone an der Tür 2 (Vorraum/Brandraum) ist nach Gleichung (8) zu berechnen. Da in der Regel die Beträge von h_{OF} und h_{OT2} verschieden sind, haben die Absolutwerte der Drücke zwischen Brandraum und freier Umgebung sowie zwischen Brandraum und Vorraum auch unterschiedliche Werte, da der Absolutdruck im Brandraum von der Höhe abhängt. Die Druckdifferenz zwischen diesen Druckzonen an der Tür 2 und am Fenster des Brandraumes beträgt:

$$\Delta p_B = \rho_0 \cdot g \cdot 273 \cdot (h_{OT2} - h_{OF}) \cdot \left[\frac{1}{T_L} - \frac{1}{T_R} \right] \quad (14)$$

Die Druckdifferenz zwischen Schleuse und der neutralen Druckzone Brandraum und Vorraum (Tür 2) beträgt unter der Annahme, daß die neutrale Druckzone an der Tür 3 an der Oberkante liegt:

$$\Delta p_{VS} = \rho_0 \cdot g \cdot 273 \cdot (h_{T3} - h_{OT2}) \cdot \left[\frac{1}{T_L} - \frac{1}{T_V} \right] \quad (15)$$

Die Druckdifferenz Schleuse/freie Umgebung beträgt damit

$$\Delta p_{SU} = \Delta p_B + \Delta p_{VS} \quad (16)$$

Herrscht im Treppenraum der Druck der freien Umgebung in der entsprechenden Höhe, so entspricht Δp_{SU} auch der Druckdifferenz zwischen Schleuse und Treppenraum. Diese nach den Gleichungen (11) bis (16) berechneten Druckdifferenzen sind ebenfalls mit in Bild 2 aufgetragen. Dabei ist für F1 ein Wert von 1,2 m und für F2 ein Wert von 0,8 m angenommen worden.

Mit dieser Druckdifferenz kann der Luftvolumenstrom \dot{V}_U von der Schleuse in angrenzende Rettungswege entsprechend den in /1/ ermittelten Strömungsbeiwerten berechnet werden.

$$\dot{V}_U = \alpha A_1 \sqrt{\frac{2 \Delta p_{SU}}{\rho_L}} \quad (17)$$

Ist die Tür 1 völlig geöffnet, so ist $A_1 = b_1 \cdot h_1$.

3. BRANDVERSUCHE

Zur Überprüfung der theoretisch berechneten und in Bild 2 in Abhängigkeit von den Brandraumtemperaturen aufgetragenen Werte von t_V , \dot{V}_V und Δp_{SU} wurden Brandversuche im Maßstab 1:1 durchgeführt.

3.1. Versuchsaufbau

3.1.1. Versuchsraum

Die Versuche wurden in einem in der Versuchshalle der Forschungsstelle für Brandschutztechnik vorhandenen Brandversuchsraum durchgeführt. Für die Versuche wurde der Brandversuchsraum unterteilt und eine Schleuse angebaut.

Der Grundriß des Brandversuchsraumes ist in Bild 3 dargestellt. Von dem 2,5 m hohen Brandraum 1, Grundfläche 21 m², wurde durch eine Trennwand mit einer Öffnung in der Größe einer Tür ein 8 m² großer Vorraum abgetrennt. An diesem Vorraum ist die ebenfalls 2,5 m hohe Schleuse 3 mit einer Grundfläche von ca. 4 m² angebaut. Der Brandraum besitzt eine 2 m breite Fensteröffnung 4, die 0,85 m über dem Boden beginnt und 1 m hoch ist. Der freie Querschnitt der Öffnung 5 und der Türen 6 und 7 ist 820 mm breit und 2 000 mm hoch.

Der Schleuse wurde an der Stelle 8 die Frischluft zur Rauchfreihaltung von dem Axialgebläse 9 über ein Rohr von 800 mm Innendurchmesser zugeführt. Der Volumenstrom kann durch die motorisch angetriebene Drosselklappe 10 bis zu einem Maximalwert von 25 000 m³/h verändert werden.

3.1.2. Meßeinrichtungen

Bei der Durchführung der Versuche wurden an 46 Stellen Temperaturen sowie an 15 Stellen Druckdifferenzen und dynamische Drücke gemessen. Die den Meßwerten entsprechenden elektrischen Spannungen wurden einem rechnergesteuerten Meßwertaufnehmer zugeführt. Alle 4 s wurden diese Meßstellen während der Versuchsdauer abgerufen, digitalisiert und abgespeichert.

Die Messung der Temperaturen erfolgte mit 1,6 mm dicken Mantelthermoelementen. Die Druckdifferenzen bzw. die dynamischen Drücke wurden mittels induktiver Druckaufnehmer, Meßbereich 0 bis 250 N/m², in elektrische Spannungen umgesetzt. Die Anordnung der Meßstellen ergibt sich aus den Bildern 4 bis 6. Dabei gibt das Bild 5 eine räumliche Darstellung der Temperaturmeßstellen im Brandraum und im Vorraum wieder.

Die Temperatur der der Schleuse zugeführten Luft wurde im Zuluftkanal gemessen (T4 in Bild 4). In der Mitte der Tür Schleuse/Vorraum waren in der im Bild 4 eingezeichneten Höhe über dem Boden die 3 Temperaturmeßstellen T1, T2 und T3 angebracht. Weitere Temperaturmeßstellen (T14 bis T18 in Bild 6) waren in unterschiedlicher Höhe in der Mitte der Öffnung Vorraum/Brandraum angebracht. Mit diesen Meßstellen innerhalb der Öffnungen zwischen Schleuse und Vorraum bzw. Vorraum und Brandraum konnte beurteilt werden,

ob kalte Zuluft, erwärmtes Rauchgas- Luftgemisch oder heiße Rauchgase durch sie strömten. Die Temperaturverteilung im Vorraum wurde an den Temperaturmeßstellen T5 bis T13 (siehe die Bilder 4 bis 6) gemessen. Im Brandraum waren 21 Temperaturmeßstellen installiert (T19 bis T39). Ihre genaue Lage im Brandraum ergibt sich aus den Bildern 5 und 6.

In der Mitte der Tür Schleuse/Vorraum wurden in 3 verschiedenen Höhen (siehe Bild 4) mit Prandtlrohren an den Meßstellen P1 bis P3 die dynamischen Drücke der in den Vorraum strömenden Luft gemessen, um daraus die Geschwindigkeiten bzw. den von der Schleuse in den Vorraum strömenden Luftvolumenstrom zu bestimmen. Als Indikator für die Luftströmung an der oberen Kante der Tür Schleuse/Vorraum wurde die Druckdifferenz zwischen den Meßstellen P_{OA} und P_{OB} (siehe Bild 4) sowie die Temperaturen an den Meßstellen T_{OA} und T_{OB} gemessen.

An den Meßstellen P8 bis P12 (siehe Bild 6) wurden in verschiedenen Höhen in der Mitte der Öffnung Vorraum/Brandraum die dynamischen Drücke zur Bestimmung der Volumenströme der Rauchgas/Luftgemische vom Vorraum in den Brandraum (Meßstellen P10 bis P12) und zur Bestimmung der Rauchgasvolumenströme vom Brandraum in den Vorraum (Meßstellen P8 und P9) gemessen.

Die statischen Drücke in den einzelnen Räumen wurden an den Meßstellen P18 bis P20 in der Schleuse, an den Meßstellen P5 bis P7 im Vorraum und an den Meßstellen P13 bis P17 im Brandraum abgenommen. Da nicht genügend Druckaufnehmer für alle Meßstellen zur Verfügung standen, wurden nur an einigen der Meßstellen während eines Versuches die Drücke aufgezeichnet. Bei den verschiedenen Brandversuchen wurden die Meßstellen jeweils gewechselt. Mit der Meßstelle

P4 wurde der Druck in der Zuluftleitung gemessen.

3.2. Brandlast

Um im Brandraum unterschiedlich hohe Temperaturen zu erhalten, wurde die Masse der Brandlast und ihre Zusammensetzung bei den einzelnen Versuchen verändert. Für niedrige Brandraumtemperaturen wurde als Brandlast Brennspritus in Wannen mit Flüssigkeitsoberflächen zwischen ca. $0,5 \text{ m}^2$ und $1,0 \text{ m}^2$ verwendet. Höhere Temperaturen wurden erreicht, wenn die Flüssigkeitsoberfläche bis auf ca. 2 m^2 erhöht wurde. Bei den Versuchen mit den höchsten Brandraumtemperaturen bis ca. $1100 \text{ }^\circ\text{C}$ wurde zusätzlich zum Brennspritus in der ca. 2 m^2 großen Wanne noch Holz und Altmöbel verwendet.

3.3. Versuchsdurchführung

Die Versuche zur Ermittlung des erforderlichen minimalen Luftvolumenstromes zur Rauchfreihaltung der Schleuse wurden wie folgt durchgeführt. 2 min vor der Entzündung der Brandlast (Spiritus) wurde die Datenerfassungsanlage eingeschaltet, um die Versuchsdaten vor der Entzündung zu registrieren. 2 min nach dem Entzünden wurde das Axialgebläse des Zuluftsystems eingeschaltet. Die Drosselklappe war dabei geschlossen. Bei etwa konstanter Deckentemperatur im Brandraum wurde die Drosselklappe stufenweise so weit geöffnet, bis die Temperatur an der Meßstelle T_{OA} etwa der Zulufttemperatur entsprach bzw. bis eine Strömung an den Meßstellen P_1 und P_{OA} , P_{OB} in Richtung Schleuse/Vorraum registriert wurde.

In zeitlichen Abständen, bzw. wenn die Deckentemperatur im Lauf der Versuchsdauer abnahm, wurde die Stellung der Drosselklappe stufenweise soweit geschlossen, bis Rauchgase an der Oberkante der Tür 3 in die Schleuse einströmen, um sie danach wieder etwas zu öffnen. Durch diese Maßnahme wurde erreicht, daß zur Rauchfreihaltung der Schleuse immer der minimale Luftvolumenstrom einströmte.

Zur Bestimmung des minimal erforderlichen Luftvolumenstromes zur Rauchfreihaltung der Schleuse wurden bei der Auswertung der Versuchsergebnisse die Zeitabschnitte der Brandversuche herangezogen, in denen bei konstanter Brandraumtemperatur während einer Zeitdauer von mindestens 1 min der Eintritt von Rauchgasen in die Schleuse verhindert wurde.

4. MESSWERTE

Von den bei den Versuchen gemessenen Temperaturen sind in den Bildern 7, 8.1 und 8.2 einige charakteristische Kurvenverläufe dargestellt.

Bild 7 zeigt den Temperaturverlauf an den Meßstellen im Bereich der Tür Schleuse/Vorraum, der Zuluft in die Schleuse und an der Meßstelle T29 in der Mitte des Brandraumes unterhalb der Decke in der Anfangsphase eines Versuches. Sofort mit dem Entzünden des Brennspirituses bei einer Versuchszeit von 2 min stieg die Deckentemperatur steil an. Mit einer zeitlichen Verzögerung von ca. 0,1 min stiegen auch die Temperaturen an der Oberkante der Tür Schleuse/Vorraum an. Mit weiteren zeitlichen Verzögerungen erfolgte der Anstieg der Temperaturen in der Tür in 1,0 m und 0,125 m Höhe. Mit geschlossener Drosselklappe wurde

das Zuluftgebläse bei einer Versuchszeit von 3,7 min eingeschaltet. Mit dem Öffnen der Drosselklappe bei einer Versuchszeit von 5,25 min sanken alle Temperaturen an der Tür Schleuse/Vorraum etwa auf die Temperatur der Zuluft ab. Die Deckentemperatur erhöhte sich durch den vergrößerten Zuluftstrom von ca. 700 °C auf etwa 870 °C.

Im Bild 8.1 ist in Abhängigkeit von der Versuchszeit der Verlauf der Deckentemperaturen T20, T29 und T37 (siehe Bild 6) dargestellt. Die bei diesem Versuch im Vorraum gemessenen Temperaturen T8 bis T10 sind im Bild 8.2 über der Versuchszeit aufgetragen. Zum Vergleich ist auch die Temperatur der Zuluft in die Schleuse mit eingezeichnet.

In den Bildern 9 und 10 sind die aufgrund der gemessenen dynamischen Drücke in den Türöffnungen berechneten Strömungsgeschwindigkeiten für verschiedene Zeitintervalle eines Versuches dargestellt. Dabei entsprechen die eingezeichneten Werte der mittleren Geschwindigkeit während des angegebenen Zeitintervalls. Im Bild 9 sind die Geschwindigkeiten der Luft von der Schleuse in den Vorraum in den Zeitintervallen 6 min bis 8 min, 11,8 min bis 12,8 min und 20 min bis 22,8 min dargestellt. Wie aus dem Kurvenverlauf hervorgeht, strömt über den ganzen Türquerschnitt Luft in den Vorraum. In Bild 10 sind die in denselben Zeitintervall in der Türöffnung Vorraum/Brandraum auftretenden Geschwindigkeiten eingezeichnet. Durch diese Türöffnung strömen im oberen Teil Rauchgase aus dem Brandraum in den Vorraum, während im unteren Teil ein Gemisch aus Rauchgas und Frischluft aus dem Vorraum in den Brandraum strömt.

Im Bild 11 sind die zeitlichen Mittelwerte der Temperaturen in den Zeitintervallen 6 min bis 8 min, 11,8 min bis 12,8 min und 20 min bis 22,8 min im Bereich der Tür Schleuse/Vorraum dargestellt. Dabei gibt die Gerade 1 die Temperatur der

der Schleuse zugeführten Frischluft wieder. Die in der Türöffnung an den Meßstellen T1 bis T3 als zeitliche Mittelwerte in den angegebenen Zeitintervallen ermittelten Werte sind als Kurve 2 eingetragen. Kurve 3 gibt die an den Meßstellen T5, T8 und T11 ermittelten Temperaturen als zeitlichen Mittelwert im angegebenen Zeitintervall im Vorraum wieder. Der arithmetische Mittelwert der zeitlichen Mittelwerte der Temperaturen an den Meßstellen T8 bis T10 im angegebenen Zeitintervall ist durch die Gerade 4 dargestellt. Die genaue Lage der Meßstellen ergibt sich aus den Bildern 4 und 5. Die Temperaturen im Bereich der Öffnung Vorraum/Brandraum sind für den Zeitintervall 6 min bis 8 min im Bild 12 und für die Intervalle 11,8 min bis 12,8 min sowie 20 min bis 22,8 min im Bild 13 dargestellt. Die Kurve 1 gibt die zeitlichen Mittelwerte im jeweiligen Zeitintervall der Temperaturen an den Meßstellen T6, T9 und T12 im Vorraum vor der Öffnung zum Brandraum wieder. Die zeitlichen Mittelwerte der Temperaturen in der Öffnung Vorraum/Brandraum, Meßstelle T14 bis T18 (siehe Bild 6) werden durch die Kurve 2 wiedergegeben. Im Brandraum, vor der Öffnung zum Vorraum, herrschen die durch die Kurve 3 als zeitlicher Mittelwert der Meßstellen T20, T23 und T26 gemessenen Werte. Der arithmetische Mittelwert der zeitlichen Mittelwerte aller 9 Deckentemperaturen im Brandraum innerhalb des angegebenen Zeitintervalls ist durch die Gerade 4 dargestellt.

In den in den Bildern 9 bis 13 dargestellten Zeitintervalle 6 min bis 8 min und 20 min bis 22,8 min strömten keine Rauchgase in die Schleuse, im Zeitintervall 11,8 min bis 12,8 min betrug der Zuluftvolumenstrom nur ca. 75% des in diesem Zeitintervall von der Brandraumtemperatur abhängigen Mindestvolumenstromes zur Rauchfreihaltung der Schleuse, sodaß Rauchgase in die Schleuse einströmten.

5. VERGLEICH DER MESSERGEBNISSE MIT DEN THEORETISCHEN WERTEN

5.1. Volumenströme zur Rauchfreihaltung der Schleuse

Die ermittelten Volumenströme in einem begrenzten Zeitintervall, die zur Rauchfreihaltung der Schleuse und damit der an die Schleuse angrenzenden Rettungswege erforderlich sind, sind im Bild 14 in Abhängigkeit von der Brandraumtemperatur aufgetragen. Als Brandraumtemperatur wurde hierbei der arithmetische Mittelwert der zeitlichen Mittelwerte der 9 Deckentemperaturen im Brandraum im angegebenen Zeitintervall genommen. Zusätzlich zu den gemessenen Luftvolumenströmen sind die nach dem im Abschnitt 3 angegebenen Beziehungen theoretisch berechneten Luftvolumenströme für die hier vorliegenden Verhältnisse mit eingezeichnet. Die gemessenen Volumenströme liegen oberhalb des theoretischen Verlaufs. Wird eine Kurve (2) durch die Meßwerte gelegt, so liegen die Volumenströme nach dieser Kurve um ca. 15% über den theoretischen Werten.

5.2. Temperaturen im Vorraum

Im Bild 15 sind die im Vorraum gemessenen Temperaturen über der Brandraumtemperatur aufgetragen. Dabei ist als Vorraumtemperatur der arithmetische Mittelwert der zeitlichen Mittelwerte der im Vorraum in 1,5 m Höhe über dem Boden an der Meßstelle T8, T9 und T10 (siehe Bild 5) innerhalb eines bestimmten Zeitintervalls gemessenen Temperaturen aufgetragen. Wie in Bild 14, so ist auch im Bild 15 der theoretische Verlauf der Vorraumtemperaturen in Abhängigkeit von der Brandraumtemperatur für die bei diesen Versuchen vorliegenden Verhältnisse eingezeichnet. Die gemessenen

Temperaturen liegen nahezu alle unterhalb der theoretischen Werte.

5.3. Überdruck in der Schleuse

Die mit den Gleichungen (14), (15) und (16) berechneten Druckdifferenzen sind im Bild 16 in Abhängigkeit von der Brandraumtemperatur für die bei den Versuchen vorliegenden Verhältnisse aufgetragen. Ihre Richtigkeit konnte durch die Versuchsergebnisse nicht nachgeprüft werden, da an den Meßstellen sehr starke Luftströmungen auftraten, die eine genaue Bewertung der Ergebnisse stark beeinträchtigten. Die gemessenen Werte lagen jedoch zu 90% zum Teil wesentlich unter den theoretischen Werten. Dagegen wurde eine gute Übereinstimmung der Druckdifferenzen zwischen den im selben Raum angebrachten Meßstellen mit den theoretischen Werten festgestellt. Für die Berechnung des aus der Schleuse in den angrenzenden Rettungsweg strömenden Luftvolumenstromes sind daher die mit den Gleichungen (14) bis (16) berechneten Druckdifferenzen bis zur Nachprüfung durch weitere Versuche einzusetzen.

5.4. Beurteilung der Versuchsergebnisse

Die Versuche haben gezeigt, daß mit dem hier verwendeten Lüftungssystem die Schleuse rauchfrei gehalten werden kann. In die Schleuse eingedrungene Rauchgase wurden, wie Bild 7 zeigt, herausgespült. Während des anschließenden Versuchsablaufes konnte das Eindringen weiterer Rauchgase verhindert werden, wenn der zugeführte Volumenstrom nicht unter einen bestimmten Wert gedrosselt wurde. Der zur Rauchfreihaltung der Schleuse erforderliche Luftvolumenstrom lag um ca. 15% über den theoretischen Werten (siehe Bild 14). Die im Vorraum gemessenen Temperaturen in 1,5 m Höhe lagen

zum größten Teil unterhalb der theoretisch ermittelten Werte, (siehe Bild 15). Dieser Sachverhalt deutet daraufhin, daß der der Schleuse zur Rauchfreihaltung zugeführte Luftvolumenstrom etwas größer als der erforderliche minimale Luftvolumenstrom war. Daraus folgt, daß die ermittelten Volumenströme, die den theoretischen Werten plus 15% entsprechen, eine gewisse Sicherheit gegenüber höheren Brandraumtemperaturen beinhalten. Die Luftvolumenströme zur Rauchfreihaltung der Schleuse und der angrenzenden Rettungswegen in Abhängigkeit von der zu erwartenden Brandraumtemperatur können daher anhand der Kurve 2 aus Bild 14 entnommen werden, sofern die vorliegenden Verhältnisse mit denen der Versuchsbedingungen übereinstimmen. Weichen die vorliegenden Verhältnisse von den Versuchsbedingungen ab, so ergibt sich der erforderliche Luftvolumenstrom zur Rauchfreihaltung der Schleuse aus dem theoretischen Wert plus einem Zuschlag von 15%. Dieser Luftvolumenstrom muß von der Schleuse in den Brandraum strömen. Ist die Tür Schleuse/angrenzend Rettungsweg (hier Versuchshalle) geöffnet, so strömt durch diese Öffnung ein zusätzlicher Luftvolumenstrom ab, der der Schleuse mit zugeführt werden muß. Der Luftvolumenstrom ist bei gegebenem Türquerschnitt vom Überdruck in der Schleuse gegenüber der Umgebung abhängig. Der Überdruck konnte bei den durchgeführten Versuchen nicht mit ausreichender Genauigkeit gemessen werden. In der Schleuse traten so starke Luftverwirbelungen ein, daß dadurch Fehlmessungen der Druckdifferenzen hervorgerufen wurden. Die im Bild 16 in Abhängigkeit von der Brandraumtemperatur theoretisch für die hier vorliegenden Verhältnisse berechneten Überdrücke in der Schleuse konnten daher mit diesen Versuchen nicht nachgeprüft werden.

6. VERGLEICH DER ERFORDERLICHEN LUFTVOLUMENSTRÖME ZUR RAUCHFREIHALTUNG

In /1/ wurde der in Abhängigkeit von der Brandraumtemperatur erforderliche minimale Luftvolumenstrom zur Rauchfreihaltung der Schleuse für den Fall ermittelt, daß zwischen Brandraum und Schleuse kein Vorraum lag. Bei diesem Versuchsaufbau war die Trennwand Vorraum/Brandraum im Bild 3 nicht vorhanden. Der bei diesen Versuchen in Abhängigkeit von der Brandraumtemperatur ermittelte Luftvolumenstrom ist zum Vergleich mit den bei diesen Versuchen mit Vorraum ermittelten Luftvolumenströmen in Bild 17 aufgetragen. Ein Vergleich der erforderlichen Luftvolumenströme zeigt, daß mit Vorraum (Kurve 1) nur etwa 55% des minimalen Luftvolumenstromes ohne Vorraum zwischen Brandraum und Schleuse (Kurve 2) zur Rauchfreihaltung der Schleuse benötigt werden.

7. ZUSAMMENFASSUNG

Um das Eindringen von Rauchgasen aus dem Brandraum in Rettungswege durch z.B. offene Türen zu verhindern, sind in früheren Arbeiten die Gesetzmäßigkeiten untersucht worden, nach denen sich die Rauchgase ausbreiten. Diese theoretischen Untersuchungen sind bisher durch Brandversuche in Neubauten mit verschiedenen Lüftungssystemen sowie durch eine Versuchsreihe in einem Modellbrandraum natürlicher Größe untersucht worden. Bei den Modellversuchen grenzte die Schleuse direkt an den Brandraum.

Theoretische Untersuchungen haben ergeben, daß der zur Rauchfreihaltung von Rettungswegen erforderliche Luftvolumenstrom wesentlich verringert werden kann, wenn zwischen einem zu schützenden Rettungsweg (Schleuse) und

einem Brandraum ein Vorraum angeordnet wird, der im Brandfall verqualmen darf und in dem höhere Temperaturen auftreten können. Die Berechnungen wurden durch eine Fortführung der o.g. Modellversuche in der Versuchshalle der Forschungsstelle für Brandschutztechnik nachgeprüft. Von dem ursprünglich 21 m^2 großen Brandversuchsraum wurde ein ca. 8 m^2 großer Vorraum abgetrennt, dem eine Schleuse mit ca. 4 m^2 Grundfläche nachgeordnet ist. Die Höhe dieser Räume beträgt 2,5 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 mehreren Versuchen mit unterschiedlichen Brandlasten und damit unterschiedlichen maximalen Brandraumtemperaturen wurde geprüft, mit welchen Luftvolumenströmen die Schleuse rauchfrei gehalten werden konnte. Weiterhin wurden auch die Temperaturen im Vorraum gemessen und mit den theoretischen Werten verglichen.

Die Versuchsergebnisse haben gezeigt, daß die erforderlichen Luftvolumenströme ca. 15% über den theoretisch berechneten Werten lagen und daß die Temperaturen im Vorraum in den meisten Fällen unter den berechneten Werten lagen.

Ein Vergleich der zur Rauchfreihaltung der Schleuse in Abhängigkeit von der Brandraumtemperatur erforderlichen Luftvolumenströme zeigt, daß bei der hier gewählten Anordnung mit einem Vorraum zwischen Brandraum und Schleuse nur ca. 55% des Luftvolumenstromes erforderlich war, der ohne Vorraum gemessen wurde.

8. FORMELZEICHEN

A	Fläche
b	Breite der Tür in m
C_{pm}	Spezifische Wärme in kJ/kg K
F_1	Höhe der Fensteröffnung in m
F_2	Höhe der Fensterbrüstung in m
g	Erdbeschleunigung 9,81 m/s ²
h	Höhe in m
h_0	Höhe der neutralen Druckzone über dem Boden in m
m	Massenstrom in kg/s
p	Druck in bar
Δp_0	Druckdifferenz in N/m ²
t	Temperatur in °C
T	Temperatur in K ($T_0=273$ K)
V_{LO}	Luftvolumen
V_{RO}	Rauchgasvolumen
\dot{V}	Volumenstrom in m ³ /s
α	Strömungsbeiwert
ρ	Dichte der Luft bzw. Rauchgase b. T und p in kg/m ²
ρ_0	Dichte der Luft bzw. Rauchgase b. T_0 und p = 1.013 bar
λ	Luftzahl

INDICES

B	Brandraum
F	Fenster
L	Luft der freien Umgebung
R	Rauchgase
S	Schleuse
T _{1,2,3}	Tür 1, 2, 3
U	freie Umgebung
V	Vorraum

9. LITERATURVERZEICHNIS

- /1/ John,R.: Brand-und Löschversuch mit gasförmigen Löschmitteln in Räumen natürlicher Größe
Teil 2: Ermittlung der Volumenströme durch Türöffnungen zur Rauchfreihaltung von Rettungswegen
Forschungsbericht Nr.35 der Arbeitsgemeinschaft der Innenministerien der Bundesländer, Arbeitskreis V-Unterausschuß "Feuerwehrrangelegenheiten"
- /2/ Seeger,P.G.: Luft-und Rauchgasströme in einem Gebäude im Brandfall.
VFDB-Zeitschrift
26 (1977) H.3, S.90-99.
- /3/ John,R.: Rauchgas- und Luftvolumenströme durch Öffnungen im Brandraum.
5. Internationales Brandschutz-Seminar der VFDB,Karlsruhe 1976, Band I, S.39-61.
- /4/ John,R.: Maßnahmen zum Schutz der Rettungswege gegen Rauchgaseintritt.
VFDB-Zeitschrift
27 (1978) H.1, S.34-36
H.2, S.56-58.
- /5/ Wakamatsu,T.: Calculation methods für predicting smoke movement in buildings fires and designing smoke control systems.
ASTM STP 614 American Society für Testing and Materials.
1977, S.168-193.

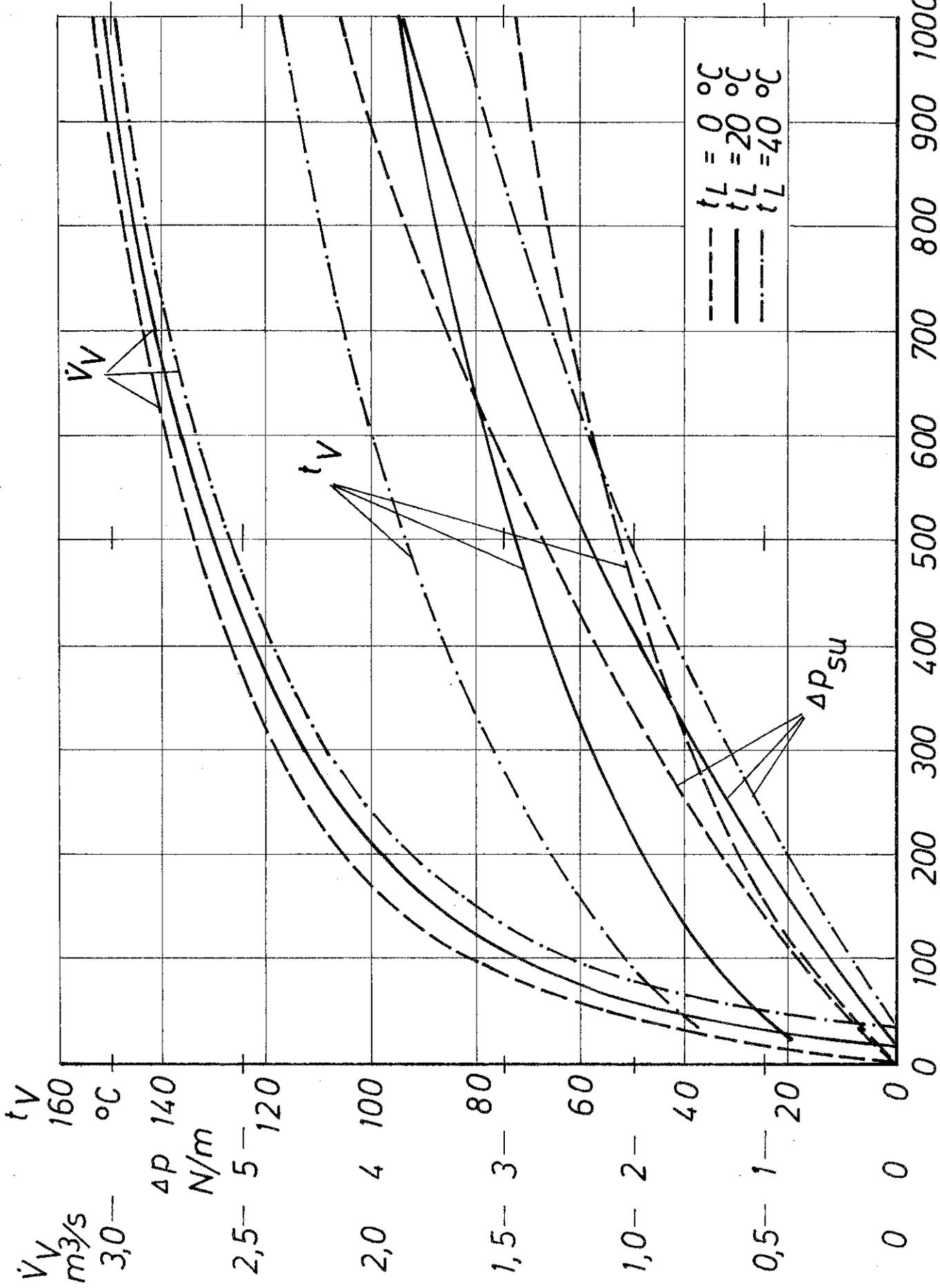


Bild 2 In Abhängigkeit von der Brandraumtemperatur berechnete Vorräumtemperatur t_V , Luftvolumenströme \dot{V}_V und Druckdifferenzen Δp_{SU} bei $t_L = 0^\circ\text{C}$, 20°C und 40°C

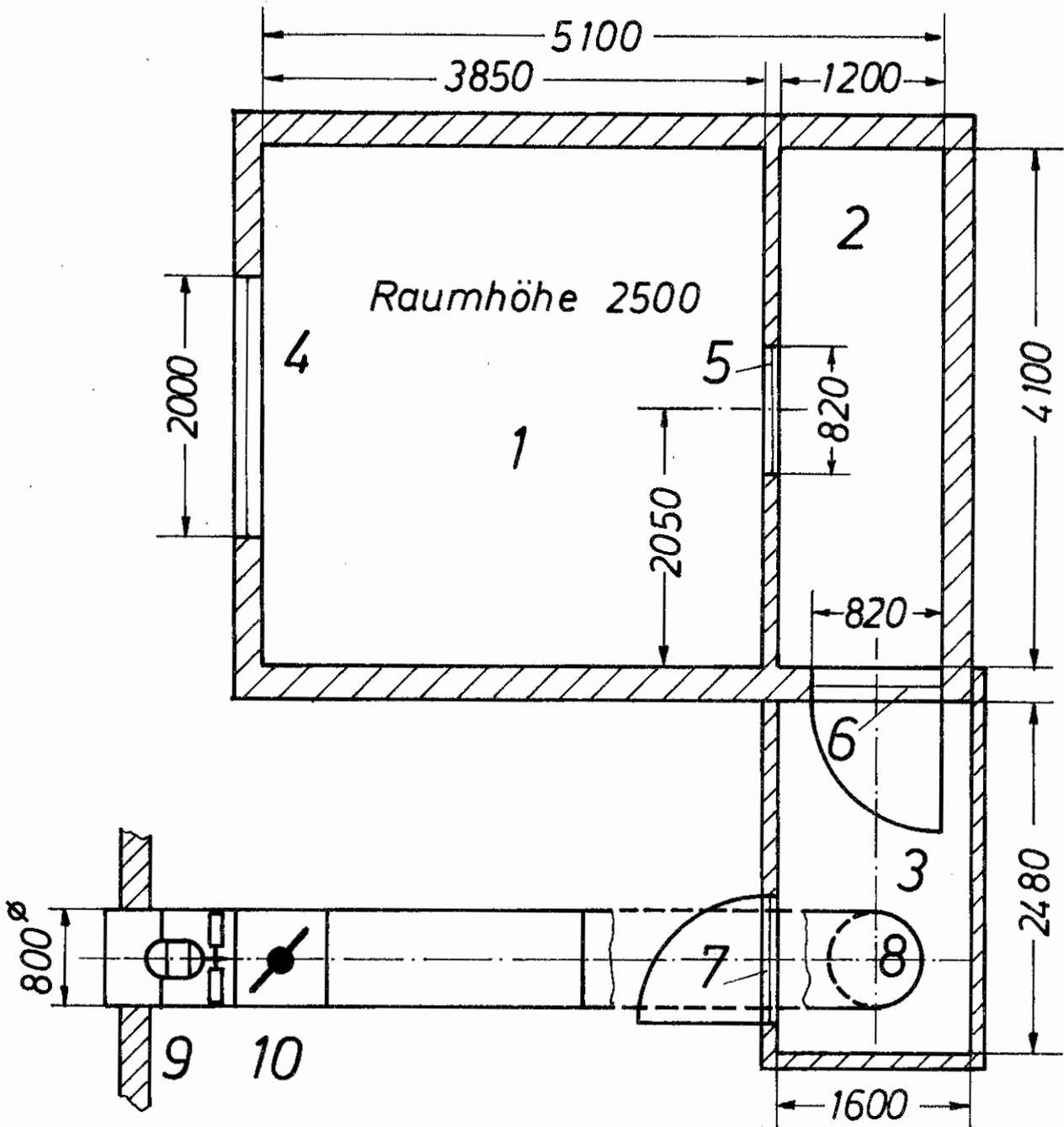


Bild 3 Grundriß des Versuchsraumes

- 1 Brandraum
- 2 Vorraum
- 3 Schleuse
- 4 Fensteröffnung
- 5 Öffnung Vorraum/Brandraum
- 6 Tür Schleuse/Vorraum
- 7 Tür Schleuse/Versuchshalle
- 8 Frischlufteintritt
- 9 Axialgebläse
- 10 Drosselklappe

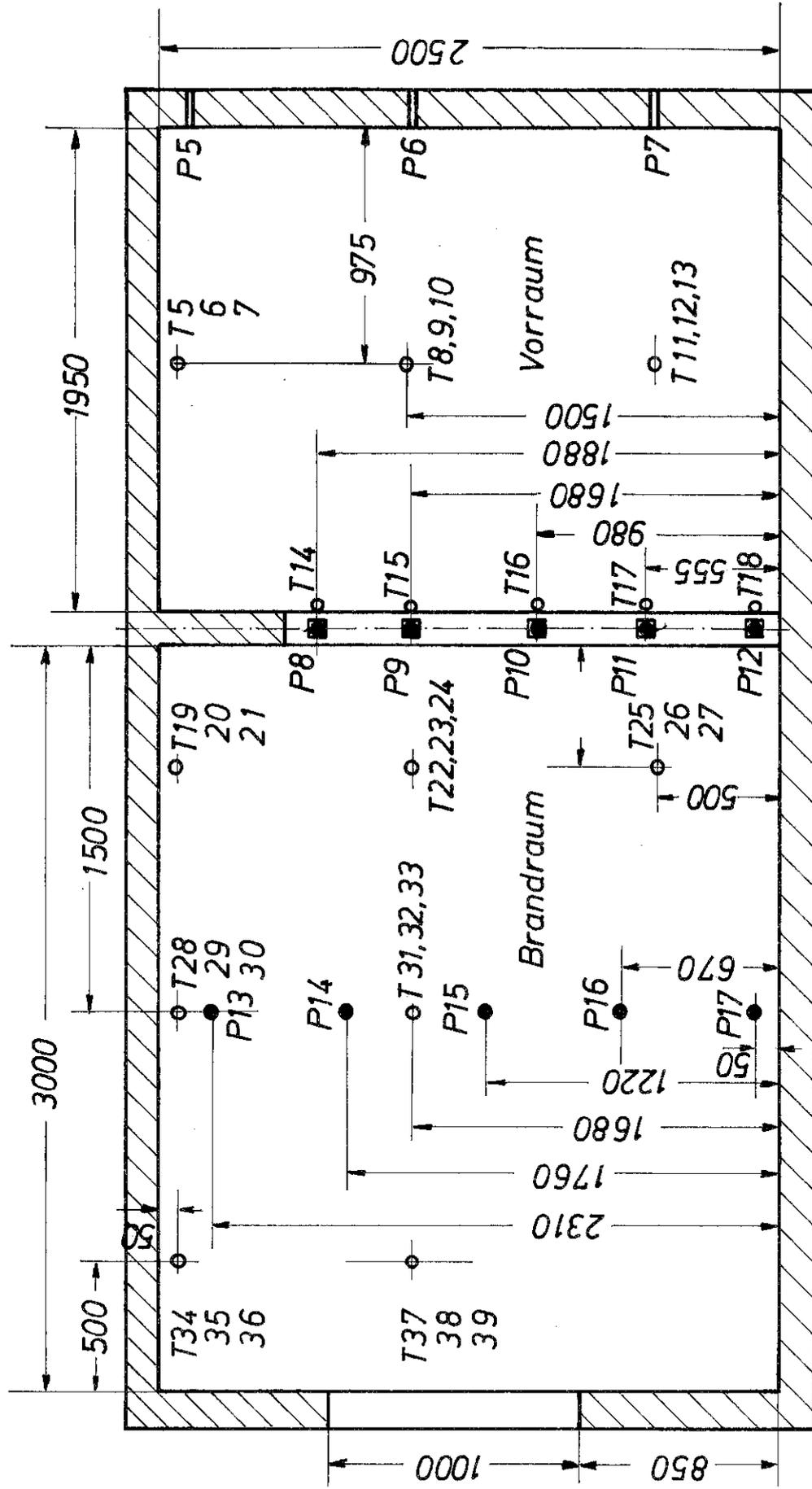


Bild 6 Anordnung der Meßstellen im Brandraum und im Vorraum sowie in der Öffnung zwischen Brandraum und Vorraum

T Temperaturmeßstellen

P Druckmeßstellen

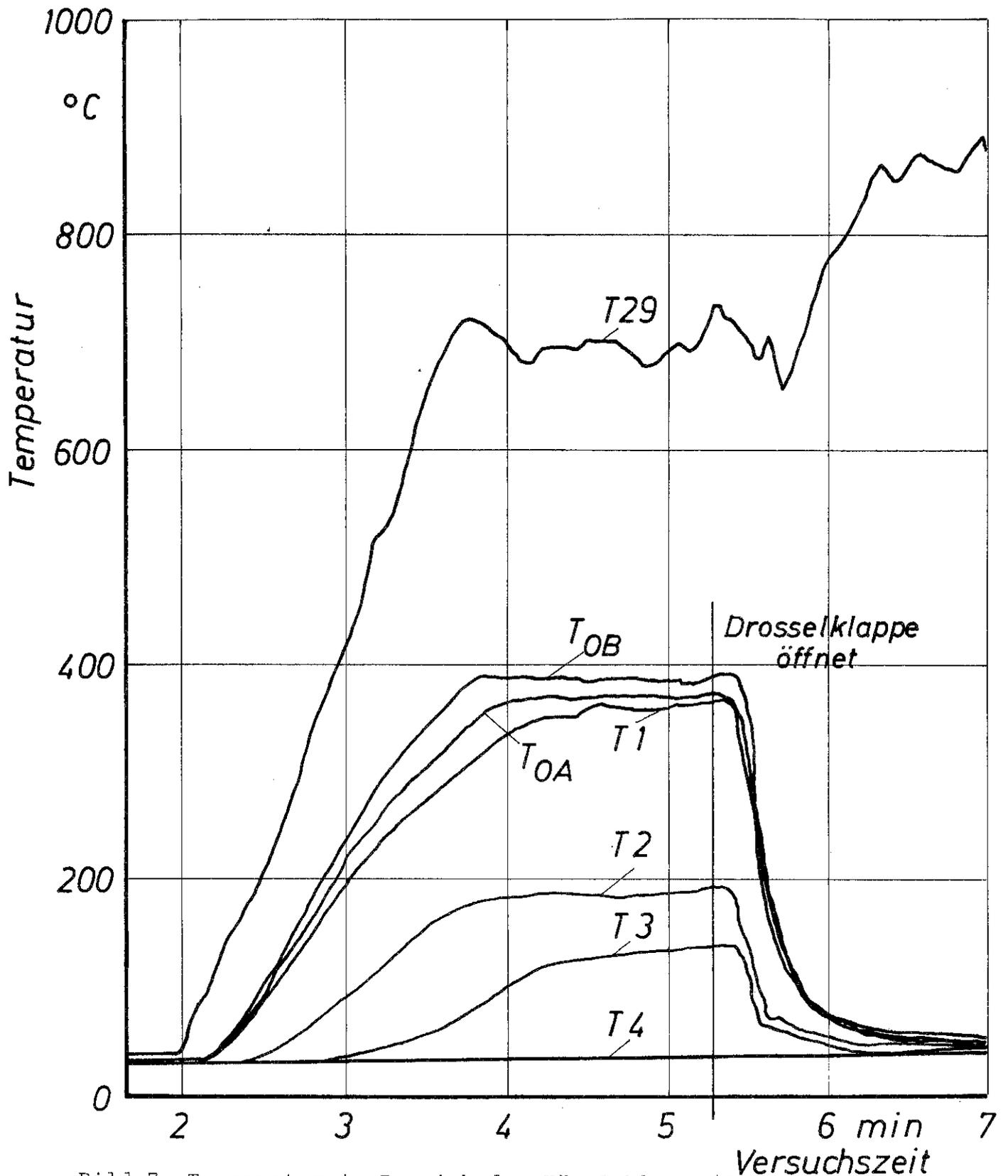


Bild 7 Temperatur im Bereich der Tür Schleuse/Vorraum (T1 bis T3, T_{OA} , T_{OB}), Temperatur der Zuluft (T4) sowie eine Deckentemperatur im Brandraum (T29) in Abhängigkeit von der Versuchszeit in der Anfangsphase eines Versuches

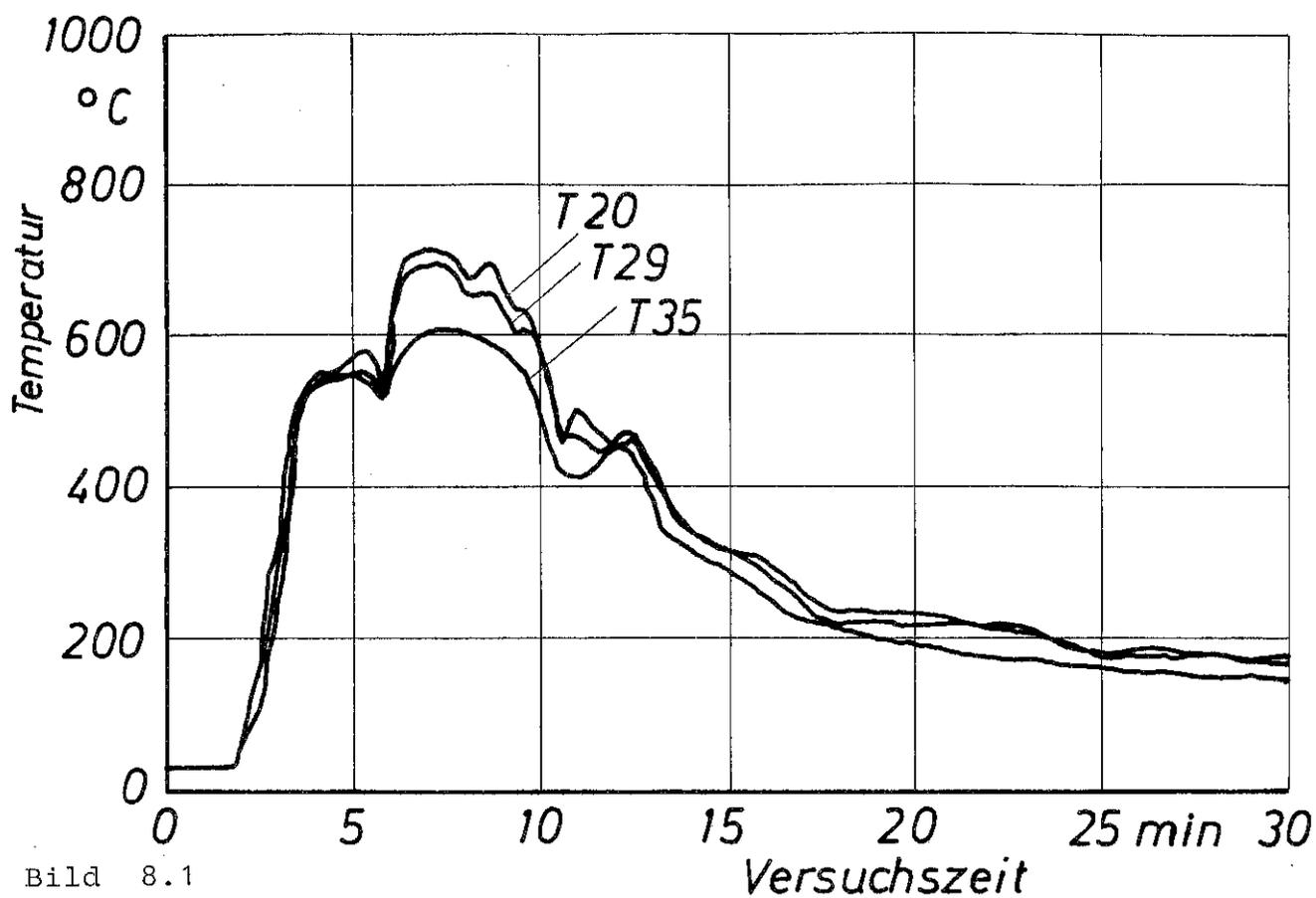


Bild 8.1

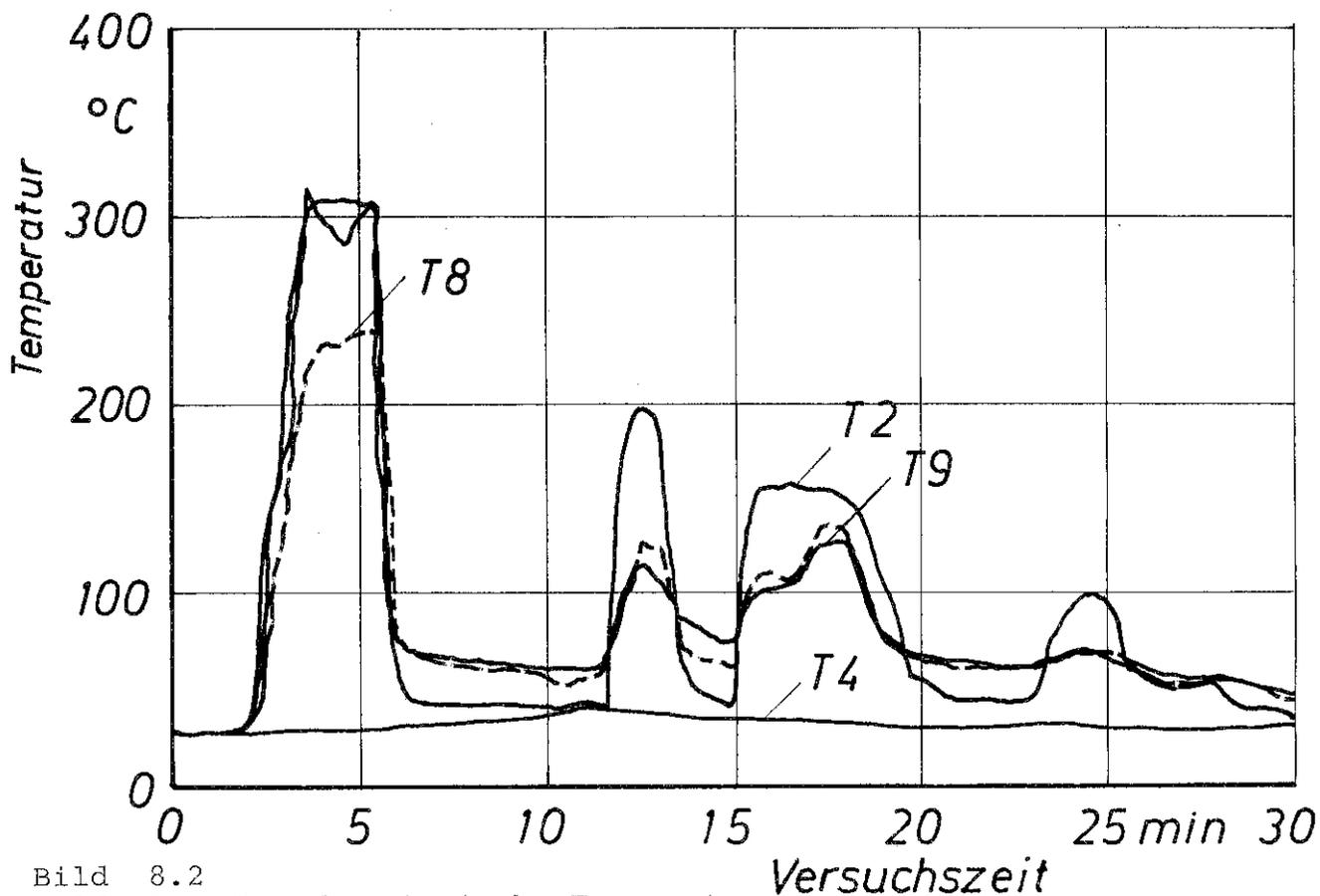


Bild 8.2

Bild 8 Charakteristische Temperaturkurven bei den Versuchen im Brandraum (Bild 3.1) und im Vorraum (Bild 8.2) (Anordnung der Meßstellen siehe Bilder 4 bis 6)

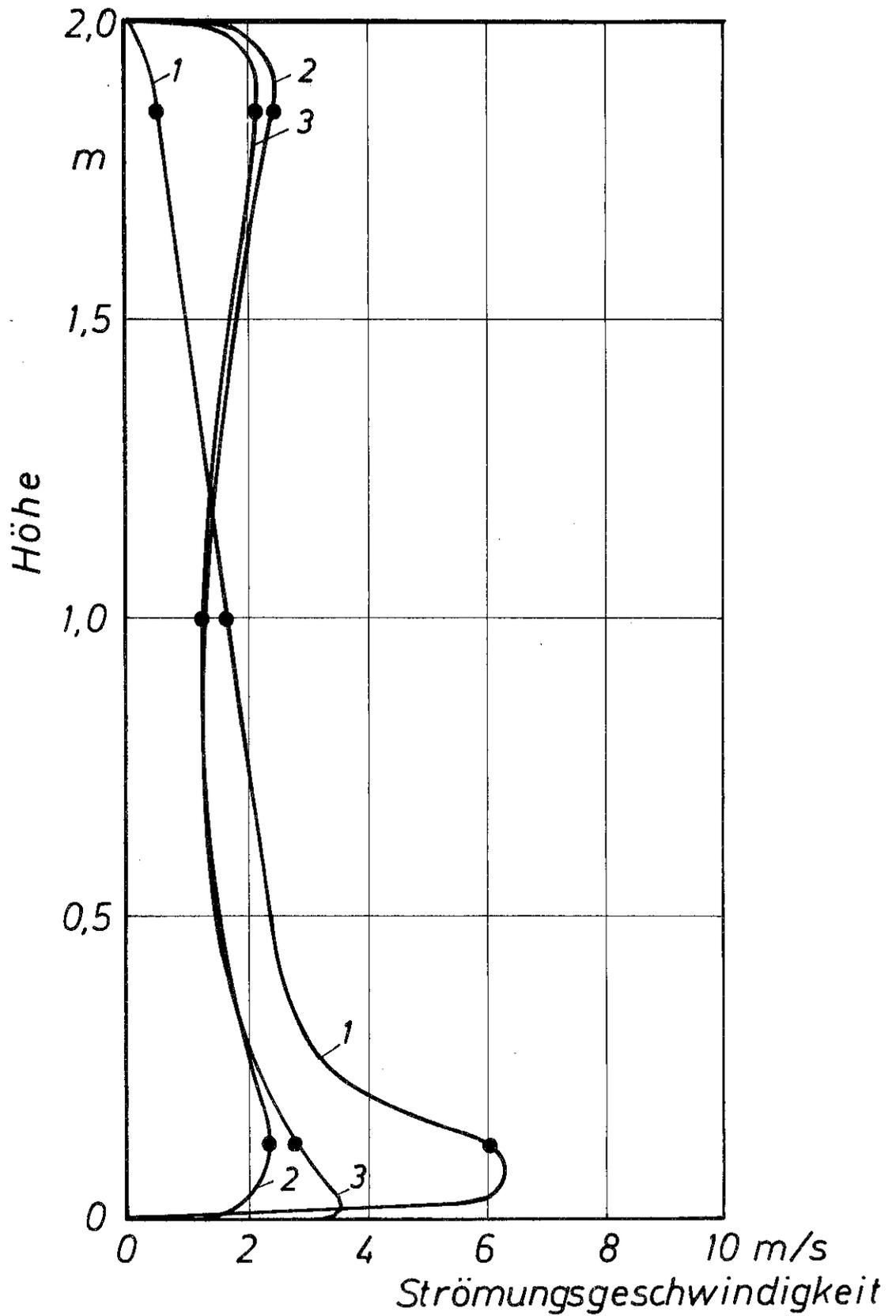


Bild 9 Zeitlicher Mittelwert der Strömungsgeschwindigkeiten der Zuluft durch die Tür Schleuse/Vorraum in den angegebenen Zeitintervallen

- Kurve 1 Zeitintervall 6 min bis 8 min
- Kurve 2 Zeitintervall 11,8 min bis 12,8 min
- Kurve 3 Zeitintervall 20 min bis 22,8 min

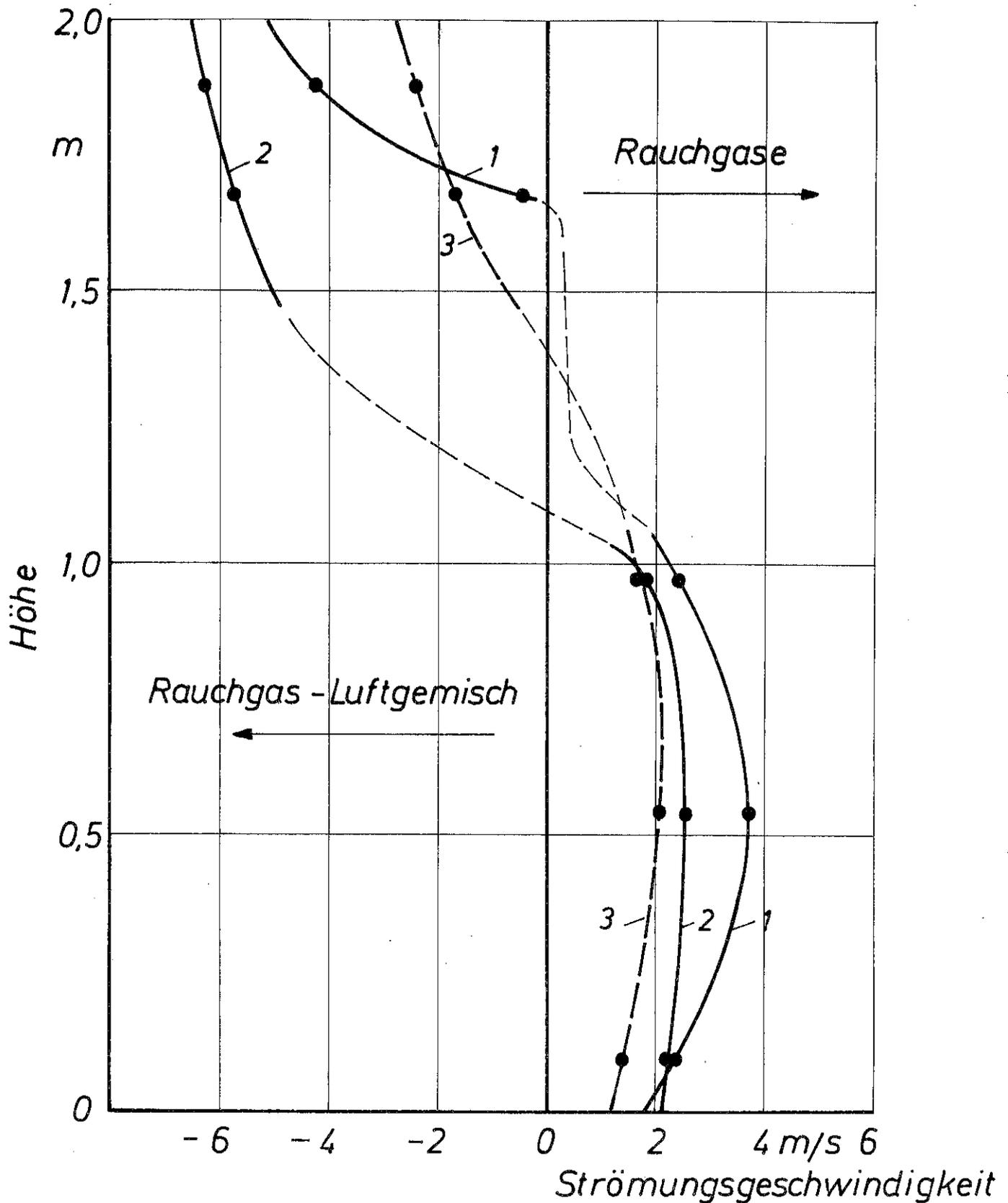
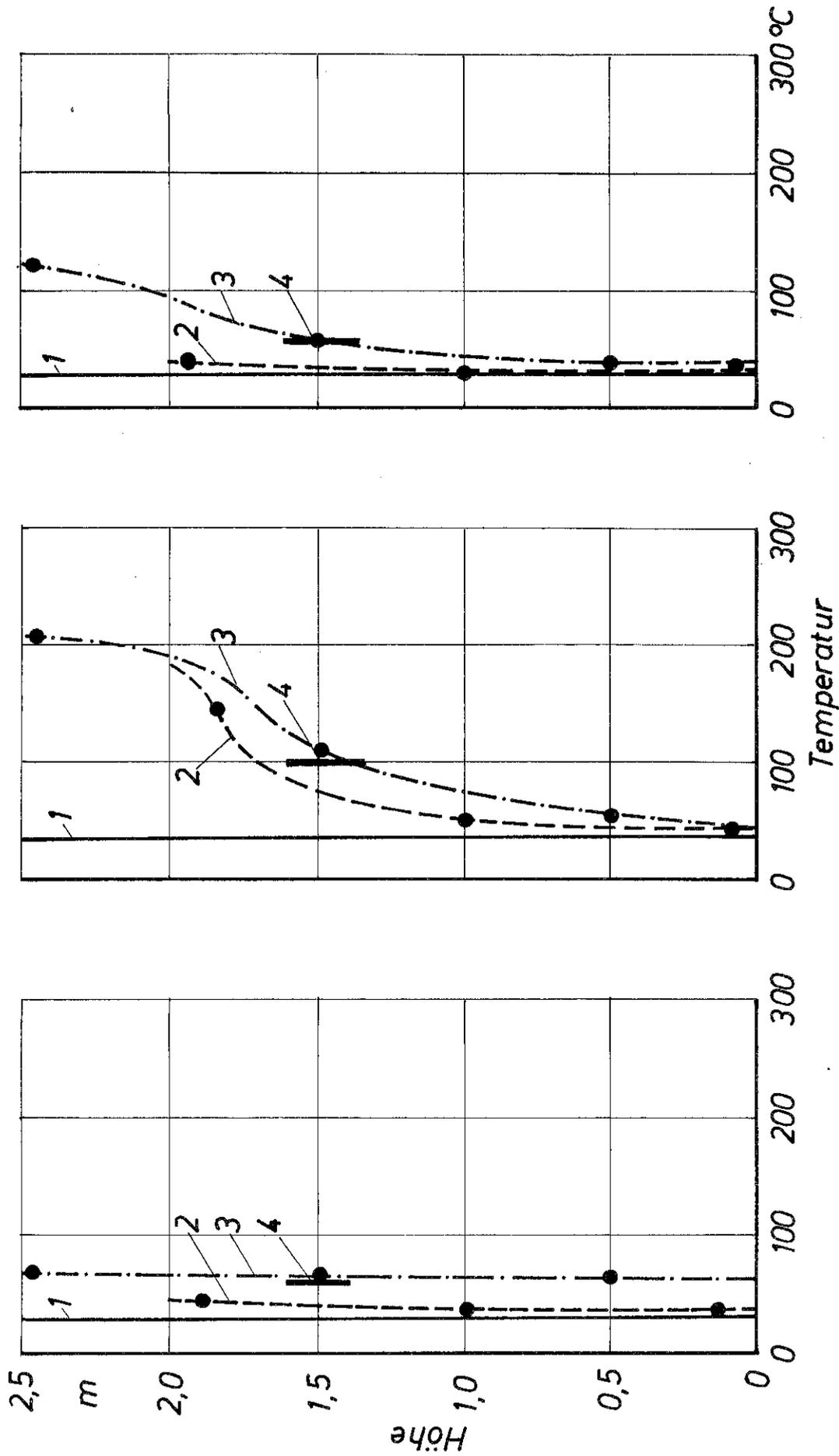


Bild 10 Zeitlicher Mittelwert der Strömungsgeschwindigkeiten durch die Öffnung Vorraum/Brandraum in den angegebenen Zeitintervallen

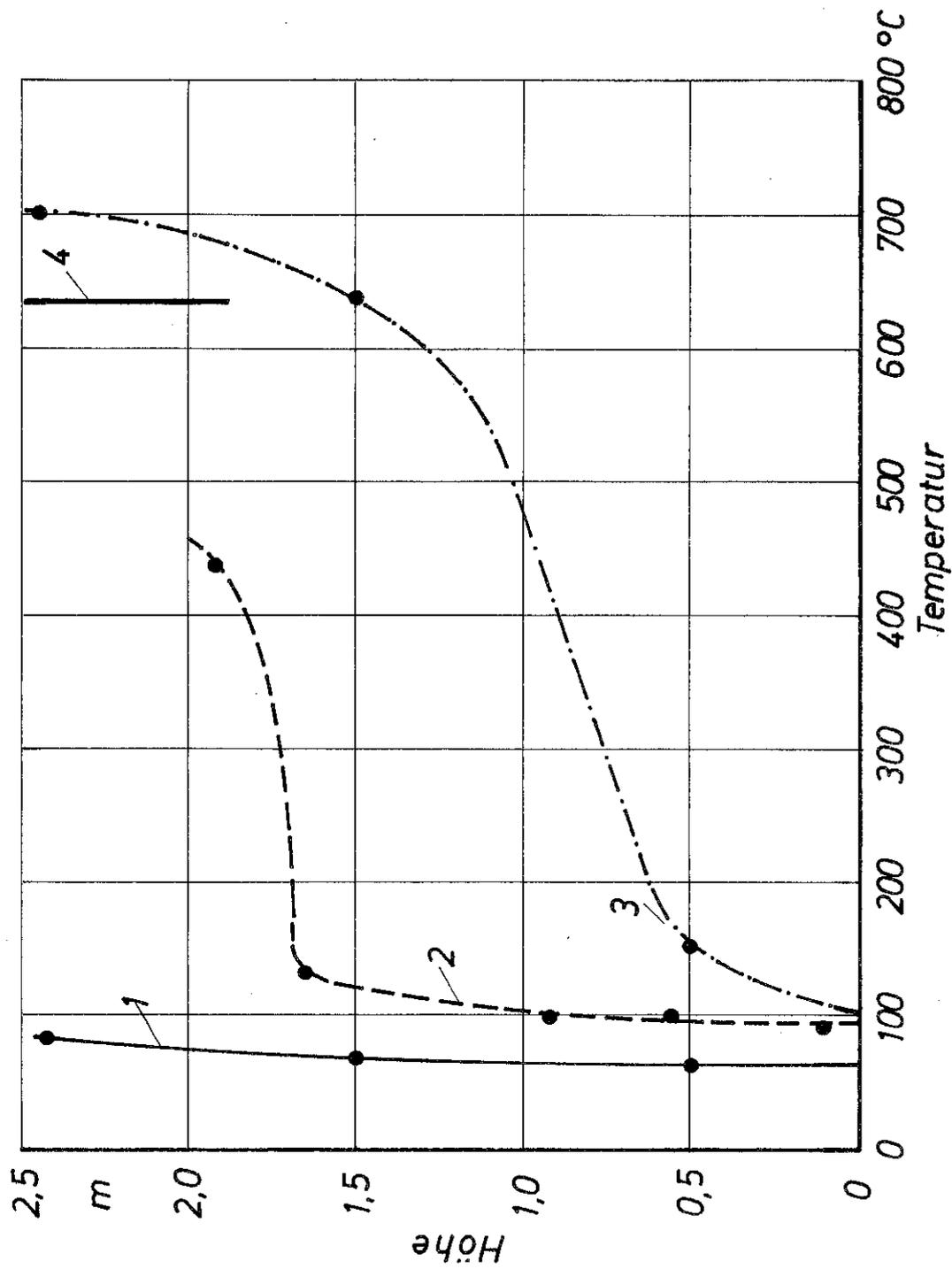
- Kurve 1 Zeitintervall 6 min bis 8 min
- Kurve 2 Zeitintervall 11,8 min bis 12,8 min
- Kurve 3 Zeitintervall 20 min bis 20,8 min



Zeitintervall 6min-8min **11,8min-12,8min** **20,0min-22,8min**
 Zeitlicher Mittelwert der Temperaturen im Bereich der Tür Schleuse/Vorraum
 in den angegebenen Zeitintervallen

- 1 Zulufttemperatur
- 2 Temperatur an den Messstellen T1 bis T3
- 3 Temperatur an den Messstellen T5, T8, T11
- 4 arithmetischer Mittelwert der Messstelle T8 bis T10

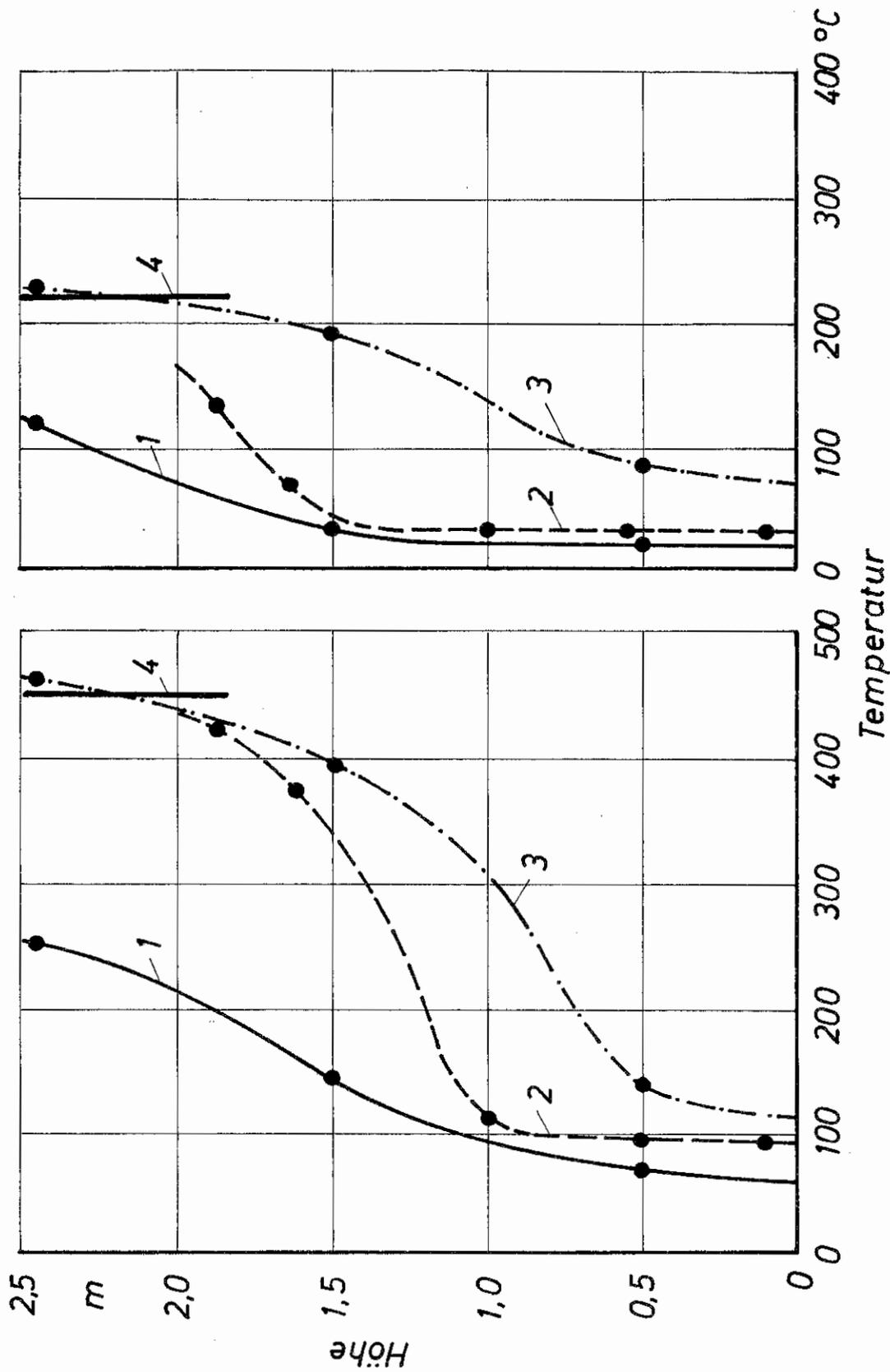
Bild 11



Zeitintervall 6 min - 8 min

Bild 12 Zeitlicher Mittelwert der Temperaturen im Bereich der Öffnung Vorräum/Brandraum im Zeitintervall 6 min bis 8 min

- 1 Temperatur an den Messstellen T6, T9, T12
- 2 Temperatur an den Messstellen T14 bis T18
- 3 Temperatur an den Messstellen T20, T23, T26
- 4 arithmetischer Mittelwert aller Deckentemperaturen im Brandraum



Zeitintervall 11,8 min - 12,8 min **20 min - 22,8 min**
 Bild 13 Zeitlicher Mittelwert der Temperaturen im Bereich der Öffnung Vorraum/Brandraum in den angegebenen Zeitintervallen
 1 Temperatur an den Meßstellen T6, T9, T12
 2 Temperatur an den Meßstellen T14 bis T18
 3 Temperatur an den Meßstellen T20, T23, T26
 4 arithmetischer Mittelwert aller Deckentemperaturen im Brandraum

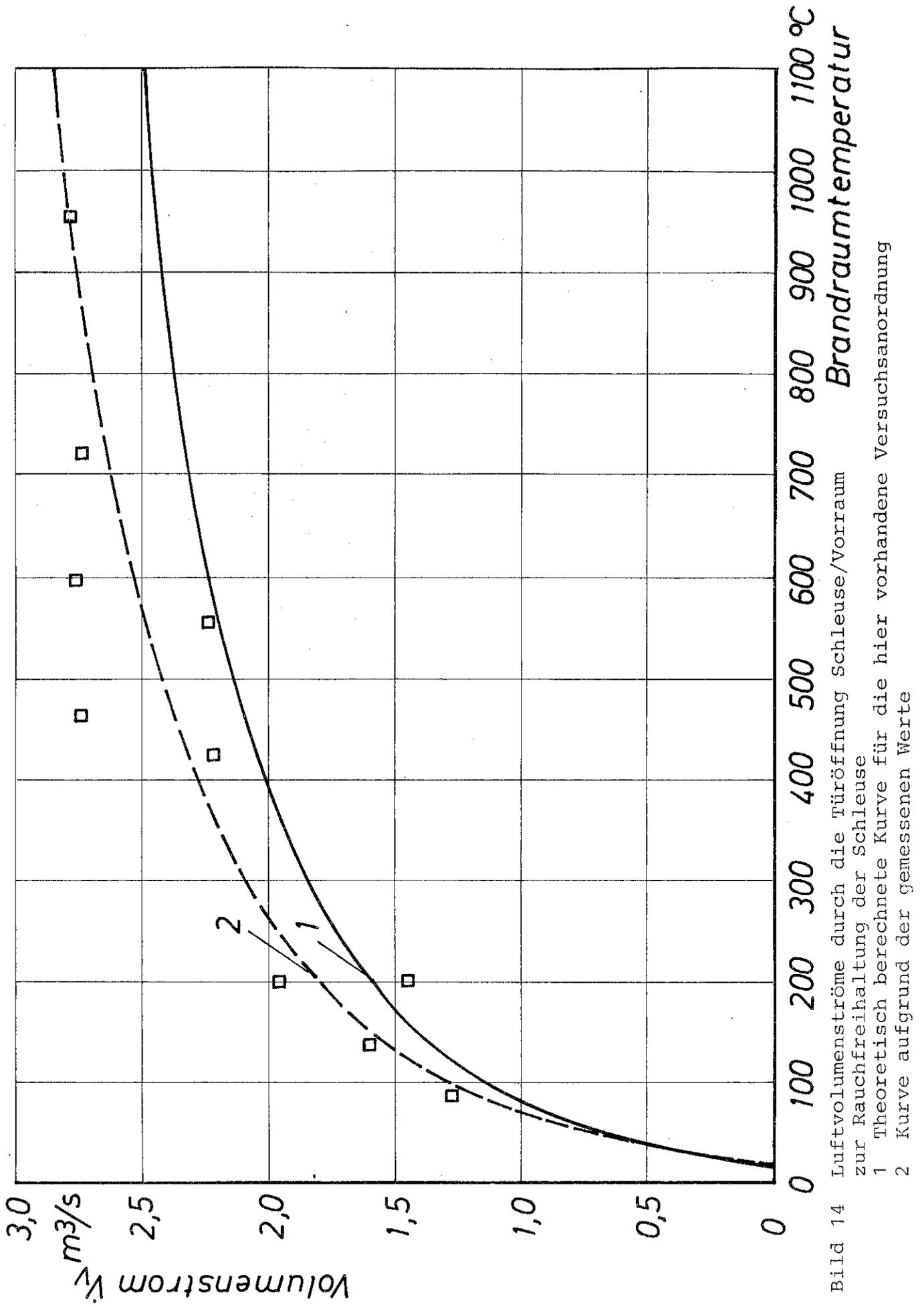


Bild 14 Luftvolumenströme durch die Türöffnung Schleuse/Vorraum zur Rauchfreihaltung der Schleuse
 1 Theoretisch berechnete Kurve für die hier vorhandene Versuchsanordnung
 2 Kurve aufgrund der gemessenen Werte

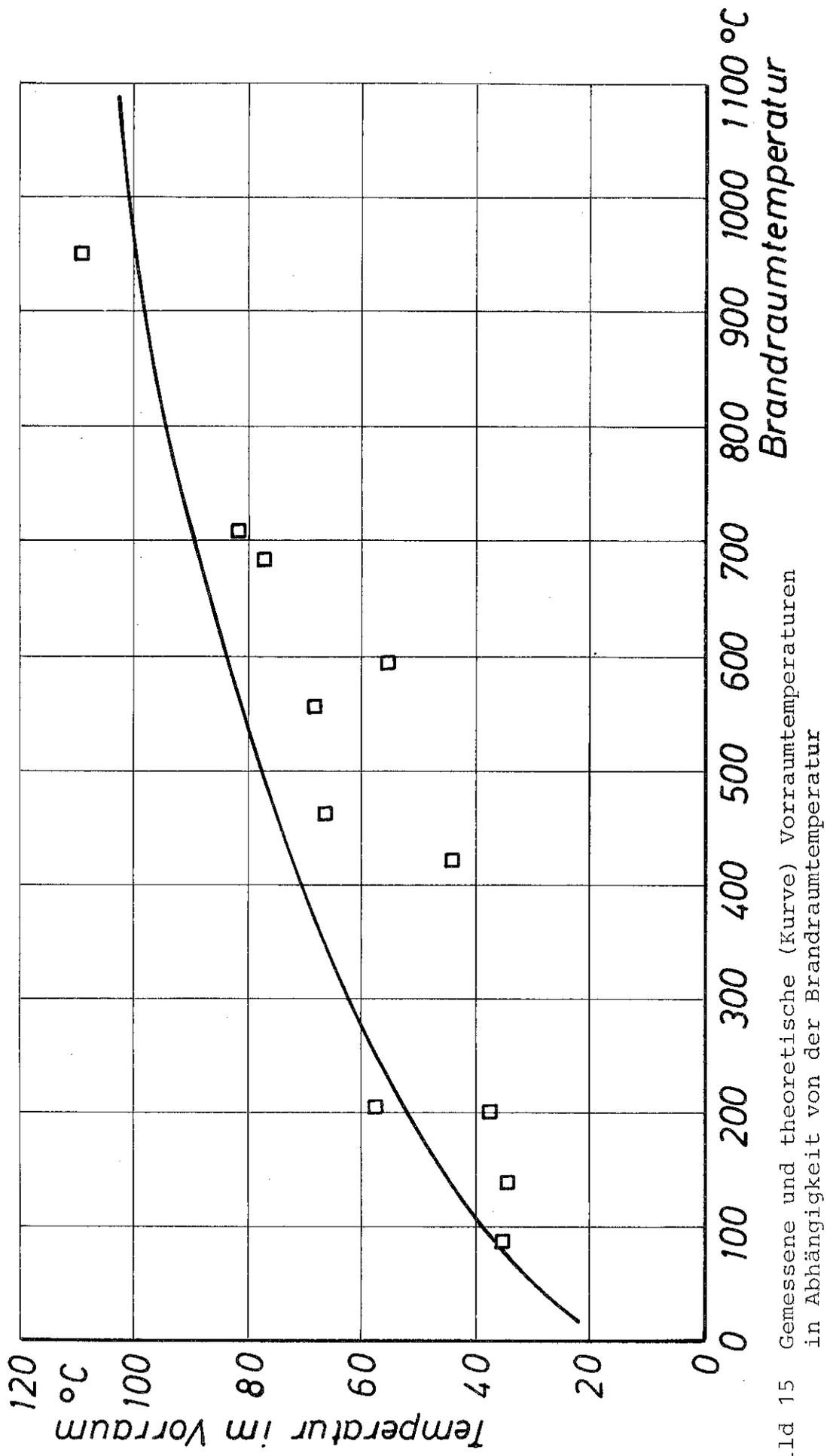


Bild 15 Gemessene und theoretische (Kurve) Vorraumtemperaturen in Abhängigkeit von der Brandraumtemperatur

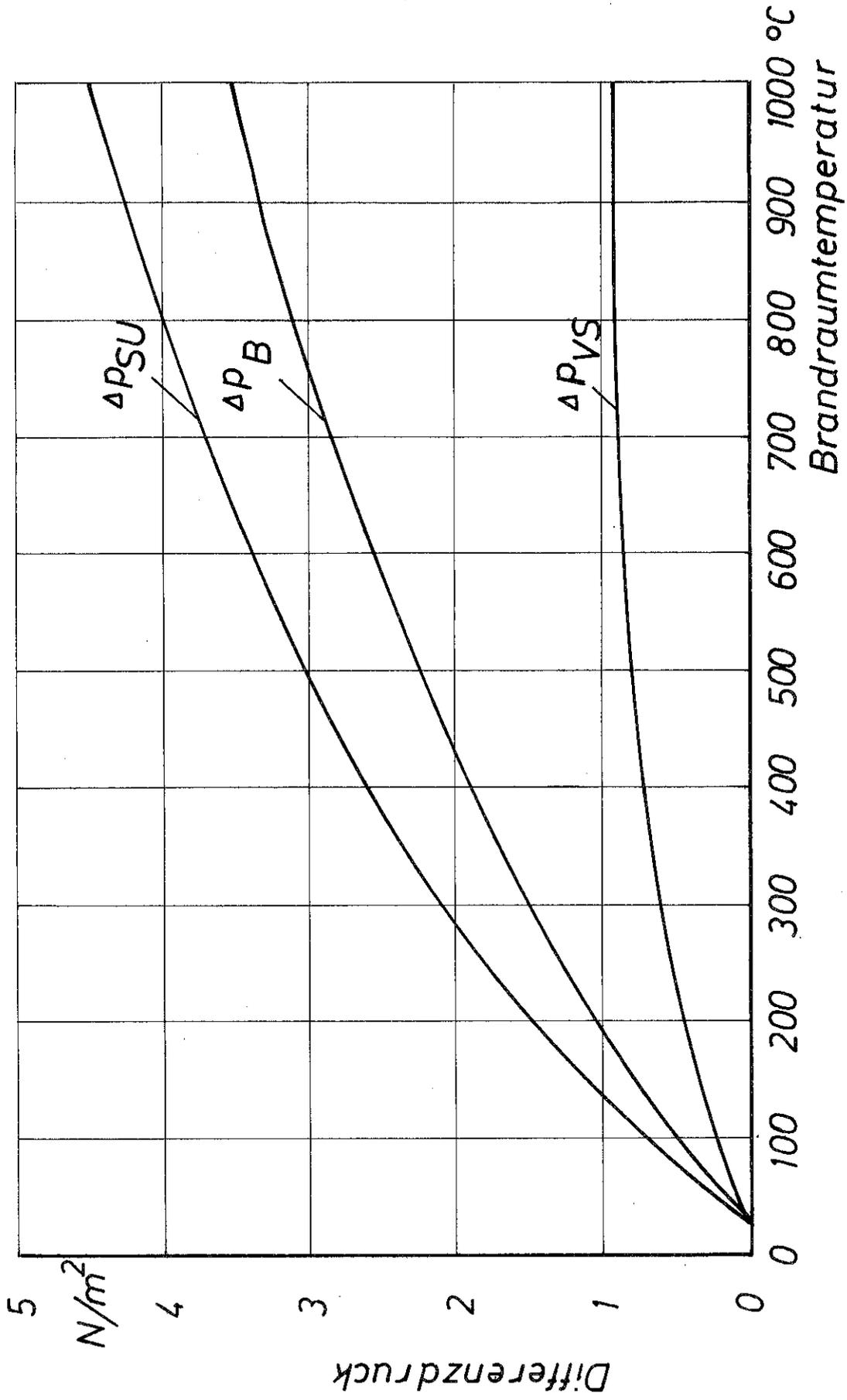


Bild 16 Druckdifferenzen zwischen den neutralen Druckzonen im Brandraum (ΔP_B), zwischen dem Vorraum und der Schleuse an der Oberkante der Tür (ΔP_{VS}) und der Schleuse zur freien Umgebung ($\Delta P_{SU} = \Delta P_B + \Delta P_{VS}$)

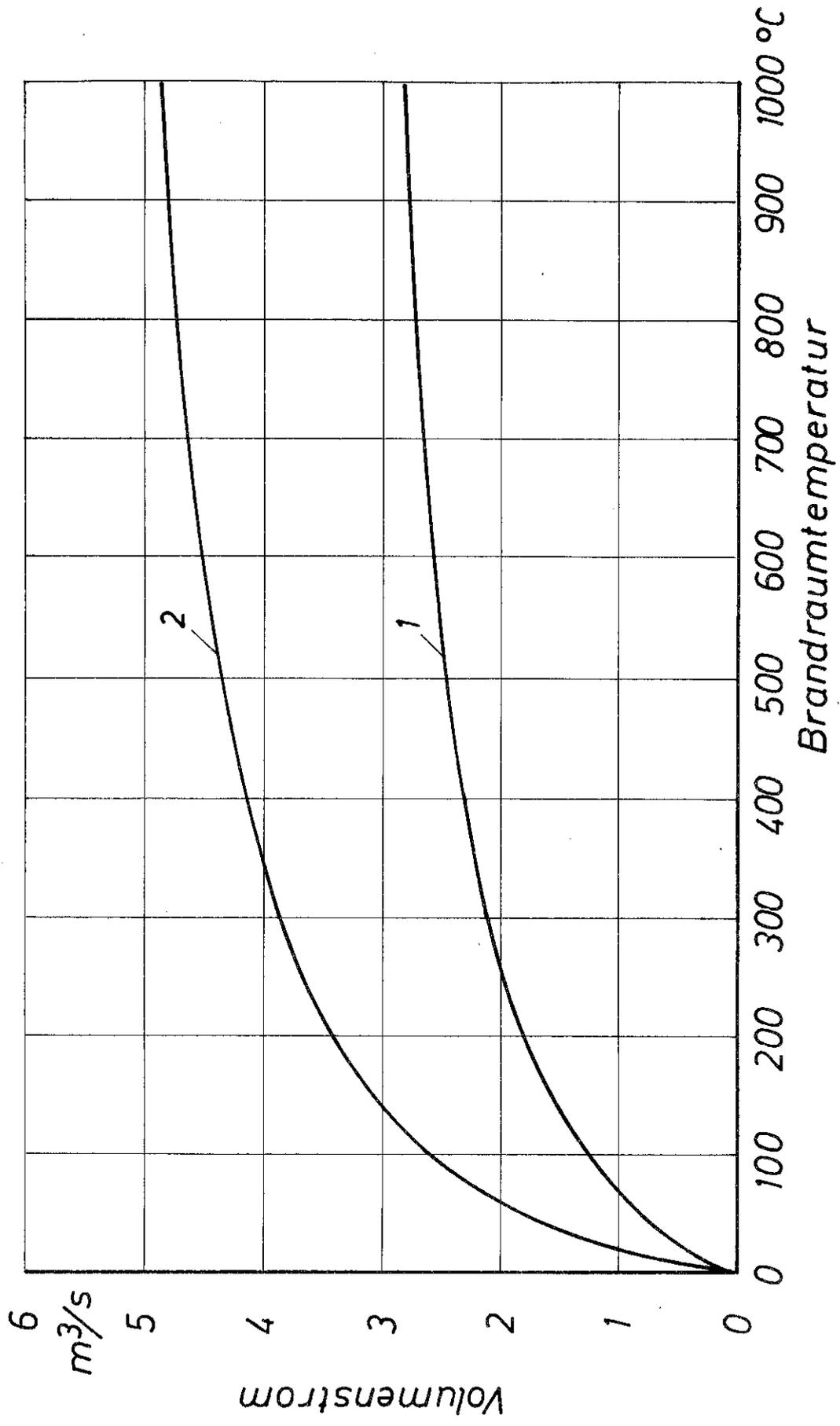


Bild 17 Vergleich der gemessenen minimalen Luftvolumenströme zur Rauchfreihaltung der Schleuse mit Vorraum (Kurve 1) und ohne Vorraum nach /1/ (Kurve 2)