

Vereinfachte Berechnungsweise der benötigten Belüftungsmenge beim Treppenhaus-Druckbelüftungssystem

Tatsuaki Tanaka, Toshio Yamana und Kayoko Mizuno

In Japan brachen früher weit öfter Brände aus als heute, weil damals die Anzahl der Holzbauten größer war. Ebenfalls typisch sind Brände durch Erdbeben, wie beim Hanshin-Awaji Erdbeben von 1995 (*Bild 1*). Rechtliche Regelungen trugen zur Verringerung der Katastrophen bei, ab und zu gibt es jedoch noch Brände mit ernsthaften Folgen. Im Jahre 2001 brach ein großer Brand in einem mehrstöckigen Geschäftsgebäude in Tokio aus, wobei 44 Menschen ums Leben kamen. Nach solchen Bränden werden üblicherweise die rechtlichen Regelungen verstärkt und Forschungen zum Katastrophenschutz vorangetrieben.

Druckbelüftung zur Reduzierung der Gefahren wurde bisher in Japan nicht eingesetzt, aber nach deren Weiterentwicklung in den letzten Jahren wird dieses Verfahren auch hier verwendet. Das Druckbelüftungssystem des Büros Century-Tower ist auf *Bild 2* zu sehen und in *Bild 3* schematisch dargestellt.

1. Zweck der Untersuchung

In den letzten Jahren wird vermehrt Druckbelüftung zur Rauchkontrolle eingesetzt, dabei wird meist der Vorraum der Nottreppe belüftet. Es gibt zwar einige Beispiele, wo die Druckbelüftung im innenliegenden Treppenhaus ausgeführt wird, aber eine feste Berechnungsmethode gibt es dafür noch nicht.

Grundlage dieser Untersuchung sind zwei Berechnungsmethoden:

1. Die Methode für Treppenhaus-Druckbelüftungen, die *John H. Klote et al.* als „Design of Smoke Management System“ in ASHRAE vorgeschlagen haben, und
2. die konventionelle Methode für die Druckbelüftung des Nottreppen-Vorraums.

Hier werden vereinfachte Berechnungsmethoden vorgeschlagen und an einem Modell Fallstudien durchgeführt. Die Merkmale und Probleme der jeweiligen Methode sollen geklärt werden, um sie bei der praktischen Planung berücksichtigen zu können.

Prof. Dr. Tatsuaki Tanaka, Mrs. Kayoko Mizuno, Ochanomizu Universität, Tokio, Dep. of. Human Environmental Eng., 2-1-1 Otsuka, Bunkyo-ku, 112-8610 Tokio, Japan. – Toshio Wakana, Nat. Inst. for Land and in frastructure management of Japan.

2. Methode

2.1 Grundlagen der Berechnung

Bei der Auswahl der Berechnungsmethoden wurde auf die Einbindung der Zugluft als Folge der Temperaturdifferenz zwischen Treppenhaus und Außenluft sowie des Druckverlusts durch Reibung im Treppenhaus geachtet. Es werden vier Berechnungsmethoden vorgeschlagen, die in *Tabelle 1* aufgelistet sind.

Mit diesen Methoden wurde für ein typisches Bürogebäude (*Bild 4*) die benötigte Belüftungsmenge für das Treppenhaus ermittelt. Der absolute Druck P_s im Treppenhaus, den der Planer als eine den Rauch blockierende Größe beliebig festlegen kann, wird allen Berechnungsmethoden zugrunde gelegt, gleiches gilt für den Luftstrom m_{sc} zwischen dem Treppenhaus und dem Korridor des brennenden Stockwerks.

Im ersten Schritt der Berechnung wird der Wert der nach außen strömenden Luftmenge m_{so} bestimmt, damit der absolute Druck im Treppenhaus den Wert P_s erreicht. Dieser Luftstrom wird zum Wert von m_{sc} addiert; die Summe ist die für das Treppenhaus benötigte Belüftungsmenge W_s . (*Tabelle 2*).

2.2 Berechnungsmethoden

1. Berücksichtigung der Zugluft im Treppenhaus

1) Anwendung der Methode „Design of Smoke Management System“ (*Bild 5*)

John H. Klote und *James A. Milke* haben in ASHRAE das „Design of Smoke Management System“ vorgestellt. Die von mir angefertigte Übersetzung wurde von der Unterkommission für Rauchanalyse und Fluchtwegplanung der japanischen Architektenvereinigung veröffentlicht und enthält im 7. Artikel eine Analyse des Druckaufbaus im

Tabelle 1. Merkmale der einzelnen Berechnungsmethoden.

Berechnungsmethode	benötigte Belüftungsmenge W_s [kg/s]
1) Design of Smoke Management	8.30
2) Zugluft berücksichtigt	6.30 (1. Etage) ~ 5.28 (7. Etage)
3) Zugluft und Druckverlust unberücksichtigt	4.87
4) Druckverlust berücksichtigt	4.87 (1. Etage) ~ 4.95 (7. Etage)
5) Druckverlust berücksichtigt, 7. Etage geöffnet	27



Bild 1. Große Brände nach dem Hanshin-Awaji Erdbeben.



Bild 2. Bürohaus Century-Tower (Tokio, Japan).

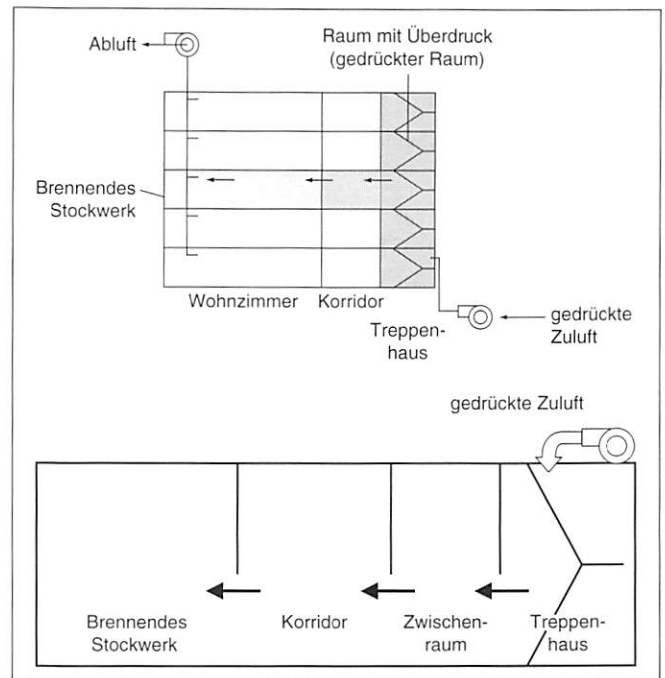


Bild 3. Schema des Druckbelüftungsverfahrens.

Treppenhaus; auch die Berechnung der benötigten Belüftungsmenge ist hier beschrieben.

Der Reibungsverlust im Treppenhaus in vertikaler Richtung kann ignoriert und der Druck innerhalb und außerhalb des Treppenhauses als Funktion der Temperatur dargestellt werden (Gleichungen 1 und 2). Aus der Druckdifferenz wird die aus dem Treppenhaus strömende Luftmenge berechnet (Gleichungen 3 und 4) und zur benötigten Belüftungsmenge für den Korridor des brennenden Stockwerks addiert. Diese Summe ist die benötigte Gesamtluftmenge zur Belüftung des Treppenhauses (Gleichung 5).

$$\Delta P_{SO} = \Delta P_{SOb} + by \quad (1)$$

$$b = K_s \left(\frac{1}{T_o} - \frac{1}{T_s} \right) \quad (2)$$

$$dQ = CA_{he} \sqrt{\frac{2\Delta P_{SO}}{\rho}} dy \quad (3)$$

Tabelle 2. Ergebnisse der Berechnungen.

Berechnungsmethode	Änderung der benötigten Belüftungsmenge in Abhängigkeit von der Höhe des brennenden Stockwerks	Zugluft berücksichtigt	Druckverlust berücksichtigt
BRI	O	O	O
ASHRAE 1)	x	O	x
Vereinfachte Berechnung 2)	O	O	x
Vereinfachte Berechnung 3)	x	x	x
Vereinfachte Berechnung 4)	O	x	O

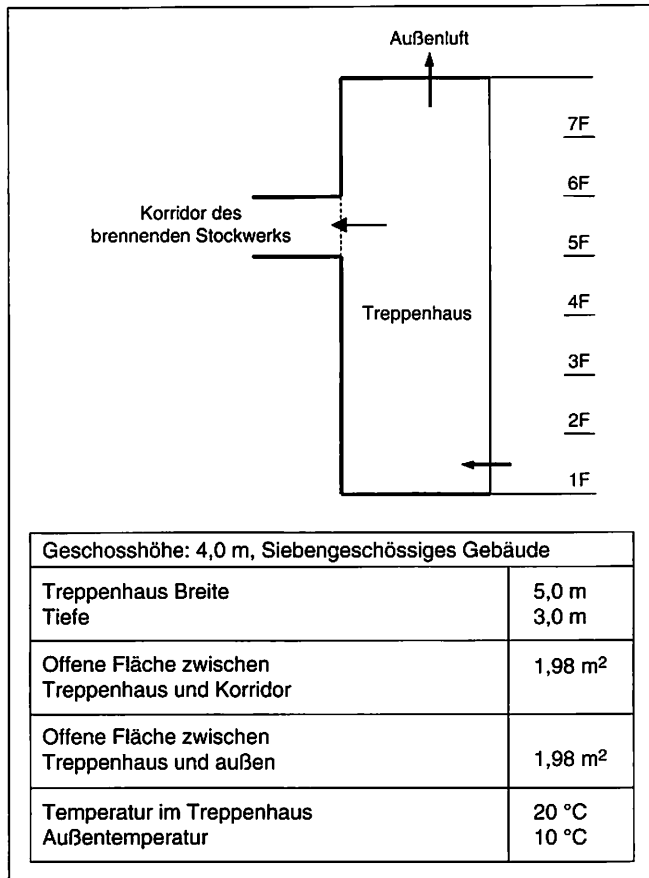


Bild 4. Schema des Treppenhauses im gemeinsamen Modellgebäude.

$$Q_{SBO} = \frac{2}{3} NCA_{Sboc} \sqrt{\frac{2}{\rho} \left(\frac{\Delta P_{SOt}^{3/2} - \Delta P_{SOb}^{3/2}}{\Delta P_{SOt} - \Delta P_{SOb}} \right)} = m_{so} \quad (4)$$

$$W_S = m_{sc} + m_{so} \quad (5)$$

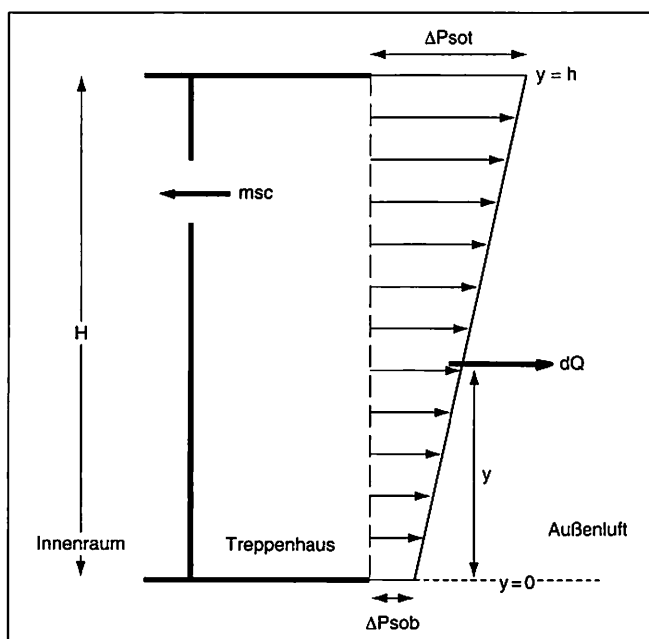


Bild 5. Methode (1) nach Design of Smoke Management System.

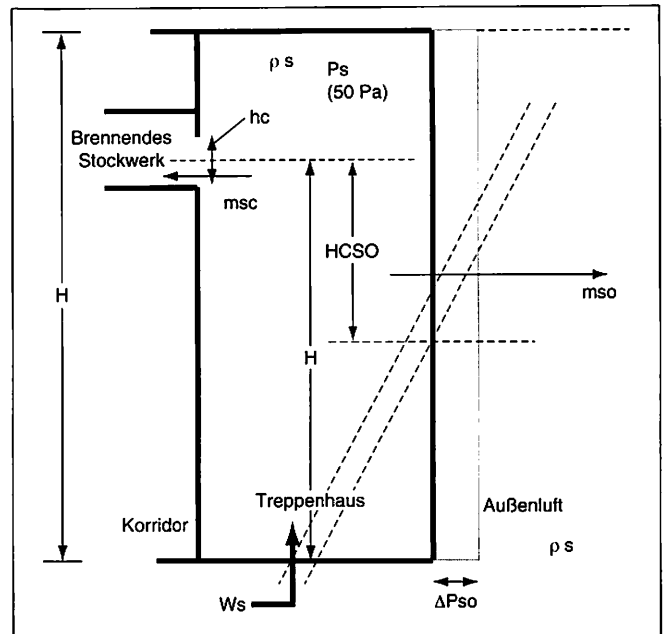


Bild 6. Methode (3) bei Verwendung der mittleren Druckdifferenz als Näherungswert.

Hierin bedeuten:

ΔP_{so} : Druckdifferenz zwischen Treppenhaus und Außenluft (Höhe y)

ΔP_{sob} : Druckdifferenz zwischen Treppenhaus und Außenluft (Grundfläche)

b : Temperaturfaktor

T_o : absolute Außentemperatur

T_s : absolute Innentemperatur im Treppenhaus

K_s : Konstante

A_{sboe} : Fläche der Lücken zwischen Treppenhaus und außen

N : Stockwerkszahl

ΔP_{sot} : Differenzdruck zwischen Treppenhaus und außen(Spitze)

W_s : benötigte Belüftungsmenge

m_{so} : Luftstrom Treppenhaus \rightarrow Außenluft

m_{sc} : Luftstrom Treppenhaus \rightarrow Korridor

2) Verwendung der mittleren Druckdifferenz als Näherungswert (Bild 6)

Unter Berücksichtigung der „Berechnungsmethode der benötigten Belüftungsmenge im Druckbelüftungssystem zur Rauchkontrolle“ hat die Kinki-Zweigstelle der japanischen Architektenvereinigung eine Berechnungsmethode für die benötigte Belüftungsmenge im Treppenhaus-Druckbelüftungsverfahren vorgeschlagen.

Bei dieser Berechnungsmethode wird die mittlere Druckdifferenz verwendet, wenn es einen Temperaturunterschied zwischen Treppenhaus und Außenluft gibt und ein Höhenunterschied der Öffnungen zwischen Treppenhaus und Korridor sowie zwischen Treppenhaus und Außenluft besteht.

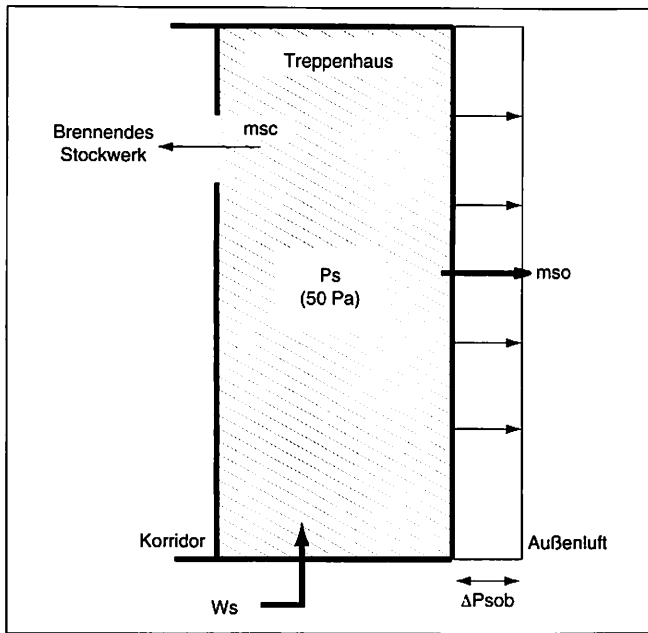


Bild 7. Methode (2) ohne Berücksichtigung des Druckverlusts im Treppenhaus.

Unter der Bedingung, dass die Innentemperatur im Treppenhaus höher ist als die Außentemperatur, gilt Gleichung 6, wenn das brennende Stockwerk unterhalb der Neutralzone liegt, und Gleichung 7, wenn es sich oberhalb der Neutralzone befindet. Das liegt daran, dass beim Druckaufbau die oberen Stockwerke im Vorteil sind und die unteren im Nachteil.

$$m_{SO} = \alpha_{SO} A_{SO} \sqrt{2\rho_S \{P_S + |\rho_O - \rho_S| g H_{CSO}\}} \quad (6)$$

$$m_{SO} = \alpha_{SO} A_{SO} \sqrt{2\rho_S \{P_S - |\rho_O - \rho_S| g H_{CSO}\}} \quad (7)$$

$$W_S = m_{SC} + m_{SO} \quad (8)$$

Hierin bedeuten:

m_{SO} : Luftstrom Treppenhaus → Außenluft

α_{SO} : Luftstromfaktor zwischen Treppenhaus und Außenluft

A_{SO} : Öffnungsfläche zwischen Treppenhaus und Außenluft

ρ_S : Luftdichte im Treppenhaus

P_S : absoluter Druck im Treppenhaus

ρ_O : Außenluftdichte

g : Erdbeschleunigung

H_{CSO} : vertikaler Abstand zwischen der Grundfläche des Treppenhauses und der Korridoröffnung des brennenden Stockwerks

2. Die Zugluft wird nicht berücksichtigt

3) Der Druckverlust im Treppenhaus wird nicht berücksichtigt (Bild 7).

Der Einfluss der Zugluft kann vernachlässigt werden, der Druckverlust durch Reibung ebenfalls, dadurch herrscht innerhalb des Treppenhauses ein einheitlicher Druck. Weil beide Einflussgrößen nicht berücksichtigt werden, ist das

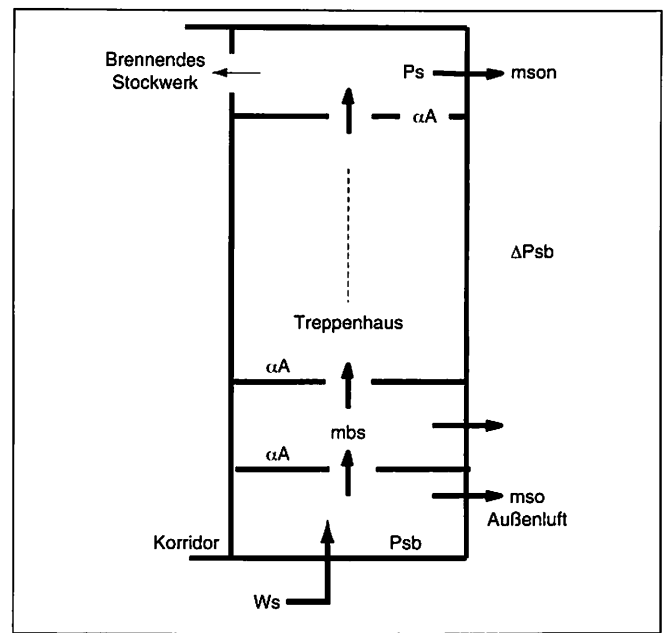


Bild 8. Methode (4) mit Berücksichtigung des Druckverlusts im Treppenhaus.

die einfachste Berechnungsweise. Die benötigte Belüftungsmenge wird nach dieser Rechnung auch die kleinste sein. Die vom Treppenhaus nach außen strömende Luftmenge ergibt sich aus Gleichung 9.

$$m_{SO} = \alpha_{SO} A_{SO} \sqrt{2\rho_S P_S} \quad (9)$$

$$W_S = m_{SC} + m_{SO} \quad (10)$$

4) Der Druckverlust im Treppenhaus wird berücksichtigt (Bild 8).

Bei dieser Methode wird der Reibungsverlust des Drucks in der vertikalen Luftstromrichtung zwischen der belüfteten und der brennenden Etage berücksichtigt. Im Modell liegen hier die Stockwerke nebeneinander und sind waagrecht durch Öffnungen miteinander verbunden. Die äquivalente Öffnungsfläche wird hier mit Gleichung 11 bestimmt.

Herrscht im brennenden Stockwerk der Druck P_S , der als die den Rauch blockierende Größe festgelegt wird, dann gilt für das Druckverhältnis im Treppenhaus Gleichung 12. Die nach außen strömende Luftmenge wird berechnet, indem der mittlere Druck der Drücke von Treppenhaus und Außenluft (Gleichung 13 und 14) ersetzt wird durch den mittleren Druck der Drücke von brennendem Stockwerk und Grundfläche.

Da sich der Strömungswiderstand mit dem Abstand des brennenden Stockwerks zum zu belüfteten vergrößert, ist bei dieser Berechnungsmethode die benötigte Belüftungsmenge größer.

$$A_e = \sqrt{1/A_1^2 + A_2^2 + \dots + A_n^2} \quad (11)$$

$$A_1 = A_2 = \dots = A_n (=A):. A_e = A/\sqrt{n}$$

$$P_{sb} + \Delta P_{sb} = P_S \quad (12)$$

$$\bar{P}_S = (P_S + P_{sb})/2 \quad (13)$$

$$m_{SO} = \alpha_{SO} A_{SO} \sqrt{2\rho P_S} \quad (14)$$

$$W_S = m_{SC} + m_{SO} \quad (15)$$

3. Fallstudien am gemeinsamen Modell

Zu den oben erwähnten vier Berechnungsmethoden wurden Fallstudien am gemeinsamen Modell durchgeführt.

In diesem Modell erfolgt die Belüftung über die erste Etage (*Bild 4*). Bei den Berechnungsmethoden 2) und 4) wurde der Ort des Brandausbruchs von der ersten Etage bis zur siebten hin variiert und jedesmal für das Treppenhaus die benötigte Belüftungsmenge W_S berechnet. Bei den restlichen Berechnungsverfahren ist W_S unabhängig von der Stockwerkszahl, so dass die benötigte Belüftungsmenge konstant ist.

Die Belüftungsmenge W_S wurde nach dem Gesetz von der Erhaltung der Masse als Summe aus dem benötigten Luftstrom m_{SC} vom Treppenhaus zum Korridor und dem Luftstrom m_{SO} vom Treppenhaus nach außen bestimmt (5, 8, 10, 15). Da abgesehen vom Treppenhaus die Bedingungen sonst gleich sind, wird $m_{SC} = 3.32\text{kg/s}$ als gemeinsamer Wert allen Berechnungen zugrunde gelegt.

Damit tritt in der Gleichung für die Belüftungsmenge W_S nur noch die Größe m_{SO} als Variable auf.

$$W_S = m_{SC} + m_{SO} \quad (16)$$

Der absolute Druck im Treppenhaus P_S wurde als die den Rauch blockierende Bedingung vom Planer beliebig festgelegt, hier $P_S = 50\text{ Pa}$.

4. Ergebnisse und Diskussion

Die Ergebnisse der Berechnungen sind in *Tabelle 1* zusammengestellt. Wie erwartet, ist W_S am kleinsten, wenn weder Zugluft noch Druckverlust berücksichtigt werden. Den größten Wert erreichte W_S bei der Methode

2), woraus geschlossen werden kann, dass die Zugluft als Folge des Temperaturunterschieds zwischen Treppenhaus und Außenluft einen größeren Einfluss hat als der Druckverlust durch den vertikalen Luftstrom. Da sämtliche Türen des Treppenhauses geschlossen waren, entstand kein Luftstrom innerhalb des Treppenhauses. Wenn die Treppenhaustüren geöffnet werden, entsteht ein größerer Druckverlust innerhalb des Treppenhauses, wie aus *Tabelle 1 3)* ersichtlich ist.

Die Werte von ASHRAE ergeben sich unter ungünstigsten Bedingungen.

Je größer der Temperaturunterschied zwischen Treppenhaus und Außenluft, je größer die Stockwerksanzahl ist, desto mehr Luft wird für die Druckbelüftung benötigt. Da mit der Vergrößerung der Belüftungsmenge Probleme entstehen können, wie das Offenhalten der Türen, sollte ein Grenzwert für die Belüftungsmenge festgelegt werden. Beim Überschreiten dieses Grenzwertes müssen besondere Maßnahmen ergriffen werden, z. B. muss die Anzahl der Entlüftungsöffnungen vergrößert werden.

5. Zusammenfassung

In dieser Abhandlung wurden vereinfachte Berechnungsmethoden zur Planung des Treppenhaus-Druckbelüftungsverfahrens verglichen. Im einfachen Fall ist es durch Abschätzung eines Zusatzfaktors verhältnismäßig leicht, die Luftmenge für die Druckbelüftung des Treppenhauses zu bestimmen. Wenn jedoch Öffnungen zwischen den Stockwerken bestehen oder Berechnungsmethoden entwickelt werden sollen, die den Schornsteineffekt als auch den Widerstand im Luftstrom berücksichtigen, ist eine Computersimulation an einem Zonenmodell und eine Vergleichsanalyse am Modell erforderlich.

Literatur

- [1] Tanaka, T.; Yamana, T. und Wakamatsu, K.: Untersuchung von Berechnungsmethoden zur Ermittlung der benötigten Belüftungsmenge zur Rauchkontrolle durch Druckbelüftung – Fallstudie an einem Bürogebäude: Vortragsversammlung vom Kongreß der Vereinigung für Luft- und Sanitärtechnik, September 2000, Japan.

Themen-Vorschau für die nächsten Hefte

Zur inneren Wärmebelastung. – Sommerliche Raumlufttemperaturen über 20°C. – Kleinere Rohrweiten für Abwasserleitungen. – Energetische Sanierung eines Altenpflegeheimes. – Das ideale Gebäude – eine Utopie?. – Einfluss von Licht auf die Entwicklung von Schimmelpilzen.