

Auflösung der Diskussion Druckbelüftung von Sicherheitstreppenhäusern

Die Anforderungen an Sicherheitstreppenhäuser werden zurzeit in der Literatur kontrovers diskutiert [1], [2]. Die vorliegende Veröffentlichung soll zur Klärung des Sachverhaltes beitragen.

Die Evakuierung von Personen aus Hochhäusern bei einem Brand kann nur über Treppenhäuser erfolgen. Bei außenliegenden Treppenhäusern kann, zumindest theoretisch, davon ausgegangen werden, dass in das Treppenhaus eintretende Rauchgase über dessen Fenster abgeleitet werden können. Bei innenliegenden Treppenräumen besteht diese Möglichkeit nicht. Daher wird in den bauaufsichtlichen Regelungen gefordert, dass innenliegende Treppenräume als Sicherheitstreppenräume auszubilden sind, die Anforderungen werden aber in der Literatur kontrovers diskutiert [1], [2].

Nachfolgend werden die physikalischen Grundlagen, die zu den in der Literatur angegebenen Druckverläufen in Sicherheitstreppenräumen führen, erläutert. Neben den Atmosphärenbedingungen (Temperatur, Druck, Wind, Windgeschwindigkeit und Windrichtung) werden die wesentlichen Gebäudeeinflüsse (Dichtheit der Gebäudefassade und Türen) berücksichtigt. Es wird aufgezeigt, dass bei geschlossenen Fenstern der bei weitem größte Anteil der Druckdifferenz zwischen belüftetem Treppenraum und Atmosphäre an der Ebene der größten Dichtheit, nämlich der Fassade, abgebaut wird. Die zum Sicherheitstreppenraum führenden Türen erfahren dagegen nur geringe Druckdifferenzen. Für das vom Brandereignis betroffene Geschoss sind dagegen geeignete Maßnahmen zu ergreifen, damit sich die Druckdifferenz an den dortigen Schleusentüren im geforderten Druckbereich einstellt.

Bestimmungen in Regelwerken

Die sicherheitstechnischen Anforderungen an druckbelüftete Treppenräume sind für den Bereich der Bundesrepublik Deutschland in bauaufsichtlichen Regelungen gegeben. Diese Angaben in den Landesbauordnungen bzw. Hochhausverordnungen der einzelnen Bundesländer unterscheiden sich nur geringfügig. Alle Regelungen sehen vor, dass der Treppenraum von unten nach oben hinreichend durchströmt wird und dass der Zugang zum Treppenraum über Sicherheitsschleusen mit Drucklufthaltung erfolgt. Es werden Mindestanfor-

derungen an den Luftvolumenstrom V_L im Treppenraum, an den Luftvolumenstrom V_L zur Druckhaltung der Sicherheitsschleusen und eine maximale Drucklast p_1 an den Schleusentüren angegeben. Das Ziel der Luftführung in Sicherheitstreppenräumen wird in der Bauordnung des Landes Nordrhein-Westfalen wie folgt angegeben:

„Die Lüftungsanlage des Treppenraumes ist so einzurichten oder durch eine 2. Lüftungsanlage für alle Schleusen so zu ergänzen, dass im Brandfall in dem vom Brand betroffenen Geschoss bei geöffneten Schleusentüren und beim ungünstigsten Druck im Treppenraum von der Schleuse in den der Schleuse vorgelagerten Raum ein Luftvolumenstrom V_L strömt.“

Der Luftvolumenstrom V_L wird dabei nach folgender Gleichung berechnet:

$$V_L = k \cdot b \cdot h^{1,5} \text{ [m}^3\text{/s]} \quad \text{[Gl. 1]}$$

b: Breite der Tür

h: Höhe der Tür

k: Faktor, der die brandbedingte aerostatische Druckdifferenz berücksichtigen soll

Wenn der Schleuse ein notwendiger Flur vorgelagert ist, kann $k = 1,5$ gesetzt werden, in allen anderen Fällen ist $k = 1,8$. Die Angaben b und h sind in [Gl. 1] in Metern einzusetzen. Für typische Türgrö-

ßen mit $h = 2 \text{ m}$ und $b = 1,2 \text{ m}$ ergeben sich Volumenströme von ca. $18\,000 \text{ m}^3\text{/h}$.

Der zur Durchströmung des Treppenraumes anzusetzende Luftvolumenstrom ergibt sich aus dem Volumenstrom V_L und den im Treppenraum insgesamt zu erwartenden Leckage-Volumenströmen. Dabei sind insbesondere die Undichtigkeiten an den Schleusen- und Flurtüren der Zugänge zum Treppenraum zu berücksichtigen. Über die Flächenundichtheit von Türen liegen Informationen vor, z. B. für Rauchschutztüren in DIN 18 095. Zur Bestimmung der Leckage-Volumenströme muss außer der Flächenundichtheit die an der betrachteten Tür herrschende Druckdifferenz bekannt sein, um die Leckage-Volumenströme zu berechnen.

Die Forderung nach einer Begrenzung der an den Schleusen- und Flurtüren herrschenden Druckdifferenz soll sicherstellen, dass die Türen als Fluchttüren zur Verfügung stehen, d. h. gegen die einwirkende Druckdifferenz geöffnet werden können. Meist wird zur Sicherstellung dieses Zieles eine Druckdifferenz $p_1 = 50 \text{ Pa}$ angegeben. Die Verwaltungsvorschrift zur Landesbauordnung (VV BauO NRW) führt hierzu unter Pos. 37.4322 wörtlich aus:

„Der Überdruck im notwendigen Treppenraum oder in der Sicherheitsschleuse darf bei geschlossenen Türen $100 \text{ N je } 2 \text{ m}^2$ Türfläche nicht überschreiten.“

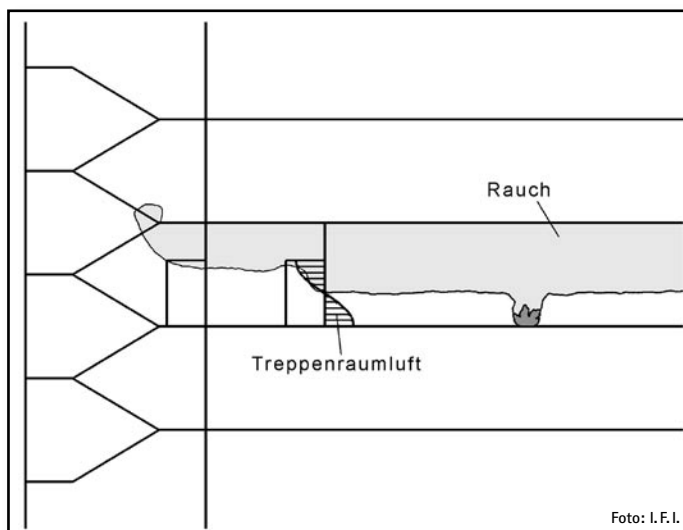


Bild 1a Zusammenbruch der Rauchfreihaltung – dies kann aus mangelndem Überdruck des Treppenraums resultieren, aber auch aus fehlenden Abströmöffnungen im Brandgeschoss oder nachteiligen Windinflüssen ebendort

Physikalische Grundlagen

Brandschutzkonzept

Bild 1a zeigt die schematische Darstellung eines Treppenraumes, der über eine Schleuse an den Flur des Geschosses, in dem ein Brand ausgebrochen ist, angeschlossen ist. Sind die Fenster des Brandgeschosses geschlossen und wird die Schleuse als Teil des Fluchtweges zur Evakuierung des Brandgeschosses genutzt, d. h. die Schleusentüren sind offen, so strömen die Rauchgase unterhalb der Flurdecke zum Treppenraum hin ab.

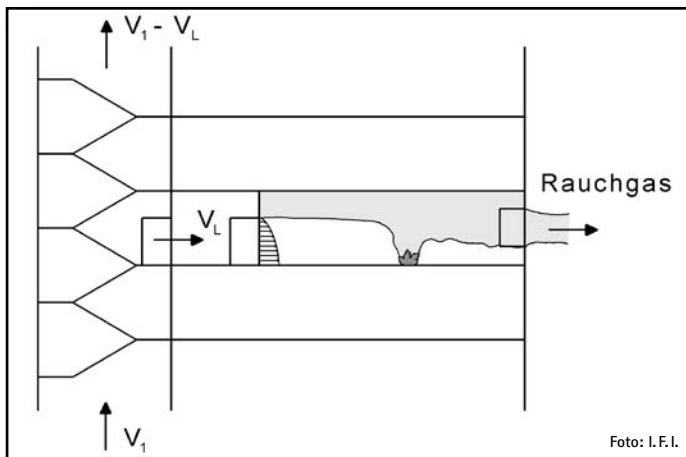


Bild 1b Sichere Rauchfreihaltung bei ausreichendem Volumenstrom ins Brandgeschoss. Aufgrund des mit der Höhe zunehmenden Gegendrucks aus der Rauchströmung ergibt sich der erforderliche Überdruck des Treppenraums zu diesem Geschoss

Um den Fluchtweg „Treppenraum“ nicht zu gefährden, muss das Überströmen von Rauchgasen in den Treppenraum ausgeschlossen werden. Dies wird dadurch erreicht, dass dem Treppenraum der Luftvolumenstrom V_1 zugeführt wird, der zum Überströmen der Luftmenge V_L in das Brandgeschoss führt. Der Luftvolumenstrom V_L muss so ausgelegt werden, dass im oberen Bereich der Türschleusen die thermikbedingte Ausströmgeschwindigkeit gerade kompensiert wird. Das Strömungsbild in Bild 1b setzt voraus, dass der dem Brandgeschoss nunmehr zuströmende Luftmassenstrom an anderer Stelle, z. B. durch ein geöffnetes Fenster, abströmt. Aus Kontinuitätsgründen muss dem Brandgeschoss aus dem Treppenhaus Luft mit einem Massenstrom entsprechend dem abgeleiteten Rauchgasmassenstrom zuströmen. Unter der Annahme, dass sich über die Höhe des Brandgeschosses ein näherungsweise gleichmäßiger Druck einstellt, ergibt sich die dargestellte Geschwindigkeitsverteilung.

Das Schutzziel „Vermeidung des Eintritts von Rauchgasen in den Treppenraum“ wird sichergestellt, wenn zum einen ein ausreichender Luftvolumenstrom V_L zur Verfügung steht und zum anderen eine Abströmöffnung aus dem Brandgeschoss vorhanden ist. Der Volumenstrom V_L , der das Überströmen von Rauchgasen in den Treppenraum verhindert, wird dabei nach [Gl. 1] bestimmt.

Eine wesentliche Voraussetzung für die uneingeschränkte Nutzung des Treppenraumes als Fluchtweg ist die Möglichkeit, die Schleusentüren öffnen zu können. Experimentelle Untersuchungen haben gezeigt, dass dies eine Begrenzung der erforderlichen Türöffnungskräfte erforderlich macht. Die bisherige Angabe in den Landesbauordnungen bezüglich einer maximalen Druckdifferenz an der geschlossenen Tür von $\Delta p_1 = 50 \text{ Pa}$ trägt dieser Forderung nur indirekt Rechnung. Bei vorgegebener Druckdifferenz hängt die Türöffnungskraft zusätzlich von der Hebellänge zwischen Türgriff und Türscharnier ab. Die Hebellänge beträgt in guter Näherung 90 % der Türbreite, während der Kraftangriffspunkt entsprechend

der Druckbelastung der Tür in der Mitte der Tür liegt. Bei einer 2 m² großen Tür führt die Forderung der maximalen Druckdifferenz $\Delta p_1 = 50$ Pa unter Berücksichtigung der Hebellängen zu einer Türöffnungskraft von ca. 55 N. Eigene Überprüfungen mit unterschiedlichen Testpersonen ergaben eine kritische Türöffnungskraft von ca. 100 N. Dieser Wert wird auch im Entwurf von DIN EN 12 101-6 verwendet [4].

Aerostatische Druckverteilung

In aerostatischer Hinsicht ist die Luft im Treppenraum eine Luftsäule mit konstanter Temperatur. Sie steht über die Undichtigkeiten im Gebäude unmittelbar oder mittelbar mit der Atmosphäre, deren Temperatur im Allgemeinen nicht gleich der Lufttemperatur im Treppenraum ist, in Verbindung. Infolge der unterschiedlichen Temperaturen kommt es zu einer Druckdifferenz, die mittels der aerostatischen Grundgleichung berechnet werden kann:

$$\Delta p_{\text{therm}} = (\rho_{\text{TR}} - \rho_0) \cdot g \cdot h_{\text{TR}} \quad [\text{Gl. 2}]$$

ρ_{TR} : Dichte der Treppenraumluft

ρ_0 : Dichte der Atmosphärenluft

g : Erdbeschleunigung

h_{TR} : Höhe des – nicht horizontal unterteilten – Treppenraumes

Bild 2 zeigt beispielhaft die aerostatische Druckverteilung in einem 200 m hohen Treppenraum für eine extreme Wintersituation bei einer Außentemperatur von -10 °C und für einen extremen Sommerfall bei einer Außentemperatur von 33 °C, jeweils bei einer angenommenen Lufttemperatur im Treppenraum von 20 °C. Nach [Gl. 2] ergibt sich eine maximale Druckdifferenz $\Delta p_{\text{therm,Winter}} = -255$ Pa (Winterfall) bzw. $\Delta p_{\text{therm,Sommer}} = +98$ Pa (Sommerfall) gegenüber der Außenluft.

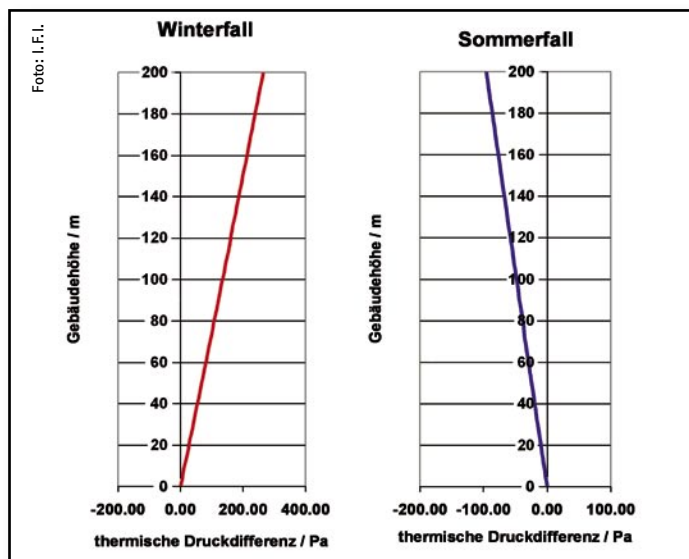
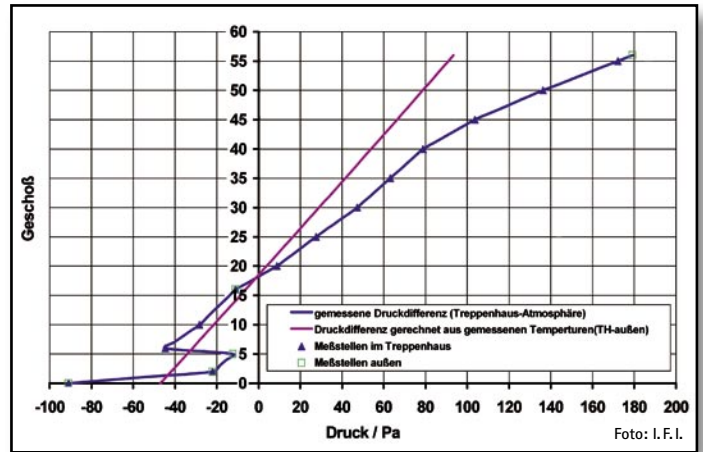


Bild 2 Aerostatische Druckverteilung in einem 200 m hohen Treppenraum ($t_i = 20$ °C) im Winter ($t_a = -15$ °C) und Sommer ($t_a = 33$ °C) gegenüber der Atmosphäre

Bild 3 Gemessene und mittels [Gl. 2] berechnete Druckdifferenz zwischen Treppenraum und Atmosphäre für ein 200 m hohes Gebäude (Außentemperatur im Bodenniveau $\vartheta = 5$ °C) – Einbrüche der Messung resultieren aus Türöffnungen in diesem Bereich



Im Winter wirkt der Druck in den oberen Geschossen von innen nach außen, im Sommer von außen nach innen.

Der theoretisch zu erwartende aerostatische Druckverlauf in Treppenräumen von Hochhäusern wurde vom Institut für Industrieaerodynamik (I. F. I.) an einem 200 m hohen Gebäude überprüft. Mittels eines hochpräzisen Barometers wurden der Außendruck und der Treppenraumdruck in jedem fünften Geschoss gemessen. Ferner wurde die Außentemperatur und die Treppenraumtemperatur bestimmt. Bild 3 zeigt die Messergebnisse und die mittels [Gl. 2] bestimmte aerostatische Druckdifferenz zwischen Treppenraum und Atmosphäre.

Im unteren Bereich, bis etwa zum sechsten Geschoss, zeigen die gemessenen Druckdifferenzen deutliche Abweichungen von der erwarteten linearen Druckänderung mit der Höhe. Extrapoliert man den im mittleren Bereich gemessenen linearen Verlauf zu den niedrigen Geschossen, so ergibt sich näherungsweise die erwartete aerostatische Druckänderung. Die Abweichungen vom theoretischen Druckverlauf im unteren Höhenbereich könnten bedingt sein durch eine unmittelbare

Verbindung zwischen Treppenhaus und Atmosphäre infolge geöffneter Türen und Fenster in einigen der Geschosse. Auf Tür- und Fensterstellungen konnte während der Messungen kein Einfluss genommen werden.

Die Ebene des Druck-Nulldurchgangs ($\Delta p = 0$) hängt von der Verteilung der Durchlässigkeiten der äußeren Gebäudewände und der inneren Unterteilungen ab. Sie ergibt sich nicht, wie dies von Ostertag und Zitzelsberger [2] angesetzt wird, immer in halber Gebäudehöhe. Wird z. B. in einem Geschoss durch Öffnen von Fenstern und Zwischentüren eine direkte Verbindung zwischen Treppenraum und Atmosphäre ohne große Strömungswiderstände geschaffen, so verschiebt sich die neutrale Ebene zu diesem Geschoss hin.

Auffallend ist in Bild 3 die unterschiedliche Steigung des gemessenen Druckverlaufs im Vergleich zum theoretischen Druckverlauf. [Gl. 2] gilt unter der Annahme, dass die Temperatur sich mit der Höhe nicht ändert. Ein Grund für die Unterschiede in Bild 3 ist die Änderung des barometrischen Druckes durch die tatsächliche Änderung der Temperatur mit der Höhe. Weitere Gründe sind der Druckverlust bei der Durchströmung des Treppenraumes infolge geöffneter Türen und Fenster und das windbedingte Druckfeld an den Gebäudeaußenwänden.

Bei den bisherigen Überlegungen – und auch den Überlegungen von Ostertag und Zitzelsberger [2] und Baldauf [1] – werden keine weiteren Einflüsse, z. B. durch Windeinwirkung, berücksichtigt. Diese Betrachtung wäre richtig, wenn die gesamte Gebäudehülle, d. h. alle Außenwände und Dachflächen, luftundurchlässig wären. Nur für diesen Idealfall, der jedoch ohne baupraktischen Belang ist, ergibt sich nämlich im Innern des Gebäudes eine nur aerostatisch bedingte Druckverteilung entsprechend dem über die Höhe gemittelten Atmosphärendruck.

Ist jedoch die äußere Druckverteilung an den Gebäudeaußenwänden infolge barometrischer Druckänderung und infolge Winddruckwirkung an den Innenraum „angekoppelt“, so ist der vertikalen Änderung der Druckdifferenz zwischen Treppenraum und den benachbarten Gebäudebereichen die horizontale Druckänderung, z. B. zwischen Luv- und Leeseite infolge Windeinwirkung, zu überlagern. Dies führt zu äußerst komplexen Druckfeldern im Innern des Gebäudes, die außer von der Thermikwirkung von der Form des Gebäudes, der Durchlässigkeit der Fassade und Türen, der Kombination offener bzw. geschlossener Türen und den Windverhältnissen abhängen.

Dies soll schematisch für das 30. Geschoss des Gebäudes, für welches Bild 3 die gemessenen Druckverläufe zeigt, dargestellt werden. Die von Wetterstationen in 10 m Höhe gemessenen Windgeschwindigkeiten ergeben für die Bundesrepublik Deutschland einen Jahresmittelwert von $\bar{u}_M \approx 4 \text{ m/s}$. Die Windgeschwindigkeit ist dabei über 10 min gemittelt. Mittels des üblichen Potenzgesetzes und einem Windprofilexponenten $\alpha_p = 0,26$ ergibt sich daraus für den Jahresmittelwert der 10-min-Windgeschwindigkeit in 100 m Höhe:

$$\bar{u}_{M,100} = \bar{u}_{M,10} (100/10)^{\alpha_p} = 7,3 \text{ m/s [Gl. 3]}$$

Dies entspricht einem Windstaudruck von 33 Pa. Ist bei einem Brandfall ein luvseitiges Fenster geöffnet, so wird die windbedingte Druckdifferenz, bezogen auf den Atmosphärendruck in dieser Höhe, $\Delta p_w = 33 \text{ Pa}$ aufgeprägt. Ist dagegen ein leeseitiges Fenster geöffnet, so ergibt sich entsprechend dem leeseitigen Sogbeiwert $c_p = -0,4$ dort ein windbedingter Sog $\Delta p_w = 0,4 \cdot 33 \text{ Pa} = 13 \text{ Pa}$. Diese windbedingte Druckdifferenz ist mit der thermischen und barometrischen Druckänderung mit der Höhe zu überlagern. Für den dargestellten Winterfall (Überdruck im Treppenraum) werden bei luvseitiger Anbindung des Treppenraumes an die Atmosphäre die Überdrücke im Treppenraum vergrößert.

Bereits bei Windgeschwindigkeiten in Höhe des 30. Geschosses $\bar{u}_{100} = 14 \text{ m/s}$ entsprechend einer Windgeschwindigkeit in 10 m Höhe $\bar{u}_{10} = 7,8 \text{ m/s}$ ist der windbedingte Überdruck etwa gleich dem Überdruck infolge Thermikwirkung und barometrischer Druckänderung. Man erkennt, dass die Auslegung von Maßnahmen zur Einschränkung der Druckdifferenzen zwischen Treppenraum und Atmosphäre allein unter Berücksichtigung der Thermikwirkung nicht ausreichend ist.

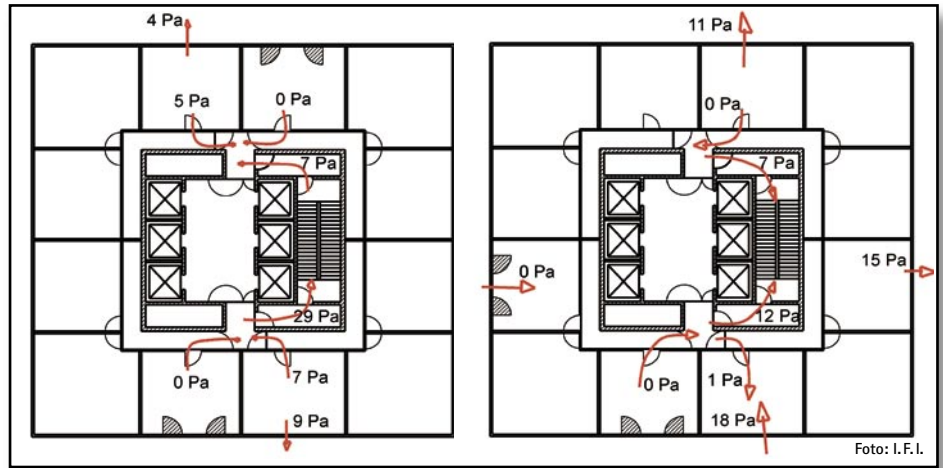


Bild 4 Typische, windbedingte Druckverläufe im Regelgeschoss eines Gebäudes mit quadratischem Grundriss bei luv- und leeseitig geöffneten Fenstern (links) und bei geöffneten Fenstern in der Luvseite und einer windparallelen Seite (rechts) – Windanströmung im Bild von unten

Die obigen Betrachtungen können als obere und untere Einhüllende der tatsächlichen Windwirkung aufgefasst werden. Sie gelten für den Fall, dass die Gebäudewände mit Ausnahme des einzelnen betrachteten Fensters winddicht sind. Werden an mehr als einer Gebäudewand Fenster geöffnet, so ergeben sich im betrachteten Geschoss Druckverteilungen, welche von der Öffnung der Büro- und Flurtüren zwischen den geöffneten Fenstern abhängen. Bild 4 zeigt typische, windbedingte Druckdifferenzen für ein Gebäude mit quadratischem Grundriss und Öffnung eines luv- und leeseitigen Fensters bzw. eines Fensters auf der Luvseite bei gleichzeitiger Öffnung eines Fensters auf einer windparallelen Seite.

Druckverteilung in durchströmten Treppenräumen

Im Brandfall ist eine Durchströmung des Treppenraumes und mindestens einer offenen Schleuse derart sicherzustellen, dass über die geöffnete Schleuse kein Rauchgas in den Treppenraum eintreten kann. Die Druckverteilung im Treppenraum wird dann außer durch die aerostatischen Druckdifferenzen durch die Druckverluste beim Durchströmen des Treppenraumes beeinflusst. Für zwei typische Treppenräume von ausgeführten Hochhäusern wurden die Druckverluste experimentell an Modellen (Maßstab 1:10) bestimmt. Hierzu wurde der statische Druckverlauf

an einem zehn Geschosse umfassenden Modell in jedem Geschoss mittels Ringleitung gemessen.

Die Untersuchungen wurden entsprechend der bei dem Auslegevolumenstrom zu erwartenden Reynolds-Zahl Re und bei einer von dieser abweichenden Reynolds-Zahl gemessen. Der Reynolds-Zahl-Einfluss ist gering mit geringfügig sinkenden Druckverlustbeiwerten mit zunehmender Reynolds-Zahl. Diese Abnahme entspricht der Abnahme des dimensionslosen Reibungsverlustes in einer Kanalströmung. Wesentlich für die Druckverluste sind jedoch die Strömungsablösungen an den Kanten der Treppenläufe im Bereich der Treppenaugen. Hier handelt es sich um ablösebedingte Druckverluste, die nicht von der Reynolds-Zahl abhängig sind. Für die beiden Treppenräume ergaben sich die folgenden Druckverlustbeiwerte:

Treppenraum 1: $\zeta = 25$

Treppenraum 2: $\zeta = 56$

Die Druckverlustbeiwerte wurden dabei auf die Grundfläche des Treppenraumes und den durchgesetzten Volumenstrom bezogen:

$$\zeta = \frac{\Delta p_v}{\frac{\rho}{2} \bar{v}^2} = \frac{\Delta p_v}{\frac{\rho}{2} \cdot \left(\frac{\dot{V}}{A_{TR}} \right)^2} \quad \text{[Gl. 4]}$$

Der Druckverlauf im Treppenraum hängt bei bekannter aerostatischer Druckverteilung und bei bekanntem Druckverlustbeiwert ζ weiterhin davon ab, in welchem Geschoss die Schleuse zum Treppenraum zur Entfluchtung des Geschosses geöffnet ist und welcher Volumenstrom dort vom Treppenraum zum angrenzenden Flur hin abströmt. Für den 200 m hohen Treppenraum und die in Bild 2 dargestellte Druckverteilung für den Winterfall ist der statische Druckverlauf für ein Brandgeschehen im 18. Geschoss in Bild 5 dargestellt.

Dabei wurde angenommen, dass die Abströmung der Restluftmenge – Differenz aus vom Ventilator gefördertem Volumenstrom und in den Brandraum eingeströmtem Volumenstrom sowie eventuellem Leckvolumenstrom – aus dem Treppenraum durch eine regelbare Klappe erfolgt, die so eingestellt ist, dass im ungünstigsten Geschoss eine Druckdifferenz an der geschlossenen Schleusentür zwischen 15 und 50 Pa bei einem medianen Wind von 4 m/s herrscht. Diese für die Nutzung des Sicherheitstreppenraumes im Brandfall wichtige Eigenschaft wird unten eingehend erläutert.

Einfluss der Undichtigkeiten

Alle bisherigen Betrachtungen gehen von einer unrealistischen gleichmäßigen Undichtigkeit der äußeren Gebäudewände sowie der inneren Abtrennungen aus. In der Praxis ergeben sich die Undichtigkeiten der äußeren Gebäudewände zum einen an den Fenstern, Lüftungsklappen etc. und zum anderen – insbesondere bei modernen Hochhauskonstruktionen – an den Verbindungen zwischen den Glasflächen und den diese haltenden Profilen.

Im Gebäudeinnern sind die Undichtigkeiten im Wesentlichen durch die Türen

gegeben. Durch die Druckdifferenzen ergeben sich Luftströmungen zum niedrigeren Druckniveau hin. An jeder Fläche mit Undichtigkeiten werden dabei Druckverluste erzeugt. Der Strömungspfad besteht also aus einer Hintereinanderschaltung von Strömungswiderständen, die sich im Wesentlichen als Carnot'scher Stoßverlust ergeben. Sie lassen sich in guter Näherung mit der verlustbehafteten Bernoulli-Gleichung berechnen. Die resultierenden Volumenströme können dann durch ein Widerstandsnetzwerk bestimmt werden.

Die größten Druckverluste ergeben sich an der Trennfläche mit der größten Dichtigkeit. Im Allgemeinen ist dies – bei geschlossenen Fenstern und Lüftungsklappen – die Gebäudeaußenwand. Hier wird folglich die größte Druckdifferenz zwischen Treppenhaus und Atmosphäre „abgebaut“. Eine entsprechend geringere Druckdifferenz ergibt sich an den dazwischen liegenden Türen.

Es sei ausdrücklich darauf verwiesen, dass die Undichtigkeiten sowohl an der Gebäudeaußenwand als auch an den Türen im Leistungsverzeichnis spezifiziert werden können – und aufgrund anderer Anforderungen auch werden(!) – und dass diese nach Fertigstellung des Gebäudes auf einfache Art überprüft werden können. Die Annahme von Ostertag in [2], dass „sich die Drücke aus irgendwelchen Gebäude-Undichtigkeiten zufällig ergeben“ ist daher unrealistisch und falsch. Der Planer hat sehr wohl Möglichkeiten, das Druckfeld im Gebäudeinnern vorherzubestimmen, Kenngrößen nachzumessen und durch geeignete Maßnahmen optimal einzustellen. Eine hilfreiche Eigenschaft ist hierbei, die äußere Gebäudewand im Ereignisfall, mit Ausnahme des Brandgeschosses, schließen zu können.

Diskussion der Anforderungen nach BauO und HochhVO

Volumenstrom

Zur Vermeidung des Eintretens von Rauchgasen in den Treppenraum muss Luft aus dem Treppenraum in das Brandgeschoss einströmen. Der Einströmvorgang ist vergleichbar mit der Durchströmung einer Engstelle in einem Kanalnetz, z. B. einer Blende. Der Volumenstrom ist abhängig von der Druckdifferenz Δp , der Öffnungsfläche A , der Dichte des durchströmenden Fluides ρ und den geometrischen Randbedingungen. Diese werden im Allgemeinen durch den Durchflussbeiwert α (auch c_D) erfasst:

$$\dot{V} = \alpha \cdot A \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta p}{\rho_{TR}}} \quad [Gl. 5]$$

Im vorliegenden Fall ist die Druckdifferenz thermisch bedingt. Geht man näherungsweise von einem konstanten statischen Druck über die gesamte Raumhöhe aus, so beträgt die thermisch bedingte Druckdifferenz

$$\Delta p_{therm} = \rho_{Tr} \cdot g \cdot \left(1 - \frac{T_{Tr}}{T_{RG}}\right) \cdot h \quad [Gl. 6]$$

T_{RG} : Rauchgastemperatur

Setzt man [Gl. 6] in [Gl. 5] ein, so erhält man:

$$\dot{V} = \alpha \cdot b \cdot h^{1.5} \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot \left(1 - \frac{T_{Tr}}{T_{RG}}\right)} \quad [Gl. 7]$$

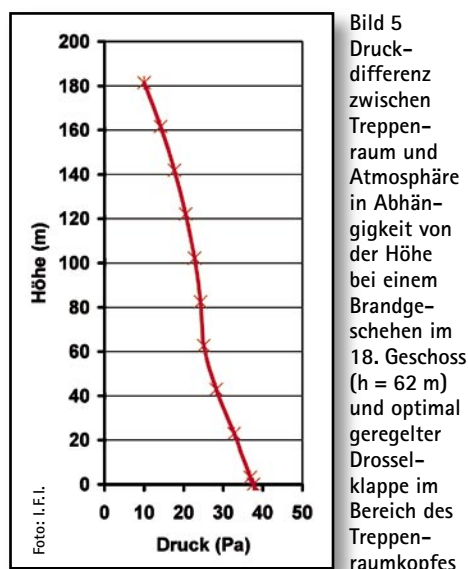
Man erkennt, dass die in den Landesbauordnungen bzw. Hochhausverordnungen angegebene Gleichung zur Bestimmung des erforderlichen Volumenstromes V_L eine vereinfachte Form der [Gl. 7] ist. Allerdings wird in der vereinfachten Gleichung der Temperatureinfluss nicht berücksichtigt. Dies ist sicherlich im Rahmen der geforderten Genauigkeit akzeptabel, da der Einfluss der Quadratwurzel in [Gl. 7] im Vergleich zur Unwägbarkeit bei der Annahme von Brandszenarien klein ist.

Ein 200 °C heißes Rauchgas würde z. B. einen 30 % größeren Volumenstrom erfordern als ein 100 °C heißes Rauchgas. Bei einer sicherlich realistischen Rauchgastemperatur von 100 °C und einem Durchflussbeiwert $\alpha = 0,7$ ergibt sich als Produkt des Durchflussbeiwertes und der Quadratwurzel in [Gl. 7], also der der Konstanten k in [Gl. 1] äquivalenten Größe, der Wert 1,52. Dieser Wert ist im Regelwerk anzusetzen, wenn der Schleuse ein notwendiger Flur vorgelagert ist. Die Angaben in den Landesbauordnungen (BauO) bzw. Hochhausverordnungen (HochhVO) sind aus strömungstechnischer Hinsicht also realistisch.

Druckverteilung in Hochhäusern

Methodik

Der Einfluss der immer vorhandenen Leckage-Ströme auf die Druckverteilung in Hochhäusern soll an einem ca. 160 m hohen Gebäude beispielhaft erläutert werden. Bild 6 zeigt den Ausschnitt eines schematisierten Grundrisses. Das Gebäude wird durch einen über die gesamte Höhe reichenden, jedoch in mehreren Geschossen horizontal unterteilten Luftraum in zwei etwa gleiche Hälften unterteilt. In jeder Hälfte befinden sich zwei Sicherheitstreppehäuser, die über eine Schleuse



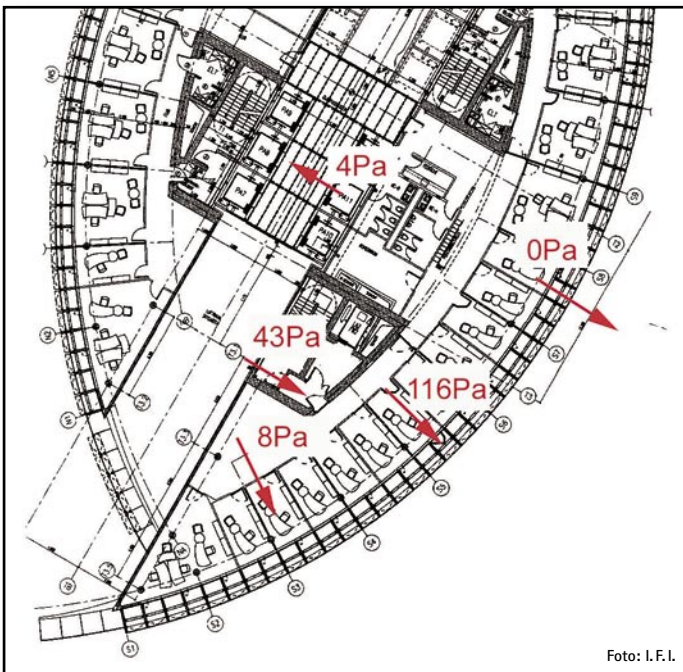


Bild 6 Gerechnete Druckverteilung eines oberen Geschosses bei teilweise geöffneter Fassade, jedoch geschlossener Schleusentür bei hoher aerostatischer Druckdifferenz (ca. 160 Pa zwischen Treppenhaus und Atmosphäre)

Foto: I.F.I.

und einen Gang von den außenliegenden Büros erreicht werden können. An die Türen zu den Büros und in den Gängen werden keine brandschutztechnischen Anforderungen gestellt. Das Gebäude besitzt eine Doppelfassade. Die Öffnungen in der äußeren Fassade und die Fenster der inneren Fassade können motorisch geöffnet oder geschlossen werden. Die Dichtheit der äußeren und inneren Fassade war im Leistungsverzeichnis spezifiziert und wurde nach Fertigstellung des Gebäudes überprüft.

Die Druckverteilung im Gebäude – in horizontaler und vertikaler Richtung – wurde mit einem speziell für diesen Anwendungsfall entwickelten Computerprogramm für Multizonen-Gebäude-durchströmung berechnet. Das Programm ermöglicht die Vorgabe unterschiedlicher Leckagen an den Fassaden und den Türen sowie die Berücksichtigung von Windein-

flüssen. Für die folgenden Berechnungen wurden für die Wände, Türen und Fenster typische Dichtigkeiten zu Grunde gelegt.

Ergebnisse für ein Geschoss ohne Brandereignis

Im Brandfall werden in allen Geschossen ohne Brandereignis die Fenster der inneren Fassade motorisch geschlossen und alle Lüftungsflächen der äußeren Fassade motorisch geöffnet. Für den ungünstigen Winterfall mit besonders großen Druckdifferenzen zwischen Treppenraum und Atmosphäre wurde die Druckverteilung in einem oberen Geschoss berechnet. Sie ist für wichtige Bereiche in Bild 6 angegeben. Man erkennt, dass der bei weitem größte Teil der Druckdifferenz zwischen Treppenraum und Atmosphäre an der vergleichsweise dichten Innenfassade abgebaut wird. Die Druckdifferenz an den Schleusentüren ist kleiner als 50 Pa. Die Gefahr, dass die Türen von Flüchtenden

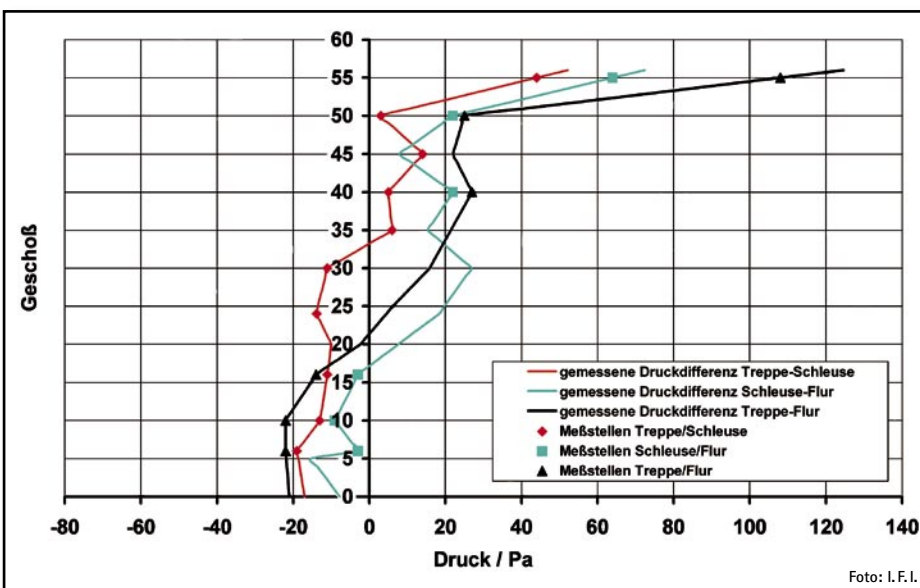


Foto: I.F.I.

Bild 7 Gemessene Druckdifferenzen an den Schleusentüren eines 200 m hohen Gebäudes infolge der in Bild 3 gezeigten aerostatischen Druckdifferenz

nicht geöffnet werden können, besteht nicht. Das Ergebnis ist nur schwach von einer Variation der Dichtigkeiten der Innenfassade und der Türen abhängig. Selbst für Fassaden, die den üblichen Dichtheitsanforderungen nicht genügen, sind die Dichtheiten deutlich größer als die von Türen.

An dem erwähnten 200 m hohen Gebäude wurden ebenfalls die Druckdifferenzen an einigen Türen zwischen Treppenraum und Mieterbereichen gemessen. Die Darstellung in Bild 7 zeigt, abgesehen vom 55. Geschoss, in dem eine vergleichsweise schlecht dichtende Tür vom Vorraum zur Aussichtsplattform führte, über die gesamte Gebäudehöhe Druckdifferenzen an den zwei Türen zwischen Treppenraum und Mieterbereichen $-25 \text{ Pa} < \Delta p < 25 \text{ Pa}$.

Ergebnisse für ein Geschoss mit Brandereignis

Die Druckverteilung im vom Brandereignis betroffenen Geschoss ist deutlich ungünstiger, siehe Bild 8. Dargestellt ist der kritische Zeitraum nach Branderkennung und erfolgtem Öffnen der Fenster im betroffenen Bereich. Die Schleusentüren sind nun die Flächen mit der größten Dichtheit. Hier wird also ein wesentlicher Teil der Druckdifferenz zwischen Treppenraum und Atmosphäre abgebaut. Werden keine Abhilfemaßnahmen ergriffen, ergibt sich eine Druckdifferenz $\Delta p \gg 50 \text{ Pa}$.

Bei Branderkennung wird die Druckbelüftung des Treppenraumes aktiviert. Der Treppenraumdruck lässt sich auf einfache Art durch Steuerung der Volumenströme einstellen. Hierzu ist die Kenntnis der Druckverluste beim Durchströmen des Treppenraumes und des vom Brandereignis betroffenen Geschosses notwendig. Beide Eingangsgrößen für die Berechnung des Druckverlustes an der Abströmklappe, welche erforderlich ist, um an der Treppenraumtür bzw. der Schleusentür des Brandgeschosses die Druckdifferenz auf $\Delta p = 50 \text{ Pa}$ zu beschränken, lassen sich auf einfache Art bestimmen. Hieraus lässt sich ein Regelalgorithmus für die einzusetzende Abströmklappe mit Hilfe eines Berechnungsprogramms ableiten.

Schlussfolgerungen

1. Ostertag und Zitzelsberger [2] haben erstmals auf die Bedeutung der aerostatischen Druckdifferenz zwischen Treppenraum und Atmosphäre für die Nutzbarkeit von druckbelüfteten Sicherheitstreppe nräumen in Hochhäusern hingewiesen. Ihnen wird in

Bild 8 Gerechnete Druckverteilung im Brandgeschoss bei geöffneten Fenstern, jedoch geschlossener Schleusentür ohne geregelte Druckbelüftung des Treppenraumes

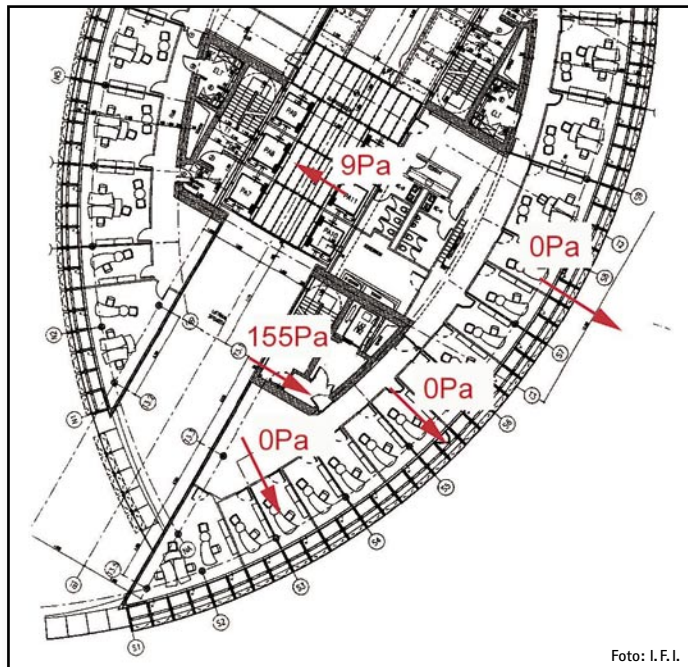


Foto: I.F.I.

Fachkreisen, ohne physikalische Begründung, entgegengehalten, dass die beschriebenen „akuten Gefahren“ bisher in ausgeführten Hochhäusern nicht beobachtet wurden.

2. Bei ihren Überlegungen gehen Ostertag und Zitzelsberger (2001) von einer gleichförmigen Undichtigkeit der äußeren Gebäudewände und der Türen im Innern des Gebäudes aus. Diese Annahme entspricht nicht der tatsächlichen Ausführung von Hochhäusern. Bei klimatisierten Hochhäusern – d. h. die Fassaden besitzen keine offenbaren Flächen – sind die Außenwände erheblich dichter als die Türen im Innern. Die aerostatische Druckdifferenz zwischen Treppenhaus und Atmosphäre wird hier überwiegend an der Außenwand „abgebaut“. Die Druckdifferenzen, z. B. an den Schleusentüren zum Treppenhaus, sind dann immer kleiner als 50 Pa.

3. In den Außenwänden von natürlich belüfteten Hochhäusern können Flächen (Fenster oder Lüftungsklappen) geöffnet und geschlossen werden. Im Allgemeinen erfolgt der Öffnungs- oder Schließvorgang motorisch. Im Brandfall lassen sich also die Lüftungsflächen im Brandgeschoss öffnen und in allen anderen Geschossen schließen. Da die Dichtheit der Außenwand erheblich größer ist als die der inneren Türen, ergeben sich in den nicht vom Brand betroffenen Geschossen nur geringe Druckdifferenzen an den Schleusentüren zum Treppenhaus. Werden keine weiteren Maßnahmen außer der Druckbelüftung des Treppenhauses ergriffen, können Drücke an den Schleusentüren zum Treppenhaus im Brandgeschoss auftreten, die deutlich größer als 50 Pa sind.

4. Verwendet man eine geregelte Abströmklappe im Kopfbereich des druckbelüfteten Sicherheitstreppe nhauses, so lässt sich der Druckverlauf im Treppenhaus derart einstellen, dass sich im Brandgeschoss an den Schleusentüren zum Treppenhaus eine Druckdifferenz von kleiner 50 Pa einstellt. Grundlage für die Regelung der Abströmklappe ist die Kenntnis der Druckverluste beim Durchströmen des Treppenraumes, des vom Brandereignis betroffenen Geschosses und des thermodynamischen Zustandes der Atmosphäre (Temperatur, Windgeschwindigkeit, Windrichtung).

5. Die Bestimmungen in den einschlägigen Regelwerken tragen den oben angegebenen Randbedingungen nicht Rechnung. Hier ist dringend eine Änderung des Regelwerkes erforderlich. ←

Literatur

- [1] Baldauf, G.: Rauchschutz für Rettungswege. VI. Baurecht & Brandschutz-Symposium. Ziller-ASS. Frankfurt/Main. 2002
- [2] Ostertag, D. und Zitzelsberger, J.: Innenliegende Sicherheitstreppe nräume in Hochhäusern und ihre Rauchfreihaltung. vfdb-Zeitschrift 3/2001, Seite 120ff
- [3] Ostertag, D.: Akute Gefahr in Sicherheitstreppe nräumen und Feuerwehraufzügen von Hochhäusern – Erfahrungen und weitere Überlegungen. vfdb 2/2002
- [4] DIN EN 12 101-6 (Entwurf) Rauch- und Wärmefreihaltung – Teil 6: Differenzdrucksysteme. Beuth Verlag. Berlin. November 2001

Dipl.-Ing. Rolf-Dieter Lieb, DS-Plan GmbH Stuttgart; Prof. Dr.-Ing. H. J. Gerhardt und Dipl.-Ing. Bernd Konrath vom I. F. I. Institut für Industrieaerodynamik GmbH, Institut an der Fachhochschule Aachen