

| | |
|---------------------|---|
| Zeitschrift: | Schweizerische Bauzeitung |
| Herausgeber: | Verlags-AG der akademischen technischen Vereine |
| Band: | 82 (1964) |
| Heft: | 11 |
| Artikel: | Untersuchungen an einem Abluftsystem: ein Beitrag zur Aerodynamik der Tunnellüftung |
| Autor: | Kempf, Jacques |
| DOI: | https://doi.org/10.5169/seals-67459 |

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 23.02.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

wissenschaftliche, sorgfältige Ausführung, um zu verhindern, dass im Pfahle Unstetigkeiten, Risse, Einschnürungen, ja Unterbrüche entstehen, die jede sichere Uebertragung von Lasten illusorisch werden lässt. Die Bilder 9 bis 13, eine kürzlich erstellte Pfahlgründung betreffend, legen kommentarlos Zeugnis ab von dem Gesagten und könnten leider durch andere Beispiele erweitert werden. Bei Pfahlgruppen, insbesondere dann, wenn die Pfähle nahe beieinander liegen, ist bei Rammpfählen auf das Hochsteigen bereits fertiger Pfähle durch das Rammen der neuen Pfähle zu achten. In solchen Fällen, wie vorsichtshalber übrigens bei allen Ortsfählen, sind Bewehrungen unbedingt notwendig. Je nach den Verhältnissen sind dabei überhaupt keine Ramm-, sondern nur Bohrpfähle zu verwenden.

Zur Uebertragung grösserer Lasten und bei Vorhandensein gut tragfähiger Schichten wird in immer weitgehenderem Ausmass der grosskalibrige Pfahl verwendet. Bis zu einem gewissen Gewicht und sofern das notwendige grosse Rammgerät mit einem 15-t- bis 20-t-Bär vorhanden ist, können solche Pfähle aus hohlen, vorgespannten Stahlbetonzylin dern hergestellt werden, wie ausländische Ausführungen zeigen. Meist wird aber zu grosskalibrigen Bohrpfählen ge griffen, wobei die Bohrlochwandungen entweder mit einem Stahlrohr verkleidet oder durch die Wirkung einer thixotropen Flüssigkeit im Bohrloch vor dem Einstürzen bewahrt werden. Im engeren Brückenbau wurde diese Gründungsart in grösserem Umfange nach dem Kriege meines Wissens durch die Entreprises Boussiron bei der Strassen- und Bahnbrücke in Abidjan zum ersten Male angewandt.

Wie hoch darf solch ein Pfahl belastet werden? Die strenge Beantwortung dieser wichtigen Frage ist heute noch nicht möglich, man wird, vorläufig wenigstens, mit den aus der Bodenmechanik bekannten Methoden rechnen müssen, wie sie kurz zusammengefasst in meinem oben zitierten Vortrag und auch in jenem vom Jahr 1962 dargestellt wurden. Dabei muss, wie damals schon, auf einen wichtigen und oft nicht beachteten Umstand hingewiesen werden, der durch die neuesten Untersuchungen von Prof. M. Kérisel (siehe «Annales de l'Institut Technique du Bâtiment et des Travaux Publics», 1962) voll bestätigt wird. Eingehende Versuche im Laboratorium und im Felde zeigen, dass der spe-

zifische Spitzewiderstand in einem nicht bindigen Boden mit zunehmender Grösse des Pfahlquerschnittes stark abnimmt. Auf Bild 14 ist der spezifische Spitzewiderstand in kg/cm^2 als Funktion des Ueberlagerungsdruckes in t/m^2 aufgetragen, und als Parameter sind die Durchmesser der Pfähle eingeführt. Daraus ist aber auch umgekehrt zu schliessen, dass aus den an kleinen Versuchsgeräten, wie sie unter den verschiedensten Namen gebraucht werden, gemessenen Spitzewiderständen keinesfalls auf den bei der Grossausführung auftretenden Widerstand geschlossen werden darf, es sei denn, es liege eine genügend grosse Zahl von Vergleichswerten, tatsächlich gemessenen, vor, die eine zutreffende Korrelation erlauben.

Die Pfahlprobobelastung bleibt, vorläufig wenigstens, die einzige zuverlässige Grundlage zur Bestimmung der Tragfähigkeit eines Einzelpfahles und muss deshalb trotz des erheblichen Kostenaufwandes bei jeder wichtigen Pfahlgründung verlangt werden. Pfeiler und Widerlager benötigen fast immer mehrere Pfähle. Es ist bekannt, dass die Tragfähigkeit einer Pfahlgruppe oder besser gesagt die Sicherheit gegen zu grosse Setzungen meist kleiner ist als die Summe der Tragfähigkeiten der Einzelpfähle. Minimale Pfahlabstände vom dreifachen Pfahldurchmesser sind zu fordern und trotzdem ist mit einer Abminderung zu rechnen, für deren Abschätzung heute noch keine zuverlässigen Unterlagen vorliegen. Die Abminderung wird kleiner mit zunehmendem Pfahlabstand, sie ist ebenfalls kleiner in nicht bindigen als in bindigen Böden.

Als Beispiel für eine Gründung mit 1,50 bzw. 1,35 m im Durchmesser betragenden Bohrpfählen mit einer maximalen Länge von 57 m (Gewicht 110 t) im Sand und einer Belastung von rund 750 \div 800 t pro Pfahl soll als Abschluss meiner Ausführungen die Brücke über den See von Maracaibo gezeigt werden, die letztes Jahr dem Verkehr übergeben wurde. Eine Beschreibung der Brücke wurde durch Ing. H. Hofacker in der SBZ 1960, H. 42, S. 670, gegeben. Die Bilder 15 und 16 sind der sehr schönen Publikation «Die Brücke über den Maracaibo-See in Venezuela» entnommen, welche das ausführende Baukonsortium (unter der Federführung der Julius Berger AG., Wiesbaden) veröffentlicht hat.

DK 625.712.35:628.83

Untersuchungen an einem Abluftsystem

Ein Beitrag zur Aerodynamik der Tunnellüftung

Von Jacques Kempf, dipl. Masch.-Ing. ETH, Elektro-Watt, Zürich¹⁾

Einleitung

Der vorliegende Beitrag umfasst eine theoretische und experimentelle Untersuchung des Abluftsystems eines Autotunnels. Insbesondere wurde die strömungstechnische und konstruktive Ausführung der Absaugöffnungen bei einem Abluftkanal von konstantem Querschnitt und deren Einfluss auf die Druckverteilung im Kanal näher untersucht.

Durch die Absaugöffnungen, deren gegenseitiger Abstand l_a konstant ist, wird die verunreinigte Luft aus dem Verkehrsraum in den Abluftkanal übergeführt. Dabei werden alle Öffnungen mit den gleichen Dimensionen hergestellt und mit einer Drosselinrichtung versehen, die so einzustellen ist, dass über die ganze Lüftungsstrecke jede Öffnung eine gleich grosse Luftmenge q_a absaugt. Es sind zwei Drosselinrichtungen im Modell experimentell untersucht worden, nämlich eine erste nach Bild 3, wobei der Abluftstrahl unter einem Einströmwinkel $\alpha = 45^\circ$ in den Kanal eingeleitet wird, und eine zweite nach Bild 4, bei der die Drosselung durch eine Haube mit verstellbarem Deckel zustandekommt und der Einströmwinkel α gleich null ist.

Die analytische Auswertung der Ergebnisse wird zeigen, dass für den gleichen Eintrittsquerschnitt f_a der Absaugöffnung die Drosselung mit Haube sich günstiger auswirkt, sowohl auf die Drosselverluste als auch auf den Druckverlauf im Abluftkanal.

In Anlehnung an den Expertenbericht [1] und die Arbeit von A. Haerter [2] wird der Druckverlauf für einen langen Abluftkanal mit vielen Absaugöffnungen, welche mit einer der beiden Drosselinrichtungen versehen sind, neu untersucht. Aus einer theoretischen und experimentellen Untersuchung des Druckumsetzungskoeffizienten k_a geht hervor, dass die Differentialgleichung für den Druckverlauf im Abluftkanal nach Expertenbericht [1] weiterhin anwendbar ist. Schliesslich werden für die beiden Ausführungsvarianten der Absaugöffnungen die notwendigen Berechnungsgrundlagen für die Einstellung der Drosselquerschnitte f_a^*/f_a längs der Lüftungsstrecke geschaffen.

Bezeichnungen

Strömungsgrössen:

| | | |
|--------|------------------------|---|
| ρ | Luftdichte | $\text{kg} \cdot \text{s}^2/\text{m}^4$ |
| ν | kinematische Zähigkeit | m^2/s |

Abluftkanal:

| | | |
|-------|---|--------------|
| F_a | Querschnitt des Abluftkanals | m^2 |
| L_a | Länge des Abluftkanals | m |
| x | laufende Koordinate | m |
| ξ | dimensionslose Koordinate $\xi = x/L_a$ | |

¹⁾ Die vorliegenden Untersuchungen wurden vom Verfasser am Institut für Aerodynamik der ETH durchgeführt.

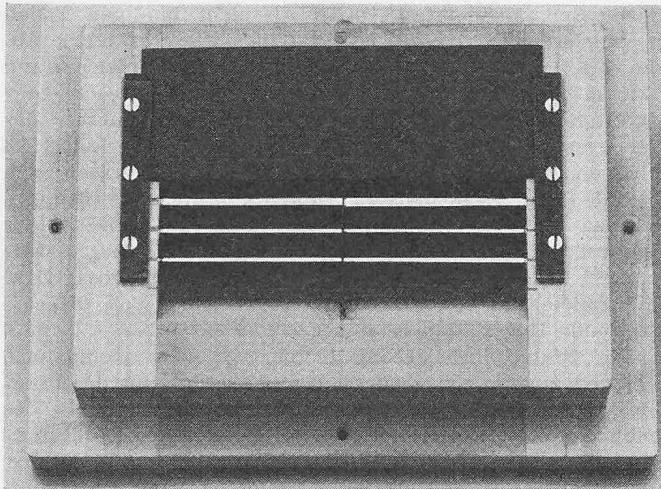


Bild 1. Modell der Absaugöffnung mit Leitblechen und verstellbarem Drosselschieber

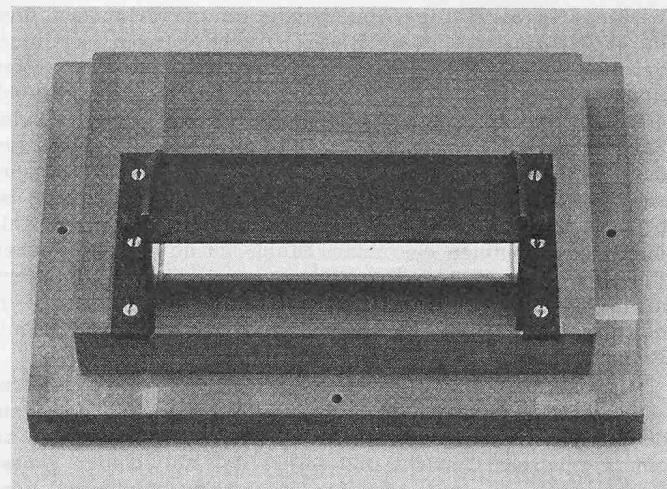


Bild 2. Modell der Absaugöffnung mit Haube, bestehend aus verstellbarem Deckel und festen Seitenblechen

| | | |
|--------------|---|-----------------------|
| Q_{a0} | totale Abluftmenge für den Lüftungsabschnitt | m^3/s |
| u_a | Längsgeschwindigkeit im Abluftkanal | m/s |
| u_{a0} | Geschwindigkeit am Kanaleintritt | m/s |
| Δp_a | Unterdruck im Abluftkanal gegenüber dem Verkehrsraum | kg/m^2 |
| π_a | dimensionsloser Unterdruck ($\pi_a = \Delta p_a / \frac{1}{2} \rho \cdot u_{a0}^2$) | |
| k_a | Druckumsetzungskoeffizient | |
| λ | effektiver Reibungskoeffizient im Abluftkanal | |
| λ_w | Reibungskoeffizient für die Wandreibung | |

Absaugöffnung:

| | | |
|---------|--|-----------------------|
| f_a | konstanter Eintrittsquerschnitt | m^2 |
| f_a^* | gedrosselter Austrittsquerschnitt | m^2 |
| l_a | Abstand der Absaugöffnung längs des Abluftkanals | m |
| q_a | Absaugmenge pro Öffnung | m^3/s |
| v_a | mittlere Eintrittsgeschwindigkeit in die Öffnung $v_a = q_a / f_a$ | m/s |
| v'_a | Mittlere Austrittsgeschwindigkeit im Strahl | m/s |

α Einströmwinkel, bezogen auf die Richtung der Kanalströmung Grad

ξ_D Drosselkoeffizient

ξ_a Eintrittsverlust (nähere Bezeichnung unter Ziff. III. 2.)

ξ_H Widerstandsbeiwert einer Haube im Abluftkanal

Verkehrsraum:

| | | |
|-------|--------------------------------------|-----------------|
| p_v | Statischer Druck im Verkehrsraum | kg/m^2 |
| u_v | Längsgeschwindigkeit im Verkehrsraum | m/s |

I. Ausführungsvarianten der Absaugöffnungen

Um die Forderung einer konstanten Abzweigmenge q_a längs des Abluftkanals mit variabilem Druck p_a zu erfüllen, muss an den Absaugöffnungen gedrosselt werden. Ferner ist ein Druckrückgewinn anzustreben, indem die Luft unter einem Winkel α zur Strömungsrichtung in den Abluftkanal eingeleitet und so der Impuls der einströmenden Abluftmenge q_a ausgenützt wird; dafür sollte die Geschwindig-

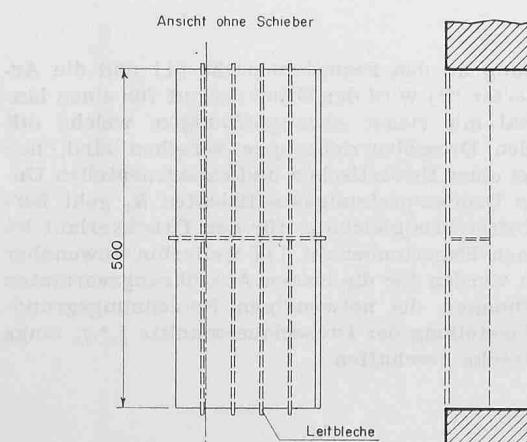
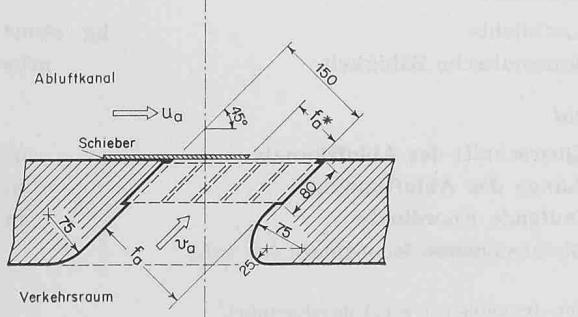


Bild 3 (links). Absaugöffnung mit Leitblechen und verstellbarem Drosselschieber



Bei beiden Modellen sind die senkrecht zur Kanalaxe verlaufenden Eintrittskanten abgerundet (in den Bildern 3 und 4 ganz unten), während die parallel zur Kanalaxe verlaufenden Eintrittskanten teils scharf, teils abgerundet waren (in den Bildern 3 und 4 oben rechts)

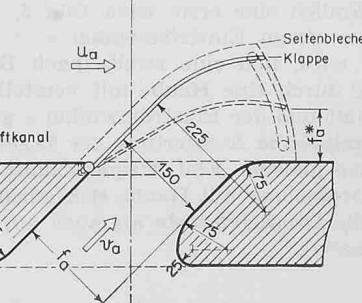
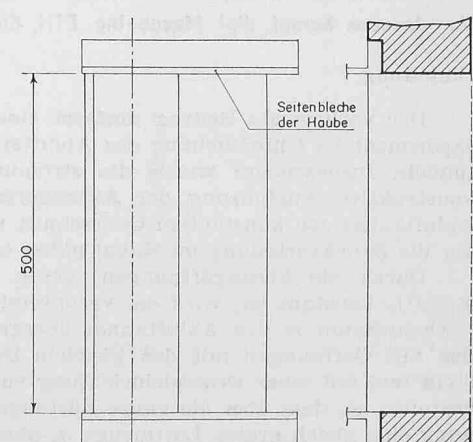


Bild 4 (rechts). Absaugöffnung mit Haube, bestehend aus verstellbarem Deckel und festen Seitenblechen.

keit v'_a eine möglichst grosse Horizontalkomponente in Strömungsrichtung aufweisen. Dementsprechend wurden zwei Ausführungsvarianten der Öffnungen, die sich durch ihre Drosselinrichtung unterscheiden, theoretisch und experimentell untersucht.

Prinzipiell wird für die beiden Varianten die Drosselung durch eine Querschnittsverengung bewirkt, wobei sich der grösste Teil des statischen Unterdruckes Δp_a in dynamischen Druck umsetzt; der eintretende Luftstrahl bleibt kompakt, und je nach dem Druck Δp_a sowie dem gedrosselten Querschnitt f_a^* können sich verhältnismässig hohe Strahlgeschwindigkeiten v'_a ergeben.

1. Absaugöffnung mit verstellbarem Schieber und Leitblechen; Einströmwinkel $\alpha = 45^\circ$

Die konstruktive Ausbildung dieser Drosselinrichtung sowie die Geometrie der Öffnung sind aus den Bildern 1 und 3 zu ersehen. Die Leitbleche sollen dazu beitragen, dass die Einströmrichtung $\alpha = 45^\circ$ für alle Schieberstellungen so weit als möglich eingehalten wird. Massgebend für den Impuls in Strömungsrichtung x ist nur die Komponente $v'_{ax} = v'_a \cdot \cos \alpha$

2. Absaugöffnung mit Haube, bestehend aus verstellbarem Deckel und festen Seitenblechen

Die Konstruktion ist auf den Bildern 2 und 4 dargestellt; dabei sind der Eintrittsquerschnitt f_a sowie die Geometrie der Öffnung gleich wie für die Absaugöffnung mit verstellbarem Schieber. Nur wird hier die Querschnittsversperrung von f_a auf f_a^* durch einen verstellbaren Deckel bewirkt, welcher gleichzeitig den Luftstrahl in Strömungsrichtung umlenkt. Für den Impuls in Strömungsrichtung ist die volle Geschwindigkeit $v'_a = v'_{ax}$ wirksam, was eine maximale Ausnützung des Impulses der einströmenden Abluftmenge q_a bedeutet.

Im Gegensatz zur Absaugöffnung mit Schieber kann hier eine beschränkte Diffusorwirkung durch Querschnittsverengung erzielt werden ($f_a^* > f_a$). Im Vergleich zur Deckelstellung $f_a^* = f_a$ kann für $f_a^* > f_a$ die gleiche Menge q_a mit einem kleineren Unterdruck Δp_a abgesaugt werden. Dies ist besonders von Vorteil für die zweite Hälfte des Abluftkanals, wo der Unterdruck Δp_a in bezug auf den Verkehrsraum klein ist.

Die Dimensionierung des Eintrittsquerschnittes f_a erfolgt für den geringsten Unterdruck Δp_a im Abluftkanal. An und für sich wäre es möglich, f_a so zu bemessen, dass hier keine Drosselung stattfindet. Da jedoch eine Abweichung der wirklichen Verhältnisse von den Berechnungen nicht auszuschliessen ist, muss die Dimensionierung der Absaugöffnungen, selbst für $f_a^* = f_a$, mit genügender Reserve durchgeführt werden. Es könnte nämlich vorkommen, dass für $f_a^* = f_a$ der Unterdruck im Kanal nicht mehr ausreicht, um die erforderliche Abluftmenge q_a aus dem Verkehrsraum abzusaugen und sich eine unregelmässige Verteilung der Menge q_a längs des Abluftkanals ergibt. Für Absaugöffnungen mit Haube und verstellbarem Deckel können solche Abweichungen bis zu einem gewissen Mass durch die Diffusorwirkung korrigiert werden.

II. Versuchsanlage und Messprogramm

Alle Modellversuche wurden für eine einzelne Absaugöffnung durchgeführt. Die Versuchsanlage ist in Bild 5 zu sehen. Die zwei Absaugöffnungen sind im Maßstab 1:5 ausgeführt worden. Der Abluftkanal ist als Holzkanal von quadratischem Querschnitt ($20 \times 20 \text{ cm}^2$) nachgebildet. Der statische Druckverlauf kann längs dieses Kanals gemessen werden. Die Luftmengen $Q_a + q_a$ sowie q_a werden durch eine

Messdüse bzw. Messblende bestimmt. Das Mengenverhältnis Q_a/q_a liess sich am Eintritt des Kanals durch ein Drosselbrett verändern.

Es wurden folgende Messungen vorgenommen:

1. Bestimmung des Druckumsetzungskoeffizienten k_a durch Modellversuch an einer einzelnen Absaugöffnung und Vergleich mit dem Koeffizienten k_a nach Impulssatz für einen langen Abluftkanal mit vielen Öffnungen.
2. Bestimmung der Eintrittsverluste ζ_a und des Widerstandswertes ζ_H der Haube.
3. Bestimmung der Drosselcharakteristik für die beiden Varianten; mit ihr kann für einen gegebenen Druckverlauf Δp_a im Abluftkanal die Drosselstellung f_a^*/f_a bestimmt werden.

III. Theoretische Grundlagen

In diesem Abschnitt werden die Gleichungen für die Auswertung der experimentellen Ergebnisse sowie für die Berechnung des Druckverlaufs im Abluftkanal und der Drosselstellung der Absaugöffnungen aufgestellt.

1. Druckumsetzungskoeffizient k_a

Für die Auswertung der Versuche verwendete Haerter [2] folgende Definitionsgleichung:

$$(1) \quad k_a = \frac{-dp_a/dx + \lambda/D_a \cdot \varrho/2 \cdot u_a^2}{\varrho u_a \cdot du_a/dx}$$

wobei hier x entgegengesetzt zur Strömungsrichtung angenommen wird. Er zeigte, dass die Messresultate in guter Übereinstimmung sind mit den k_a -Werten nach dem Impulssatz:

$$(2) \quad k_a = 2 - \frac{v'_a \cdot \cos \alpha}{u_a}$$

wo v'_a die mittlere Impulstromgeschwindigkeit (mittlere Austrittsgeschwindigkeit im Strahl) darstellt. Diese Gleichungen sind für relativ zum Durchmesser lange Kanäle mit vielen Absaugöffnungen gültig und setzen eine stetige Aenderung von Druck und Geschwindigkeit im Abluftkanal voraus. In seinen experimentellen Untersuchungen versuchte Haerter, sich soweit als möglich diesen Voraussetzungen zu nähern; insbesondere untersuchte er gleichzeitig mehrere Absaugöffnungen, womit auch der gegenseitige Einfluss der Öffnungen berücksichtigt war.

Für die vorliegenden Versuche mit den zwei Varianten der Absaugöffnungen müssen die Gleichungen zur Auswertung der Versuchsergebnisse neu aufgestellt werden, umso mehr, als die Versuche, im Gegensatz zu Haerter, an einer einzelnen Absaugöffnung stattfanden. Weiter ist es nötig, für die Druckverteilung im Abluftkanal den Druckumsetzungskoeffizienten k_a neu zu bestimmen und mit dem k_a -Wert nach Gl. (2) zu vergleichen. Das Problem wird eindimensional betrachtet und die laufende Koordinate x in Richtung der Kanalströmung als unabhängige Variable eingetragen.

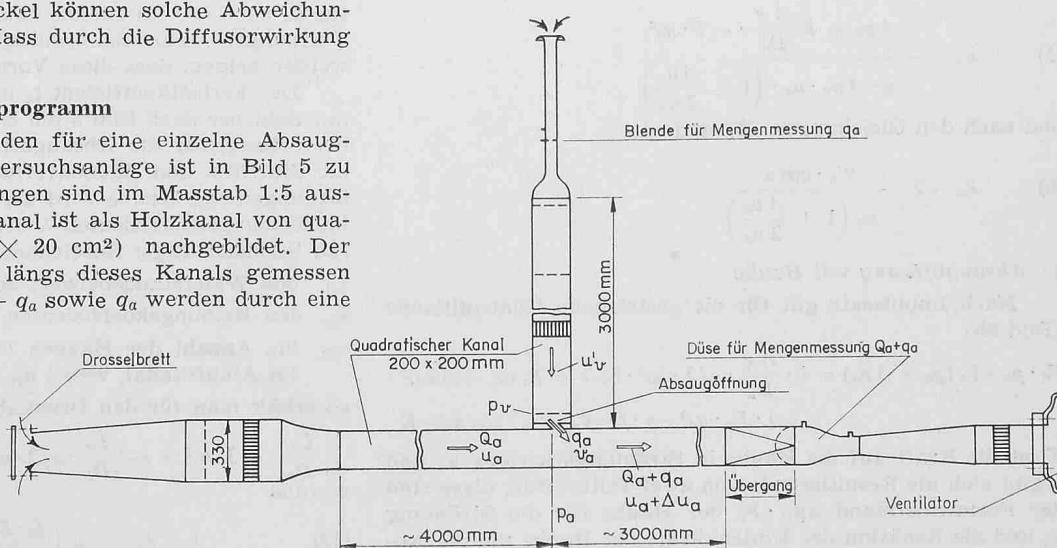


Bild 5. Skizze der Versuchsanlage

3. Drosselkoeffizient ζ_D der Absaugöffnungen

Für eine gegebene Abluftstrecke mit bekannter Druckverteilung $\Delta p_a = f(x)$ und konstanter Absaugmenge q_a längs des Kanals soll die Drosselstellung f_a^*/f_a des Schiebers bzw. des Haubendeckels rechnerisch bestimmt werden. Der Unterdruck Δp_a im Abluftkanal gegenüber dem Verkehrsraum, der für die Absaugung der Menge q_a zur Verfügung steht, teilt sich auf in den dynamischen Druck $\rho/2 \cdot v'^2_a$, den Druckverlust $\zeta_a \cdot \rho/2 \cdot v'^2_a$ (wo ζ_a die Eintrittsverluste sowie Gitter- und Schieberverluste bzw. Umlenkverluste durch die Haube umfasst) und den teilweisen Druckrückgewinn $\zeta_v \cdot \rho/2 \cdot u_v^2$, falls eine mittlere Längsgeschwindigkeit u_v im Verkehrsraum besteht. Man erhält somit

$$p_v - p_a = \rho/2 \cdot v'^2_a + \zeta_a \cdot \rho/2 \cdot v'^2_a - \zeta_v \cdot \rho/2 \cdot u_v^2 = \rho/2 \cdot v'^2_a \cdot (1 + \zeta_a) - \zeta_v \cdot \rho/2 \cdot u_v^2$$

Da die Absaugmenge q_a gegeben ist, ist es vorteilhaft, als Bezugsgeschwindigkeit die mittlere Mengengeschwindigkeit $v_a = q_a/f_a = \text{konst.}$ einzuführen.

Nach der Kontinuitätsgleichung ist

$$v' = v_a \cdot f_a / f'_a$$

Daraus

$$p_v - p_a = \Delta p_{va} = \rho/2 \cdot v_a^2 (f_a/f'_a)^2 \cdot (1 + \zeta_a) - \zeta_v \cdot \rho/2 \cdot u_v^2$$

Führt man den Drosselkoeffizienten

$$\zeta_D = (f_a/f'_a)^2 (1 + \zeta_a)$$

ein, so wird

$$p_v - p_a = \Delta p_{va} = \zeta_D \cdot \rho/2 \cdot v_a^2 - \zeta_v \cdot \rho/2 \cdot u_v^2$$

und hieraus

$$(13) \quad \zeta_D = \frac{\Delta p_{va}}{\rho/2 \cdot v_a^2} + \zeta_v \cdot \left(\frac{u_v}{v_a} \right)^2$$

Für einen Verkehrsraum mit ruhender Luft ergibt sich:

$$(14) \quad \zeta_D = \frac{\Delta p_{va}}{\rho/2 \cdot v_a^2}$$

Unter der Voraussetzung einer konstanten Absaugmenge q_a entspricht jedem Unterdruck $\Delta p_a = -\Delta p_{va}$ im Kanal ein ganz bestimmter Wert für ζ_D , d. h. eine Drosselstellung f_a^*/f_a ; für eine gegebene Abluftstrecke ($F_a, f_a, L_a, l_a, Q_{a0}, q_a, p_a$) ist der Drosselkoeffizient ζ_D eine Funktion der Koordinate x oder auch der örtlichen Längsgeschwindigkeit $u_a = f(x)$. Für die Berechnungen ist es vorteilhaft, die Gleichungen dimensionslos zu schreiben. So ergibt sich für Gl. (13) und (14):

$$\zeta_D \cdot \frac{\rho/2 \cdot v_a^2}{\rho/2 \cdot u_a^2} = \frac{\Delta p_{va}}{\rho/2 \cdot u_a^2} + \zeta_v \left(\frac{u_v}{u_{a0}} \right)^2$$

Am Anfang wurden folgende Bezeichnungen eingeführt:

$$\frac{\Delta p_{va}}{\rho/2 \cdot u_a^2} = -\pi_a, \quad v_a = \frac{q_a}{f_a} \quad \text{mit} \quad q_a = \frac{Q_{a0}}{L_a/l_a}, \quad u_{a0} = \frac{Q_{a0}}{F_a}$$

Damit erhält man

$$(13') \quad \zeta_D = \left[-\pi_a + \zeta_v \left(\frac{u_v}{u_{a0}} \right)^2 \right] \cdot \left(\frac{L_a \cdot f_a}{F_a \cdot l_a} \right)^2$$

oder, mit $u_v \approx 0$

$$(14') \quad \zeta_D = -\pi_a \left(\frac{L_a \cdot f_a}{F_a \cdot l_a} \right)^2$$

Dabei ist

$$\zeta_D = f(u_a/v_a) = f(\xi)$$

Es wäre noch das Verhältnis u_a/v_a zu bestimmen.

Mit $u_a = u_{a0} \cdot (1 - \xi)$, wird

$$(15) \quad \left(\frac{u}{v} \right)_a = \left(\frac{L_a \cdot f_a}{F_a \cdot l_a} \right) \cdot (1 - \xi)$$

IV. Die Versuchsergebnisse

Die Modellversuche wurden für die beiden Varianten der Absaugöffnungen nach den Bildern 3 und 4 durchgeführt.

1. Druckumsetzungskoeffizient k_a

Die experimentellen Werte von k_a sind nach den Gl. (5) und (9) bestimmt und in Bild 7 in Funktion von $v'_a \cos \alpha / u_a$ dargestellt worden. Ein Vergleich dieser Werte mit dem theo-

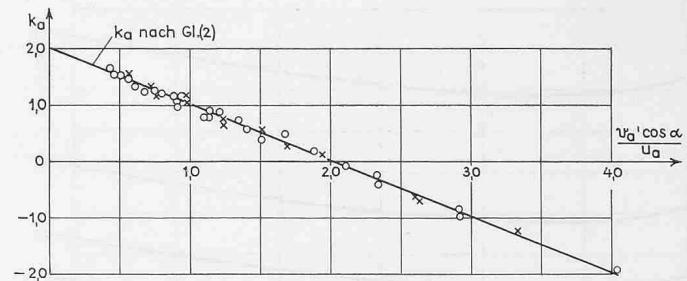


Bild 7. Vergleich der experimentell bestimmten Druckumsetzungskoeffizienten k_a mit den berechneten Werten nach Impulssatz; (O) nach Gl. (5) für eine Absaugöffnung mit Drosselschieber und $\alpha = 45^\circ$, (X) nach Gl. (9) für eine Absaugöffnung mit Haube ($\alpha = 0^\circ$)

retischen Verlauf von k_a nach Gl. (2) zeigt eine gute Übereinstimmung der Messpunkte mit dem Impulssatz. Dies geht ebenfalls aus den Gl. (6) und (10) hervor, wo bei den Messungen $\Delta u_a/u_a \leq 10\%$ war.

Aufgrund dieser Ergebnisse darf für eine Ausführung der Absaugöffnungen mit Drosselvorrichtung nach den Bildern 3 und 4, der theoretische Ansatz für k_a nach Gl. (2) weiterhin als gültig betrachtet werden, so dass der Druckverlauf $\pi_a = f(\xi)$ im Abluftkanal nach Gl. (11) berechnet werden kann.

2. Verlustkoeffizient ζ_a und Widerstandsbeiwert ζ_H der Haube

Für den Verlustkoeffizienten ζ_a in Gl. (11) ergab sich als guter Mittelwert bei verschiedenen Drosselstellungen für die Absaugöffnung mit Leitblechen und Schieber $\zeta_a = 0,20$, für die mit Haube $\zeta_a = 0,17$.

Der Widerstandsbeiwert ζ_H der Haube wurde anhand einer Impulsmessung für verschiedene Drosselstellungen bestimmt und ergab sich als praktisch konstant; er kann mit guter Annäherung nach folgender Gleichung berechnet werden:

$$(16) \quad \zeta_H = 0,342 \left(\frac{F_a}{F_a - f_a} \right)^2 = \frac{0,342}{(1 - f_a/F_a)^2}$$

Diese Gleichung drückt aus, dass der Widerstand der Haube um das Verhältnis der Staudrücke der Anströmgeschwindigkeit u_a zur Geschwindigkeit im engsten Querschnitt ansteigt.

3. Drosselkoeffizient ζ_D

Der Drosselkoeffizient ζ_D wurde anhand der Gl. (13) experimentell bestimmt. Die Messergebnisse sind in den Bildern 8 und 9 dargestellt. Die beiden Drosselcharakteristiken geben den Koeffizienten ζ_D in Funktion von $(u/v)_a$ mit der Drosselstellung f_a^*/f_a als Parameter. Sie wurden zudem für scharfe und abgerundete Eintrittskanten parallel zur Kanalaxe bestimmt. (Dagegen sind die Eintrittskanten senkrecht zur Kanalaxe stets abgerundet, wie aus den Bildern 3 und 4 unten ersichtlich). Da sich kein Unterschied feststellen liess, kann auf eine solche Abrundung verzichtet werden. Wie erwartet steigt ζ_D an mit abnehmendem Wert f_a^*/f_a , d. h. ein höherer Unterdruck Δp_a erfordert eine grössere Querschnittsversperrung bzw. ein grösseres ζ_D . Der Einfluss der Längsgeschwindigkeit u_a auf den Koeffizienten ζ_D bei $f_a^*/f_a = \text{konstant}$ geht deutlich aus dem Verlauf von $\zeta_D = f(u/v)_a$ hervor.

Für die Öffnung mit Haube, bei welcher die Absaugmenge q_a parallel zur Kanalströmung einströmt ($\alpha = 0^\circ$), wird die Absaugung ständig von u_a begünstigt, was durch den stetigen Abfall von ζ_D mit zunehmendem Wert $(u/v)_a$ zum Ausdruck kommt. Dies bedeutet für $f_a^*/f_a = \text{konstant}$, dass der zur Förderung der Menge q_a erforderliche Unterdruck Δp_a mit steigendem Verhältnis $(u/v)_a$ abnimmt.

Dieser Vorgang ist einerseits dem Einfluss der Zähigkeitskräfte beim Zusammentreffen der beiden parallelen Strömungen, der Kanalströmung u_a und der der mit v'_a einströmenden Luft zuzuschreiben. Mit steigendem Verhältnis $(u/v)_a$ nehmen die Zähigkeitskräfte an der Trennungsfläche beider Strömungen, die eine «bremsende» Wirkung auf den Strahl v'_a ausüben ab ($u_a \leq v'_a$). Unter Umständen kann

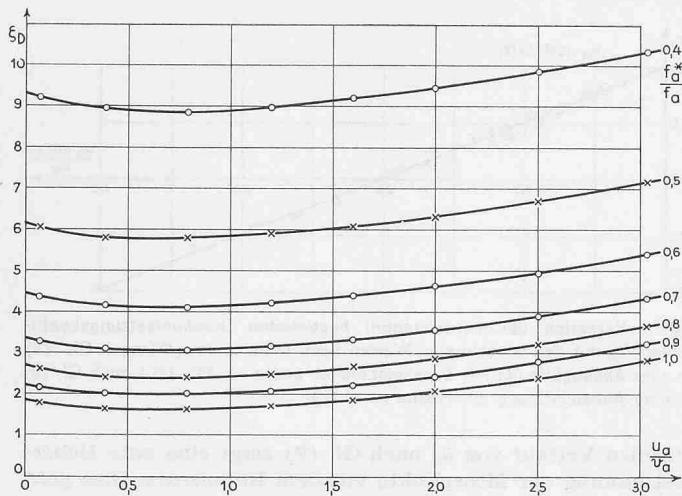


Bild 8. Drosselkoeffizient ξ_D für eine Absaugöffnung mit Drosselschieber und Leitblechen. Messergebnisse für scharfe (O) sowie für abgerundete und scharfe (X) Einfüllkanten parallel zur Kanalaxe

sogar eine Schleppwirkung der Kanalströmung auf den Strahl v'_a auftreten, wenn $\mu_a > v'_a$ ist. Außerdem hat die Verdrängungswirkung der Haube am Austrittsquerschnitt f_a^* einen lokalen Unterdruck zur Folge, der ebenfalls die Absaugung unterstützt.

Für die Öffnung mit Leitblechen und Schieber, bei welcher die Menge q_a unter einem Winkel $\alpha = 45^\circ$ in den Abluftkanal einströmt, hat der Verlauf $\xi_D = f(u/v)_a$ für $f_a^*/f_a = \text{konst.}$, ein Minimum. Hier überlagert sich dem oben erwähnten Zähigkeitseinfluss die Stauwirkung der Kanalströmung auf die einströmende Menge q_a , indem sie ähnlich zur Haube eine natürliche Drosselung ausübt. Wo diese Stauwirkung überwiegt, steigt ξ_D an, und das bedeutet für $f_a^*/f_a = \text{konst.}$, dass der zur Förderung der Menge q_a erforderliche Unterdruck Δp_a mit steigendem $(u/v)_a$ zunimmt.

Schliesslich zeigt ein Vergleich der beiden Drosselcharakteristiken, dass für gleiches f_a^*/f_a der Koeffizient ξ_D für eine Absaugöffnung mit Haube kleiner ist als für eine Absaugöffnung mit Schieber. Für den gleichen Einfüllquerschnitt f_a der beiden Varianten weist somit die Absaugöffnung mit Haube eine grössere Reserve auf.

V. Rechenvorgang für das Abluftsystem

1. Problemstellung

Es wird ein relativ zum Durchmesser langer Abluftkanal mit konstantem Querschnitt und vielen Absaugöffnungen vorausgesetzt. Um die Forderung einer konstanten Absaugmenge q_a längs des Kanals mit variablem Druck zu erfüllen, ist für die Absaugöffnungen eine der beiden Drosselvorrichtungen gemäss den Bildern 3 oder 4 vorgesehen. Gegeben sind: ρ , v ; Q_{a0} , q_a , F_a , L_a , D_a , f_a , l_a . Gesucht ist der Druckverlauf π_a im Kanal sowie die Drosselstellung f_a^*/f_a in Funktion der Koordinate $\xi = x/L_a$.

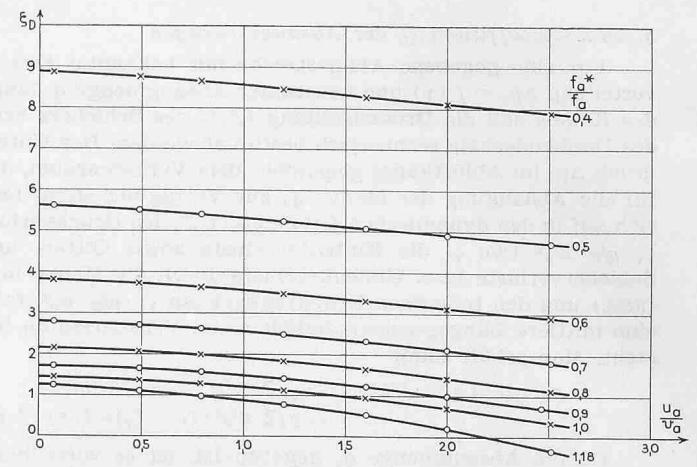


Bild 9. Drosselkoeffizient ξ_D für eine Absaugöffnung mit Haube. Messergebnisse für scharfe (O) sowie für abgerundete und scharfe (X) Einfüllkanten parallel zur Kanalaxe. Die Messpunkte fallen für beide Ausführungsarten zusammen

2. Druckverlauf im Abluftkanal und Drosselstellung f_a^*/f_a

Der Druckverlauf $\pi_a = f(\xi)$ berechnet sich nach Gl. (11). Der Enddruck π_{a1} wird nach den Grundlagen des Expertenberichtes [1] bestimmt. Weiter gilt für Absaugöffnungen

mit Schieber $\alpha = 45^\circ$; $\xi_a = 0,20$; $\lambda = \lambda_w$,
mit Haube $\alpha = 0^\circ$; $\xi_a = 0,17$; λ nach Gl. (12) u. (16).

Der Drosselkoeffizient ξ_D wird nach Gl. (14') für $u/v/v_a = 0$ rechnerisch bestimmt und dem experimentellen Wert in Bild 8 bzw. 9 gleichgestellt: Für jeden Wert ξ und das Verhältnis $(u/v)_a$ nach Gl. (15) ergibt sich aus Bild 8 bzw. 9 die Drosselstellung $f_a^*/f_a = f(\xi)$.

3. Anwendungsbeispiel

| | |
|---------------------------|--|
| $F_a = 10,79 \text{ m}^2$ | $\rho = 0,1 \text{ kg s}^{-2} \text{ m}^{-1}$ |
| $L_a = 1146 \text{ m}$ | $v = 17,8 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ |
| $D_a = 2,37 \text{ m}$ | $Q_{a0} = 153,62 \text{ m}^3/\text{s}$ |
| $f_a = 0,075 \text{ m}^2$ | $u_{a0} = 14,24 \text{ m/s}$ |
| $l_a = 5,0 \text{ m}$ | $\rho/2 \cdot u_{a0}^2 = 10,14 \text{ kg/m}^2$ |
| $\lambda_w = 0,019$ | $\pi_{a1}(\xi = 1) = -2,3$ |

Absaugöffnungen mit Schieber

$$\begin{aligned} d\pi_a/d\xi &= -1,29 \cdot \sqrt{-\pi_a} + 9,19 \cdot \xi^2 - 22,38 \cdot \xi + 13,19 \\ \xi_D &= -2,54 \cdot \pi_a \\ (u/v)_a &= 1,594 \cdot (1 - \xi) \\ f_a^*/f_a &\text{ aus Bild 8} \end{aligned}$$

Absaugöffnungen mit Haube

$$\begin{aligned} d\pi_a/d\xi &= -1,85 \cdot \sqrt{-\pi_a} + 9,68 \cdot \xi^2 - 23,36 \cdot \xi + 13,68 \\ \xi_D &= -2,54 \cdot \pi_a \\ (u/v)_a &= 1,594 \cdot (1 - \xi) \\ f_a^*/f_a &\text{ aus Bild 9} \end{aligned}$$

Die Ergebnisse sind in Tabelle 1 zusammengestellt und in Bild 10 aufgetragen. Ein Vergleich der beiden Varianten zeigt, dass die Absaugöffnungen mit Haube einen Gewinn von $6,1 \text{ kg/m}^2$ auf den Förderdruck bei Vollast bringen.

Tabelle 1

| ξ | $(u/v)_a$ | π_a | für Drosselschieber | | für Haube | |
|-------|-----------|---------|---------------------|-------------|-----------|---------|
| | | | ξ_D | f_a^*/f_a | π_a | ξ_D |
| 0 | 1,594 | -5,30 | 13,46 | 0,320 | -4,70 | 11,94 |
| 0,2 | 1,275 | -3,60 | 9,14 | 0,395 | -3,12 | 7,92 |
| 0,4 | 0,956 | -2,58 | 6,55 | 0,470 | -2,18 | 5,54 |
| 0,6 | 0,638 | -2,10 | 5,33 | 0,520 | -1,80 | 4,57 |
| 0,8 | 0,319 | -2,05 | 5,20 | 0,530 | -1,87 | 4,75 |
| 1,0 | 0 | -2,30 | 5,84 | 0,515 | -2,30 | 5,84 |

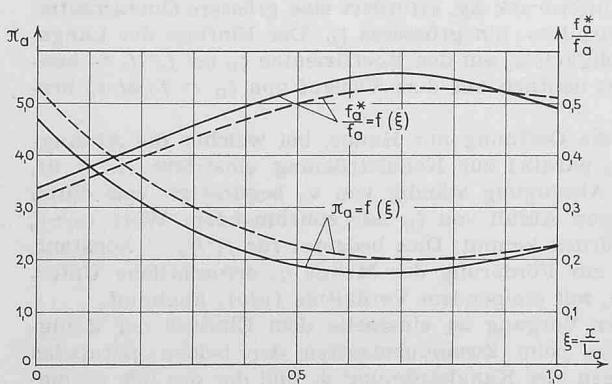


Bild 10. Dimensionsloser Druckverlauf π_a im Abluftkanal und Drosselstellung f_a^*/f_a für Absaugöffnungen mit verstellbarem Schieber (gestrichelt) bzw. Haube mit verstellbarem Deckel (ausgezogen) beim berechneten Beispiel

VI. Schlussfolgerung

Um die Forderung einer konstanten Absaugmenge q_a längs des Abluftkanals zu erfüllen, wird jede Absaugöffnung mit einer Drosselinrichtung versehen, wobei es vorteilhaft ist, die Drosselung kontinuierlich verstetzen zu können. Man wird den Impuls der einströmenden Abluftmenge q_a soweit als möglich ausnützen, um den Förderdruck, der für den betreffenden Lüftungsabschnitt nötig ist, zu verringern. Diese Bedingungen werden gut erfüllt mit einer Drosselinrichtung der untersuchten Art, wobei die Absaugöffnung mit Haube und verstellbarem Deckel den grössten Druckrückgewinn, somit also die grösste Drosselreserve bringt und zudem eine leichte Diffusorwirkung ermöglicht.

Bei der Dimensionierung der Absaugöffnungen ist darauf zu achten, dass der Öffnungsquerschnitt f_a , welcher längs der Lüftungsstrecke konstant ist, genügend gross bemessen wird, um einem allfälligen höheren Druckabfall vorbeugen zu können.

Probleme des Wohnungsbau

Hierzu veranstaltete am 10.2.64 die *Zürcher Studiengesellschaft für Bau- und Verkehrsfragen* (ZBV) eine Diskussion am Runden Tisch, verbunden mit einer freien Aussprache innerhalb einer gut besuchten Versammlung im Zürcher Kongresshaus. Am «Runden Tisch» sassen *Hans B. Barbe*, dipl. Ing., Präsident der ZBV, als Gesprächsleiter, *H. Litz*, dipl. Arch., Geschäftsführer der Stadtplanungskommission als Fragesteller und als Antwortende Stadtbaumeister *A. Wasserfallen*, Zürich, *G. Sidler*, Chef des Stadtplanungsamtes Zürich sowie *Dr. H. Letsch*, Chef der kantonalen Finanzkontrolle, Aarau.

Die gestellten Fragen und die damit verbundenen Gespräche kreisten, im ganzen gesehen, um drei Hauptprobleme, die man mit den Stichworten «Wohnungsknappheit», «Vorausplanung» und «Bauwirtschaft» bezeichnen könnte. Für den sich mit Problemen des Wohnungsbauens Befassenden waren das Rundgespräch und die Diskussion vor allem im Hinblick darauf von Interesse, dass verschiedene an sich bekannte Ueberlegungen und Tatsachen in einem weiteren Zusammenhang erschienen, wobei sich auch teils neue Aspekte ergaben. Im nachfolgenden Bericht wird versucht, die bei verschiedener Gelegenheit im Laufe der Diskussion geäusserten Antworten und Voten zusammenzufassen. Hierzu sei einschränkend bemerkt, dass unser Abriss manche Lücke aufweisen muss und ferner, dass einzelne Angaben so übernommen wurden, wie sie in der Diskussion — meist aus dem Handgelenk — erfolgt sind und nicht nachgeprüft werden konnten.

In einer städtischen Agglomeration, wie Zürich eine ist und wie sie am Diskussionsabend im Brennpunkt des Interesses stand, wird die grosse *Knappheit an Wohnvolumen* ausser durch die natürliche Bevölkerungsvermehrung noch durch Zuzug, die Citybildung und eine seit etwa 1950 sich teilweise auswirkende Unterbelegung von Wohnraum gesteigert. Innerhalb von rund 12 Jahren ist nämlich die Anzahl Einwohner pro Raum um etwa 5 % zurückgegangen, was einer Einbusse an potentiell verfügbarem Wohnraum für 20 bis 25 000 Einwohner entspricht. Dieser Umstand ist zum Teil darauf zurückzuführen, dass es dem bevölkerungsstrukturellen Ueberhang der Sechzig- und Mehrjährigen dank besserer sozialer Situierung und vor allem auch infolge der Mietpreiskontrolle möglich ist, verhältnismässig reichlichen Wohnraum zu beanspruchen. Anderseits wäre eine sofortige Aufhebung der Mietpreiskontrolle (als hypothetisch gestellte Frage) mit erheblichen individuellen Schwierigkeiten verbunden und nicht denkbar, so lange Alterssiedlungen in grössem Ausmaße fehlen. Eine Verschärfung der Nachfrage bewirken zudem die jetzt ins Erwerbsleben Tretenden, die den geburtenstarken Jahrgängen nach 1940 angehören. Ohnehin hat die Zunahme der Haushalte (20 %) im vergangenen Dezennium die Bevölkerungsvermehrung (15 %) prozentual überflügelt. Ein latentes Wohnungsmanko ergibt ferner der bauliche Aufstau, welcher sich im Zeitraum von

Literaturverzeichnis

- [1] *J. Ackeret, A. Haerter, M. Stahel*: Die Lüftung der Autotunnels, Bericht der Expertenkommission für Tunnellüftung an das Eidg. Amt für Strassen- und Flussbau. (Veröffentlicht als Mitteilung Nr. 10 aus dem Institut für Strassenbau an der ETH Zürich).
- [2] *A. Haerter*: Theoretische und experimentelle Untersuchungen über die Lüftungsanlage von Strassentunneln, Mitteilung Nr. 29 aus dem Institut für Aerodynamik, ETH Zürich.
- [3] *A. Heller, A. Schatzmann*: Die Lüftung des Bernhardin-Tunnels, SBZ 1963, H. 38, S. 661.
- [4] *J. Kempf*: Rechnerische und experimentelle Untersuchung des Frischluft-Sekundärkanals des Bernhardin-Tunnels, SBZ 1963, H. 38, S. 664.

Adresse des Verfassers: *J. Kempf*, dipl. Ing., bei Elektrowatt, Beethovenstrasse 48, Zürich.

DK 728.001

durchschnittlich fünf Jahren hält, gerechnet von der Erschliessung einer Bauparzelle bis zum Wohnungsbezug. Eine Beschleunigung des Bauablaufes wäre freilich an sehr komplexe Voraussetzungen gebunden.

Ein reger Meinungsaustausch ergab sich in der Beurteilung der Erscheinungen und Vorkehren, die mit der voraussichtlichen *Bevölkerungsverdopplung* innerhalb der nächsten 40 Jahre (2 bis 3 Generationen) verbunden sind. Für das Zentrum Zürich wäre mit einem Anwachsen der Bevölkerung von etwa 400 000 Seelen (auf rund 800 000 Personen im Jahre 1983) zu rechnen. Diese Voraussicht vermag allein schon deswegen zu beunruhigen, weil die Zahl der geraden Bauhandwerker rapid zurückgegangen ist und deren Nachwuchsquote heute ungefähr derjenigen der Bauzeichner gleichkommt. Dass hier ein Indiz für die vermehrte Einführung der Vorfabrikation besteht, wird man bei der Diskussion der vorgefertigten Bauweise — die ebenfalls in das Veranstaltungsprogramm der ZBV aufgenommen wurde — nicht übersehen.

Ueberschlagsweise ergibt sich hinsichtlich der für Zürich vorausberechneten Bevölkerungszunahme von 400 000 Einwohnern innerhalb vier Jahrzehnten ein zusätzlicher Bedarf von 3 bis 4000 Wohnungen pro Jahr, wobei zu bemerken ist, dass in Zürich ein noch grösseres Bauvolumen während einer Reihe von Jahren bereits bewältigt werden konnte samt den jährlich neu zu erstellenden vier Schulhäusern und anderen öffentlichen Bauten. In diesem Zusammenhang sei vermerkt, dass in Zürich während den letzten 4 bis 5 Jahren jeweils weniger als zehn Einfamilienhäuser gebaut, jedoch deren 20 bis 30 abgebrochen wurden. Zu einer Entlastung im Hochbausektor dürfte später auch der nachlassende Nationalstrassenbau führen. Die angestrebte Reduktion der Zahl der Fremdarbeiter sollte Anlass zu baulichen Vereinfachungen (z. B. Einheitstypen für Schulbauten) und wirksameren Rationalisierungen geben.

Sorge bereitete einzelnen Votanten auch die Frage der Siedlungsräume, die für eine derartige Bevölkerungsvermehrung vorzusehen sind. Werden Voralpenstädte die Lösung für die Region Zürich bilden? An sich erscheint es richtig, für Bauzwecke unproduktives Gelände zu beanspruchen (hier sei der Hinweis eines Votanten erwähnt, wonach unter Annahme einer Wohnbevölkerung von 20 Millionen mit 40 Einwohnern pro ha ein Landbedarf, in abstrakter Kreisform gedacht, mit einem Durchmesser von 80 km genügen würde). Noch sind im Voralpengebiet die Landpreise verhältnismässig niedrig. Die Frage ist aber, wie Neusiedlungen in den dafür geeigneten Gegenden unter voraussichtlichen Schwierigkeiten politischer Natur wirtschaftlich verwirklicht werden können. Ohnehin begegnet man den Landkäufen der Stadt Zürich ausserhalb ihrer Gemarkungen mit Skepsis. Die Landgemeinden befürchten einen unerwünschten Zuzug wenig steuerkräftiger Stadtbewohner. Indessen soll die Planung externer