Zeitschrift: Schweizerische Bauzeitung

Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine

Band: 81 (1963)

Heft: 38

Artikel: Rechnerische und experimentelle Untersuchung des Frischluft-Sekundärkanals des Bernhardin-Tunnels: ein Beitrag zur Aerodynamik der Tunnellüftung

Autor: Kempf, J.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-66876

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: 14.12.2025

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

Zuschläge von 5 % zur Luftmenge und von 10 % zu den gerechneten Druckverlusten ist somit eine ausreichende Leistungsreserve vorhanden. Den Polzahlen 6, 8, 12 und 16 entsprechen Nenndrehzahlen von 972, 724, 483, 364 U/min, womit die geförderten Luftmengen von 100 %, 74 %, 50 % bis auf 37 % der grössten Menge variieren. Die höchste Umgebungstemperatur für die Motoren im Betrieb beträgt 20 ° C, die Nennspannung 500 V und die Lufterwärmung beim Durchströmen des Nabenkörpers rd. 20 °C.

Da die Ventilatoren ferngesteuert werden können, sind sie mit verschiedenen Ueberwachungs- und Sicherheitsvorrichtungen versehen. Es sind dies insbesondere Drehrichtungswächter und Tachodynamos an den Motoren sowie Endschalter an den Abschlussklappen. Zudem sind die Statorwicklungen mit 24 Pilothermknopfthermostaten ausgerüstet für Meldung unzulässiger Temperaturen, wobei ein Alarm bei 115 °C erfolgt und die Motoren bei 130 °C abgestellt werden. Sämtliche Kabel (Antriebsmotoren, Klappen-Servomotoren) und Signalleitungen (Pilotherm-Drehrichtungswächter, Tachodynamo, Endschalter) sind bis zu Klemmenkästen ausserhalb des Ventilatorgehäuses geführt. Diese Anschlusskästen sind so angeordnet, dass beim Auswechseln der Ventilatoren die Zuleitungskabel nicht demontiert werden müssen. Aus dem betriebswarmen Motorzustand sind folgende Anzahl Anläufe bzw. Umschaltungen der Motoren zulässig, ohne Ueberschreitung der maximalen Temperaturen:

— 2 Anläufe direkt hintereinander auf die höchste Drehzahl. Im allgemeinen erfolgt der Anlauf der Motoren auf eine höhere Drehzahl über die tieferen Stufen. Für Notfälle reicht jedoch das Drehmoment des Motors aus für einen Direktanlauf.

— 4 Anläufe auf die höchste Drehzahl, auf eine Stunde gleichmässig verteilt, oder 8 Umschaltungen von einer Stufe zur andern. Die Umschaltung von 8- auf 6-poligen Betrieb erfolgt zwecks Verminderung des Anlaufstromes über eine Zwischenstufe mit reduzierter Spannung. Beim Abstellen der Ventilatoren werden im allgemeinen schrittweise die nächst kleineren Stufen eingeschaltet.

Das Einhalten dieser Betriebsvorschriften wird durch die gewählte Steuerung gewährleistet.

Der Ueberprüfung der vom Hersteller garantierten Fördermengen, Druckhöhen und Wirkungsgrade wurde volle Aufmerksamkeit geschenkt. Da eine Bestimmung dieser Daten nach dem Einbau der Ventilatoren in die Lüftungszentralen schwierig ist und zu einer unerwünschten Verzögerung in der Inbetriebsetzung der Lüftungsanlage führen könnte, wurde das folgende Vorgehen gewählt:

Vor der Ausführung der Ventilatoren werden durch den Hersteller im Beisein eines Vertreters des Bauherrn an einem geometrisch ähnlichen Modellventilator Modellversuch nach VDI-Verdichterregeln durchgeführt werden. Durch diese Versuche soll das Leistungsdiagramm der Ventilatoren überprüft werden, wobei eine Aufwertung der gemessenen Wirkungsgrade unter Berücksichtigung des Reynoldszahlenverhältnisses Modell-Grossausführung vorgenommen wird. Anlässlich dieser Versuche am Modell wird eine vereinfachte Messmethode festgelegt, welche bei der Ausmessung einzelner Betriebspunkte der zuerst fertiggestellten Ventilatorgruppe auf dem Prüfstand der Lieferfirmen angewendet werden soll. Die durch die vereinfachte Messmethode bedingte Abweichung der Kennlinien gegenüber dem Modellversuch nach VDI-Verdichterregeln wird am Modellventilator gemessen und bei der Auswertung der Messungen der Grossausführung berücksichtigt. Diese Messungen am Modell und die Ueberprüfung an der Grossausführung sind für die Garantien massgebend.

Weiterhin werden an den Ventilatorgruppen folgende Abnahmeversuche im Herstellerwerk durchgeführt:

— Sämtliche Ventilatoren werden auf geometrische Aehnlichkeit mit dem Modellventilator überprüft.

— Im Herstellerwerk wird an den Leit- und Laufschaufeln der zuerst fertiggestellten Ventilatorgruppe nachgewiesen, dass sie bei allen vier Betriebsdrehzahlen von unzulässigen Schaufelschwingungen frei sind.

Die Arbeiten nach dem Einbau der Ventilatoren in die Lüftungszentralen umfassen nebst den Funktionskontrollen vor allem die Abstimmung der Charakteristik der einzelnen Gebläse auf die tatsächlichen Druckverhältnisse durch Einstellen der Laufschaufelwinkel. Die rechnerisch ermittelte Einstellung der Schieber der sekundären Zuluftkanäle und der Oeffnung der Ablufthauben auf die gewünschten Luftmengen wird durch Messungen überprüft und nach Bedarf, zusammen mit der Einstellung der Ventilatoren, korrigiert werden.

Literaturverzeichnis

[1] **Die Lüftung der Autotunnel.** Bericht der Expertenkommission für Tunnellüftung an das Eidg. Amt für Strassen- und Flussbau. Berichterstatter: *J. Ackeret, A. Haerter, M. Stahel.* Veröffentlicht als Mitteilung Nr. 10 aus dem Institut für Strassenbau an der ETH. 130 S., 82 Abb. Zürich 1961, Institut für Strassenbau an der ETH. Preis geb. 29 Fr.

Rechnerische und experimentelle Untersuchung des Frischluft-Sekundärkanals des Bernhardin-Tunnels

DK 625.712.35:628:83

Ein Beitrag zur Aerodynamik der Tunnellüftung

Von **J. Kempf,** dipl. Masch. Ing. ETH, Elektro-Watt, Zürich [1])

Der vorliegende Beitrag umfasst eine experimentelle Untersuchung des Frischluft-Sekundärkanals für Strassentunnel mit Quer- und Halbquerlüftung (z. B. Bernhardin-Tunnel). Dieser Sekundärkanal soll die Frischluft vom Zuluftkanal, welcher unter der Verkehrsstrasse liegt, in den Verkehrsraum führen. Dabei werden alle Sekundärkanäle mit den gleichen Dimensionen hergestellt und sollen mit einer Drosseleinrichtung versehen sein, damit die Forderung konstant ausströmender Frischluftmenge q_z in den Verkehrsraum über die ganze Tunnellänge erfüllt ist.

Auf Grund dieser Voraussetzungen enthält vorliegender Beitrag folgende Teile:

1. Unter Ziff. II, 1 bis 3, werden drei Ausführungsvarianten des Sekundärkanals, die sich durch ihre Krümmerkonfiguration unterscheiden, in Naturgrösse experimentell untersucht.

[1]) Die vorliegenden Untersuchungen wurden vom Verfasser während seiner Tätigkeit am Institut für Aerodynamik der ETH durchgeführt.

2. Um die Forderung einer konstanten Abzweigmenge q_z längs des Zuluftkanals mit variablem Druck zu erfüllen, muss im Sekundärkanal gedrosselt werden. Es bestehen grundsätzlich zwei Möglichkeiten der Drosselung:

a) Drosselung nur am Austritt des Sekundärkanals in den Verkehrsraum. Hier bedeutet die Drosselung insofern keinen Verlust, als der Luftstrahl eine höhere Geschwindigkeit annimmt, in den Verkehrsraum deshalb tiefer eindringt und eine bessere Vermischung bewirkt. Unter Ziff. II,4 wird diese Drosseleinrichtung mit beidseitigem Schieber und Abschlussgitter experimentell untersucht. Anschliessend werden unter Ziff. III die Umlenkverluste beim Uebergang des Zuluftkanals in den Sekundärkanal durch einen Modellversuch bestimmt. Schliesslich werden unter Ziff. IV für diese Drosseleinrichtung die Berechnungsgrundlagen zur Einstellung der Drosselschieber geschaffen.

b) Drosselung am Eintritt des Sekundärkanals. Unter Ziff. V wird eine zusätzliche Drosselung durch Schlitzbleche

am Eintritt des Sekundärkanals rechnerisch und experimentell untersucht. Man kann damit erreichen, dass sowohl der eigentliche Austrittsquerschnitt (evtl. reduziert durch feste Seitenbleche) als auch die Austrittsgeschwindigkeit über der ganzen Länge der Zuluftstrecke konstant bleiben können. Die Schlitzbleche erfüllen den Zweck, einen Anteil der hohen Ueberdrücke im Zuluftkanal zu vernichten, so dass die Austrittsgeschwindigkeit in den Verkehrsraum den gewünschten konstanten Wert erreicht und gross genug ist, um eine gute Verwirbelung der Abgase zu bewirken.

I. Bezeichnungen [2])

Strömungsgrössen

ρ	Luftdichte (kg s²/m⁴)
ν	Kinematische Zähigkeit (m²/s)

Zuluftkanal

F_z	Querschnitt des Zuluftkanals (m²)
L_z	Länge des Zuluftkanals (m)
x	laufende Koordinate (m)
$\xi = x/L_z$	dimensionslose Koordinate
Q_{z0}	totale Frischluftmenge für den Lüftungsabschnitt (m³/s)
Δp_{zv}	Ueberdruck im Zuluftkanal gegenüber dem Verkehrsraum (kg/m²)
$\pi_z = \dfrac{\Delta p_{zv}}{\rho/2 \cdot u_{z0}^2}$	dimensionsloser Ueberdruck

Sekundärkanal

f_z	Querschnitt des Sekundärkanals (m²)
l_{zv}	Länge des Sekundärkanals (m)
q_z	Luftmenge pro Sekundärkanal (m³/s)
$v_z = q_z/f_z$	Geschwindigkeit im Sekundärkanal (m/s)
f_z^*	versperrter Querschnitt durch den Drosselschieber allein (m²)
f_{ze}^*	effektiver Austrittsquerschnitt wegen Versperrung durch Schieber und Gitter (m²)
f_G	effektiver Querschnitt der Schlitzbleche am Eintritt in den Sekundärkanal (m²)
v_{zs}	Austrittsgeschwindigkeit im Strahl (m/s)
d_H	hydraulischer Durchmesser (m)
l	gegenseitiger Abstand der Sekundärkanäle längs des Zuluft-Kanals (m)
$Re_K = v_z d_H/\nu$	Reynoldszahl
K_1	Krümmer von 60° } nähere Bezeichnung unter Ziff. II,1
K_2	Krümmer von 30° } nähere Bezeichnung unter Ziff. II,1
K_3	Krümmer von 90° } nähere Bezeichnung unter Ziff. II,1
$\zeta_t = \dfrac{\Delta p_t}{\rho/2 \cdot v_z^2}$	Verlustkoeffizient im Sekundärkanal ohne Drosselung und Gitter
$\zeta^* = \dfrac{\Delta p^*}{\rho/2 \cdot v_z^2}$	Verlustkoeffizient im Sekundärkanal mit Drosselung und Gitter
$\zeta_u = \dfrac{\Delta p_u}{\rho/2 \cdot v_z^2}$	Totaler Umlenkverlust-Koeffizient vom Zuluftkanal in den Sekundärkanal
$\zeta_G = \dfrac{\Delta p_G}{\rho/2 \cdot v_z^2}$	Verlustkoeffizient durch Drosselgitter am Eintritt des Sekundärkanals

II. Experimentelle Untersuchung des Sekundärkanals

1. Die Varianten

Die untersuchten drei Varianten des Sekundärkanals unterscheiden sich, wie gesagt, durch ihre Krümmer-Konfiguration (Bild 1). Es sind:

Var. A: Krümmer-Konfig. $\left\{ \begin{array}{l} K_1\ (r_i = 5\ \text{cm},\ r_a = 15\ \text{cm}) \\ K_2\ (r_i = 5\ \text{cm},\ r_a = 15\ \text{cm}) \\ K_3\ (r_i = 5\ \text{cm},\ r_a = 15\ \text{cm}) \end{array} \right.$

[2]) Technische Masseinheiten in Anlehnung an den Expertenbericht *Ackeret, Stahel, Haerter,* über Belüftung der Autotunnel, Teil 2 (siehe Literaturverzeichnis [1]).

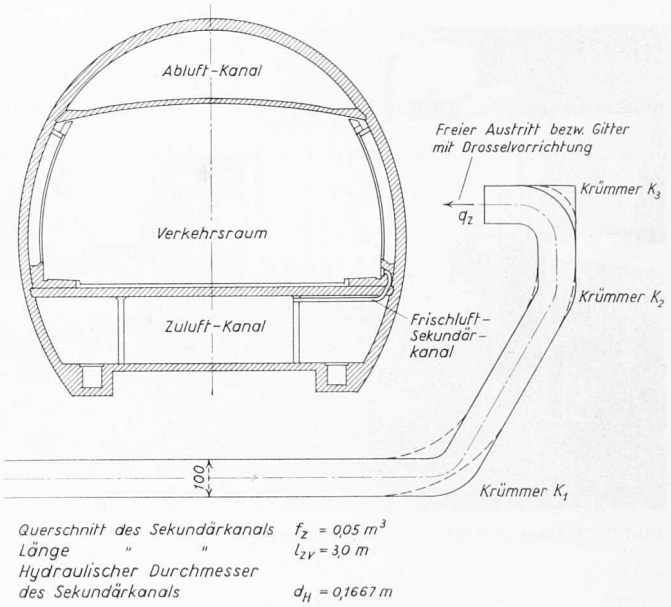

Bild 1. Tunnelquerschnitt mit Sekundärkanal

Var. B: Krümmer-Konfig. $\left\{ \begin{array}{l} K_1\ (r_i = 5\ \text{cm},\ r_a = 15\ \text{cm}) \\ K_2\ (r_i = 5\ \text{cm},\ r_a = 15\ \text{cm}) \\ K_3\ \ (\text{Kante},\ r_a = 10\ \text{cm}) \end{array} \right.$

Var. C: Krümmer-Konfig. $\left\{ \begin{array}{l} K_1\ (r_i = 30\ \text{cm},\ r_a = 40\ \text{cm}) \\ K_2\ (r_i = 30\ \text{cm},\ r_a = 40\ \text{cm}) \\ K_3\ (r_i = 5\ \text{cm},\ r_a = 15\ \text{cm}) \end{array} \right.$

2. Versuchsanlage

Die Versuchsanlage ist aus Bild 2 ersichtlich. Alle Versuche wurden bei axialer Einströmung in den Sekundärkanal ausgeführt.

3. Untersuchung der drei Varianten

Die Versuche fanden statt ohne Austrittsgitter und Drosselung, d. h. bei freiem Austritt in die Atmosphäre nach Krümmer K_3 (Bild 1). Die Messergebnisse sind in Bild 3 enthalten; sie beziehen sich auf die totale Länge $l_{zv} = 3$ m des Sekundärkanals. Das Diagramm gibt den Verlauf des Verlustkoeffizienten $\Delta p_t/\rho/2 \cdot v_z^2$ in Funktion von Re, wobei Δp_t den Teilverlust, bestehend aus dem Druckabfall durch Reibung und Krümmer, darstellt. In diesem Diagramm ist noch der Druckabfall durch Reibung $\Delta p_R / \rho/2 \cdot v_z^2$ für die Kanallänge $l_{zv} = 3$ m eingetragen.

Aus diesen Messungen geht hervor, dass Variante A die kleinsten Verluste gibt. Dieses Ergebnis mag insofern überraschend wirken, als die Variante A, deren Krümmer K_1 und K_2 kleinere Radien haben als jene der Variante C, kleinere Verluste mit sich bringt. Wie Kontrollmessungen gezeigt haben, würde sich nämlich das Gegenteil ergeben, wenn man einzelne Krümmer, bzw. die Krümmer-Konfiguration K_1 plus K_2 ohne K_3 (freies Ausströmen in die Atmosphäre nach Krümmer K_2) vergleicht. Betrachtet man aber die Krümmer-Konfiguration $K_1 + K_2 + K_3$ des Sekundärkanals, so stellt sich Variante A als die beste heraus. Im Vergleich zu Variante C führen nämlich die kleineren Radien der Krümmer K_1 und K_2 von Variante A zu grösseren Sekundärbewegungen, d. h. stärkere Vermischung, was günstigere Einströmverhältnisse für den Krümmer K_3 ergibt.

Auf Grund dieser Ergebnisse wird Variante A für die Ausführung der Frischluft-Sekundärkanäle berücksichtigt.

4. Untersuchung der Variante A des Sekundärkanals mit Drosseleinrichtung und Austrittsgitter

Alle Untersuchungen beziehen sich im weiteren auf die Variante A des Sekundärkanals entsprechend der Schlussfolgerung unter Abschnitt 3.

Zweck der Drosselung. Wegen des variablen Druckes p_z und der Forderung konstant ausströmender Frischluftmenge q_z längs des Zuluftkanals muss am Sekundärkanal vor-

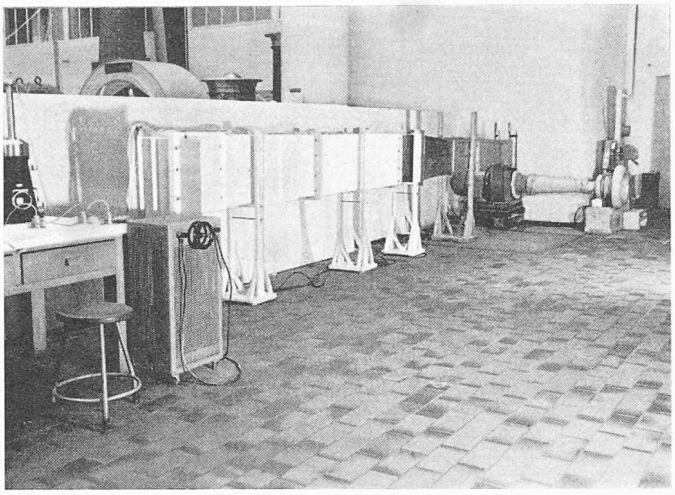

Bild 2. Gesamtansicht der Versuchsanlage

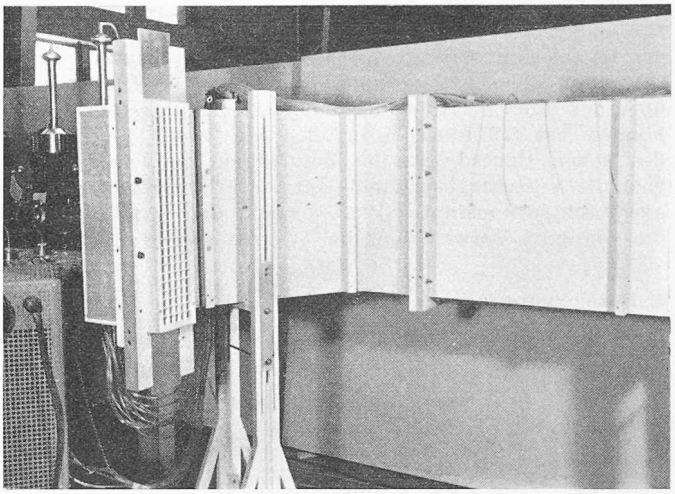

Bild 4. Sekundärkanal mit Abschlussgitter und Drosseleinrichtung (Versuchsanlage)

gedrosselt werden. Die Drosselung kann je nach dem erwünschten Effekt am Eintritt oder am Austritt des Sekundärkanals erfolgen, wie dies bereits in der Einleitung erwähnt ist:

— Drosselung am Einritt des Sekundärkanals bedeutet die Vernichtung eines Anteils des statischen Ueberdruckes p_z im Zuluft-Kanal, der vor dem Eintritt in den Sekundärkanal zur Verfügung steht.

— Drosselung am Austritt des Sekundärkanals durch Querschnitt-Verengung bedeutet eine Umsetzung des statischen Druckes in dynamischen Druck. Je nach dem Druck der noch besteht, können verhältnismässig hohe Austrittsgeschwindigkeiten erreicht werden. Wie es sich im weiteren zeigen wird, sollen beide Lösungen ins Auge gefasst werden.

Drosselung nur am Austritt des Sekundärkanals in den Verkehrsraum mit beidseitigem Schieber und Abschlussgitter

Mit Rücksicht auf eine gute Verwirbelung und Vermischung der Abgase im Verkehrsraum ist am Austritt aus dem Sekundärkanal ein kompakter und weit reichender Frischluftstrahl zu empfehlen. Diese Bedingungen werden erfüllt durch einen beidseitig angebrachten Drosselschieber und ein Austrittsgitter, das als Gleichrichter dient. Eine solche kontinuierlich wirkende Feindrosselung hat den Vorteil, dass sie auf einfache Weise vom Verkehrsraum aus reguliert werden kann (siehe Bilder 4 und 5).

Die Messergebnisse sind in Bild 6 zusammengestellt. Diese Drosselcharakteristik gibt den dimensionslosen Druckverlust ξ^* in Funktion der Reynoldszahl Re_K mit der Schieberstellung d^*/d, bzw. f_z^*/f_z als Parameter. Dabei bedeutet Δp^* im Ausdruck für ζ^* den Druckverlust durch Reibung, Krümmer, Gitter und Drosselung.

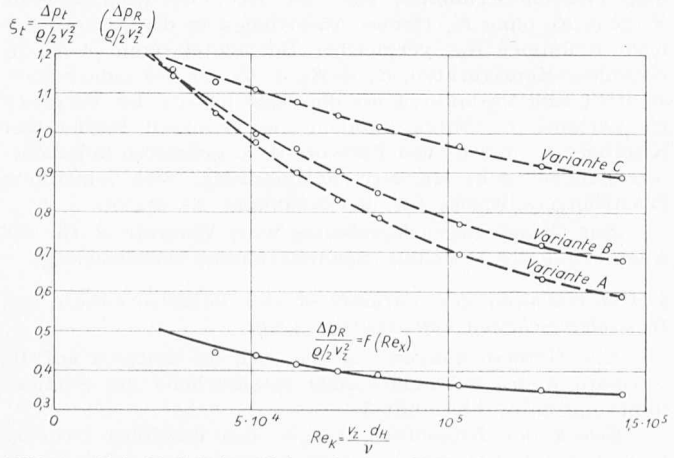

Bild 3. Frischluft-Sekundärkanal ohne Drosselung: Druckverlust-Koeffizient durch Reibung und Krümmer

Es ist darauf zu achten, dass durch das Gitter eine Querschnitt-Versperrung vom Kanalquerschnitt f_z auf den effektiven Austrittsquerschnitt des Gitters f_{ze} stattfindet, wobei $f_z = 500$ cm² und $f_{ze} = 416$ cm² betragen; das Verhältnis ist somit $f_{ze}/f_z = f_{ze}^*/f_z^* = 0{,}832$. Der Index (*) weist auf den durch den Schieber gedrosselten Querschnitt hin. Index e ist der Hinweis auf den durch das Gitter versperrten Querschnitt.

III. Experimentelle Bestimmung des Umlenkverlustes ζ_u beim Uebergang des Zuluftkanals in den Sekundärkanal

Dieser Umlenkverlust ζ_u wurde an Hand eines Modellversuches bestimmt. Die Versuchsanlage ist in Bild 7 zu sehen, wobei zwei Varianten des Einlaufs und ein gerades Stück des Sekundärkanals im Masstab 1:5 ausgeführt wurden. Der totale Umlenkverlust ζ_u wurde in Funktion des Verhältnisses $(u/v)_z$ für einen abgeschrägten und einen eckigen Einlauf in den Sekundärkanal bestimmt. Die Versuchsergebnisse sind in Bild 8 dargestellt. Es zeigt sich, dass die Umlenkverluste für den eckigen Einlauf grösser sind, womit sich ein abgeschrägter Einlauf empfiehlt.

IV. Berechnungsgrundlagen zur Einstellung des Drosselschiebers bei einer Drosseleinrichtung gemäss Ziff. II,4

Die nachfolgenden Berechnungen beziehen sich auf eine Drosseleinrichtung nur am Austritt des Sekundärkanals mit beidseitigem Schieber und Gitter. Die Austrittsmenge q_z aus den Sekundärkanälen muss längs des Zuluftkanals konstant sein. Der Ueberdruck Δp_{zv} im Zuluftkanal gegenüber dem Verkehrsraum, der für die Förderung der Frischluftmenge q_z durch den Sekundärkanal zur Verfügung steht, teilt sich in folgende Teildrücke auf:

— Druckverlust $\Delta p^* = \zeta^* \cdot \rho/2 \cdot v^2_z$ = Druckverlust durch Reibung im Sekundärkanal von der Länge $l_{zv} = 3{,}0$ m plus Druckverlust in den Krümmern und Drossel- und Gitterverlust

— Umlenkverlust $\Delta p_u = \zeta_u \cdot \rho/2 \cdot v^2_z$ beim Uebergang des Zuluftkanals in den Sekundärkanal.

— Druckabfall bzw. Druckrückgewinn $(\rho/2\, v^2_z - \rho/2\, u^2_z)$ durch Beschleunigung oder Verzögerung auf die Geschwindigkeit v_z im Sekundärkanal.

$$\Delta p_{zv} = \rho/2 \cdot v^2{}_z - \rho/2 \cdot u^2{}_z + \Delta p_u + \zeta^* \cdot \rho/2\, v^2{}_z$$

Dividiert man durch $\rho/2 \cdot u^2{}_{z0}$ und setzt:

$$\frac{\Delta p_{zv}}{\rho/2 \cdot u^2{}_{z0}} = \pi_z\,, \quad \frac{u_z}{u_{z0}} = 1 - \xi\,, \quad \frac{v_z}{u_{z0}} = \frac{F_z \cdot l}{f_z \cdot L_z}$$

so ergibt sich für den Drosselkoeffizienten ζ^*:

$$\zeta^* = \pi_z \left(\frac{f_z \cdot L_z}{F_z \cdot l}\right)^2 + \left(\frac{f_z \cdot L_z}{F_z \cdot l}\right)^2 \cdot (1-\xi)^2 - (1+\zeta_u) \tag{1}$$

wobei: $\zeta_u = f(u/v)_z$ .... aus Bild 8

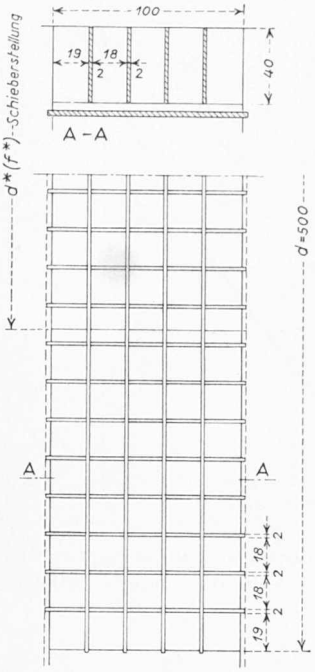

Bild 5 (links). Drosselung am Austritt des Sekundärkanals: Drosselschieber und Abschlussgitter

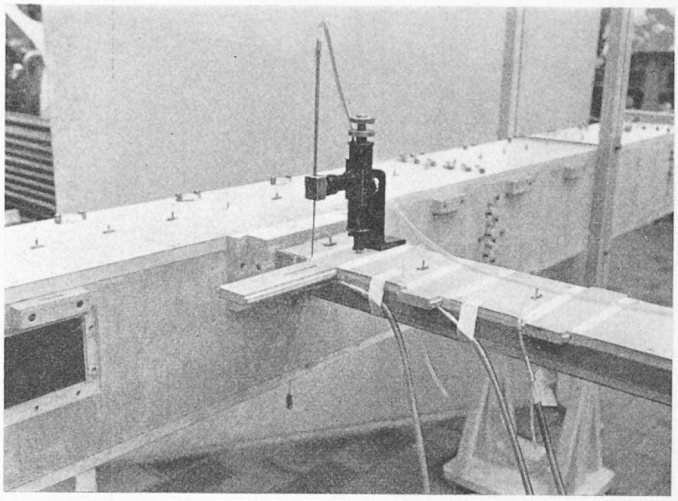

Bild 7 (rechts). Abzweigung vom Zuluftkanal in den Sekundärkanal (Versuchsanlage)

$$(u/v)_z = \left(\frac{f_z \cdot L_z}{F_z \cdot l}\right)(1-\xi)$$

An Hand der Gl. 1 kann für eine gegebene Zuluftstrecke (L_z, F_z, f_z, l) mit bekannter Druckverteilung $\pi_z = f(\xi)$ im Zuluftkanal der Drosselkoeffizient $\zeta^* = f(\xi)$ berechnet werden. Setzt man schliesslich

ζ^* (nach Gl. 1) $=$ ζ^* (aus der Drosselcharakteristik, Bild 6), so lässt sich die Querschnittsverteilung (Schieberstellung) $f_z^* / f_z = f(\xi)$ am Austritt der Sekundärkanäle längs der Zuluftstrecke bestimmen.

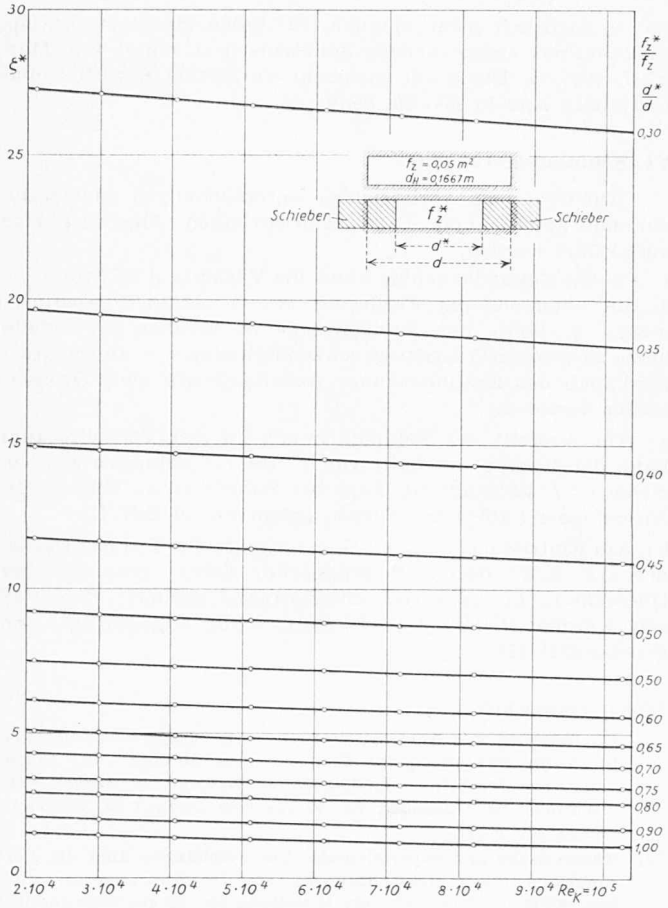

Bild 6. Drosselcharakteristik für beidseitigen Drosselschieber und Abschlussgitter

V. Zusätzliche Drosselung durch Schlitzbleche am Eintritt des Sekundärkanals

Wie aus den Rechenbeispielen hervorging, werden sich bei Vollast am Anfang der Zuluftstrecke hohe Austrittsgeschwindigkeiten v_{ze}^* in den Verkehrsraum ergeben. Geschwindigkeiten der Grössenordnung von 20 bis 25 m/s wären jedoch wegen Lärmentwicklung und Staubaufwirbelung nicht zulässig.

Um diese Nachteile zu beheben, wird ein Anteil des statischen Ueberdruckes p_z, besonders in der ersten Hälfte des Zuluft-Kanals, durch Schlitzbleche, die sich am Eintritt in den Sekundärkanal befinden, vernichtet. Man kann damit erreichen, dass sowohl der Austrittsquerschnitt als auch die Austrittsgeschwindigkeit über der ganzen Länge der Strecke konstant bleiben können. Das heisst jedoch nicht, dass der Austrittsquerschnitt gleich dem vollen Kanalquerschnitt f_z sein soll. Treten nämlich zu kleine Austrittsgeschwindigkeiten auf, so wird man den Querschnitt f_z des Sekundärkanals am Austritt in den Verkehrsraum durch Seitenbleche und zusätzliches Abschlussgitter reduzieren — entsprechend dem unter Ziff. II, 4 enthaltenen Vorschlag einer Drosseleinrichtung am Austritt des Sekundärkanals. Nur wird hier eine solche Drosseleinrichtung stark vereinfacht dadurch, dass der Austrittsquerschnitt längs der Lüftungsstrecke konstant ist und daher verstellbare Schieber nicht in Betracht kommen.

1. Experimentelle Bestimmung des Drosselkoeffizienten des Schlitzbleches

Es wurde ein Schlitzblech im Masstab 1:1 bei axialer Zuströmung und verschiedenen Querschnittsverhältnissen

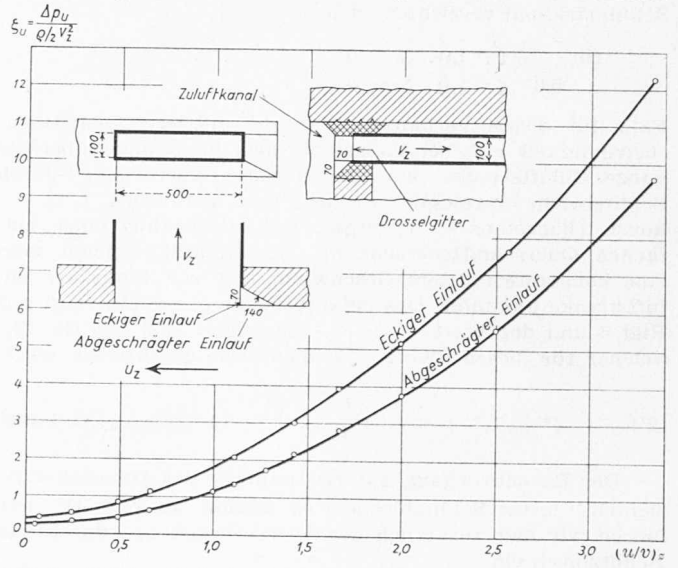

Bild 8. Totaler Umlenkverlust ζ_u vom Zuluftkanal in den Sekundärkanal für abgeschrägten und eckigen Einlauf

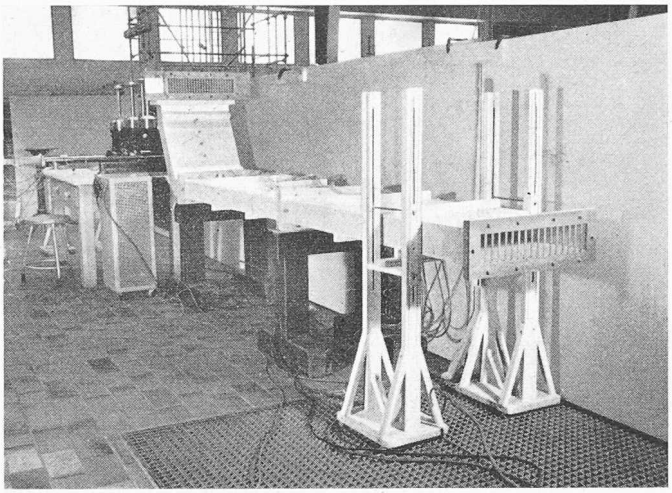

Bild 9. Sekundärkanal mit schlitzförmigem Drosselgitter am Eintritt in den Kanal

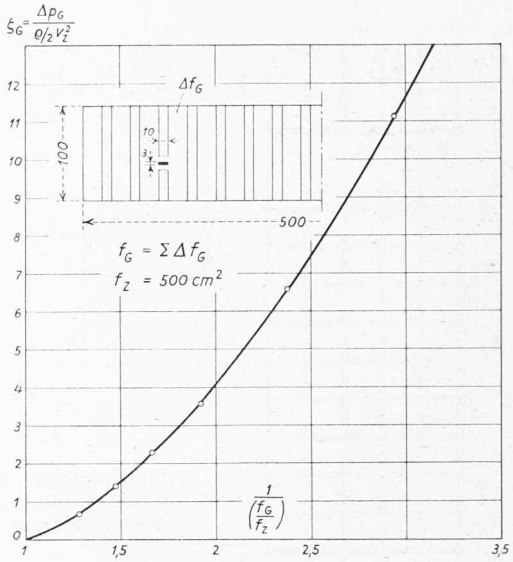

Bild 10. Drosselkoeffizient ζ_G für ein schlitzförmiges Drosselgitter am Eintritt in den Sekundärkanal

f_G/f_z experimentell untersucht (Bilder 9 und 10). Der Drosselkoeffizient

$$\zeta_G = \frac{\Delta p_G}{\rho/2 \cdot v_z^2} = F(f_G/f_z)$$

ist in Bild 10 dargestellt. Es bedeuten:

f_G/f_z das Verhältnis des offenen geometrischen Querschnittes des Bleches zum Querschnitt des Sekundärkanals.

Δp_G den statischen Druck, der durch das Blech vernichtet wird.

2. Bestimmung eines konstanten Austrittsquerschnittes f_z^* und des Drosselkoeffizienten ζ_G des Schlitzbleches

Eine Möglichkeit, den konstanten Austrittsquerschnitt f_z^* längs der Zuluftstrecke zu bestimmen, besteht darin, dass man an Hand der Gl. (1) das ζ^* für $\xi = 1$ berechnet, gemäss einer Drosselung nur am Austritt des Sekundärkanals und konstant annimmt über die ganze Strecke.
Somit wird

$$(2) \qquad \zeta^* = \zeta_1^* = \pi_{z1} \left(\frac{f_z \cdot L_z}{F_z \cdot l}\right)^2 - (1 + \zeta_{u\,\xi=1}) = \text{konst.}$$

Für dieses ζ_1^* ergibt sich aus der Drosselcharakteristik (Bild 6) das Verhältnis f_z^*/f_z = konstant längs der Zuluftstrecke. Dabei wird man in der zweiten Hälfte der Zuluftstrecke wegen dem praktisch konstanten Druckverlauf π_z auf eine Drosselung durch Schlitzbleche am Eintritt in den Sekundärkanal verzichten; d. h.:

für $\xi = 1{,}0$, $\zeta_G = 0$
$0{,}6 < \xi \leq 1{,}0$, $\zeta_G \cong 0$

Falls für dieses Verhältnis f_z^*/f_z die mittlere Austrittsgeschwindigkeit v_{ze}^* bei Vollast zu hoch liegt, muss über die ganze Zuluftstrecke ein Anteil des Ueberdrucks durch Schlitzbleche vernichtet werden. Das Verhältnis f_z^*/f_z = konst. (höchstens = 1) ergibt sich direkt aus einer einfachen Querschnittsberechnung (Kontinuität), indem man eine konstante mittlere Geschwindigkeit v_{ze}^* längs der Zuluftstrecke annimmt. Das entsprechende $\zeta^{*\prime} = \zeta^{*\prime}{}_1$ folgt aus Bild 6 und der Wert $\pi'_{z1} < \pi_{z1}$ berechnet sich aus Gl. (2), welcher für diesen Zweck folgenderweise geschrieben wird:

$$(2') \qquad \zeta^{*\prime} = \zeta_1^{*\prime} = \pi'_{z1} \cdot \left(\frac{f_z \cdot L_z}{F_z \cdot l}\right)^2 - (1 + \zeta_{u\,\xi=1}) = \text{konst}$$

Der Rechenvorgang zur Bestimmung des Drosselkoeffizienten $\zeta^{(\prime)}{}_G$ des Schlitzbleches ist analog zu Ziff. IV; nur führen wir hier zusätzlich den Druckverlust Δp_G durch das Schlitzblech ein:

$$\Delta p_{zv} = \rho/2 \cdot v_z^2 - \rho/2 \cdot u_z^2 + \Delta p_u + \zeta^* \cdot \rho/2 \cdot v_z^2 + \Delta p_G$$

schliesslich

$$(3) \qquad \zeta^{(\prime)}{}_G = \left(\frac{f_z \cdot L_z}{F_z \cdot l}\right)^2 \cdot \left[(\pi_z - \pi^{(\prime)}{}_{z1}) + (1 - \xi)^2\right] - (\zeta_u - \zeta_{u\,\xi=1})$$

wobei $\zeta_u = F(u/v)_z$ [... aus Bild 8]

$$(u/v)_z = \left(\frac{f_z \cdot L_z}{F_z \cdot l}\right)(1 - \xi)$$

Der Index (′) gilt nur für eine Dimensionierung gemäss Gl. 2′.

Für die Bestimmung des Querschnittsverhältnisses f_G/f_z der Schlitzbleche längs der Zuluftstrecke setzt man:

$$\zeta^{(\prime)}{}_G \left[\text{nach Gl. (3)}\right] = \zeta_G \left[\text{aus Bild 10}\right]$$

Es ist natürlich nicht möglich, für jeden einzelnen Sekundärkanal das entsprechende Schlitzblech zu entwerfen. Man wird eher *ein* Blech mit gleichem Verhältnis f_G/f_z für eine bestimmte Anzahl Kanäle benützen.

VI. Schlussfolgerungen

Auf Grund der vorliegenden Untersuchungen können die Sekundärkanäle und Drosseleinrichtungen folgenderweise ausgeführt werden:

1. Für die Sekundärkanäle käme die Variante *A* in Frage.
2. Um einerseits die Forderung der konstanten Ausflussmenge q_z längs der Zuluftstrecke zu erfüllen, anderseits keine zu grossen Austrittsgeschwindigkeiten v_{ze}^* zu erhalten, wird man den Sekundärkanal vorteilhaft mit zwei Drosselstellen versehen:

a) Am Austritt des Sekundärkanals in den Verkehrsraum kann der Kanalquerschnitt von f_z auf f_z^* reduziert werden, wobei f_z^*/f_z konstant ist längs der Zuluftstrecke (Ziff. V, 2). Abschliessend folgt das Gitter, entsprechend Ziff. II, 4.

b) Am Eintritt des Sekundärkanals sollte ein Teil des Ueberdruckes, z. B. durch Schlitzbleche, deren geometrischer Querschnitt f_G längs der Zuluftstrecke variiert, abgedrosselt werden (Gl. 3). Der Eintritt sollte abgeschrägt sein gemäss Ziff. III.

Literaturverzeichnis

[1] **Die Lüftung der Autotunnel.** Bericht der Expertenkommission für Tunnellüftung an das Eidg. Amt für Strassen- und Flussbau. Berichterstatter: *J. Ackeret, A. Haerter, M. Stahel.* Veröffentlicht als Mitteilung Nr. 10 aus dem Institut für Strassenbau an der ETH.

[2] **Theoretische und experimentelle Untersuchungen über die Lüftungsanlage von Strassentunneln.** Von Dr. *Alex Haerter,* dipl. Ing. ETH, veröffentlicht als Mitteilung Nr. 29 aus dem Institut für Aerodynamik an der ETH, herausgegeben von Prof. Dr. J. Ackeret.