Zeitschrift: Schweizerische Bauzeitung
Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
Band: 81 (1963)
Heft: 38

Artikel: Die Lüftung des Bernhardin-Tunnels
Autor: Heller, A. / Schatzmann, A.
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-66875

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: 08.08.2025

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

ORGAN DES SCHWEIZERISCHEN INGENIEUR- UND ARCHITEKTEN-VEREINS S.I.A. UND DER GESELLSCHAFT EHEMALIGER STUDIERENDER DER EIDGENÖSSISCHEN TECHNISCHEN HOCHSCHULE G.E.P.

Die Lüftung des Bernhardin-Tunnels

DK 625.712.35:628.83

Von **A. Heller** und **A. Schatzmann**, dipl. Ing. ETH, Elektro-Watt, Zürich

Der Bernhardin-Tunnel ist in sechs gleichlange Lüftungsabschnitte unterteilt, welche mit voneinander unabhängigen Lüftungssystemen versehen sind. Die Lüftung ist als reine Querlüftung ausgebildet, d.h., dass die benötigte Frischluft längs des ganzen Tunnels gleichmässig in den Verkehrsraum eingeblasen und aus diesem nach der Vermischung mit den Abgasen der Fahrzeuge wieder abgesaugt wird. Die Frischluft wird unter der Fahrbahn durch einen Kanal von konstantem Querschnitt zugeführt und durch einstellbare sekundäre Zuluftkanäle gleichmässig entlang der Fahrbahn verteilt; die Abluftschlitze mit den zugehörigen einstellbaren Abluftbauben sind in der Fahrbahndecke angeordnet und führen die Abluft in den zwischen Tunnelgewölbe und Fahrbahndecke angeordneten Abluftkanal.

Jeder Tunnelabschnitt ist mit einem Zuluft- und einem Abluftventilator ausgerüstet; in den beiden Portalstationen Nord und Süd werden je zwei Ventilatoren eingebaut, während die beiden Tunnelstationen nach jedem Drittel der Tunnellänge je vier Ventilatoren enthalten und durch Schächte mit der freien Atmosphäre verbunden sind. — Nachfolgend sollen einige Sonderprobleme behandelt werden, die sich bei der Dimensionierung der Lüftungsanlagen gestellt haben.

Frischluftmengen

Als massgebender Verkehrszustand für die Berechnung der CO-Menge, die in den Abgasen der Fahrzeugmotoren enthalten ist, wurde eine maximale Fahrzeugbelastung pro Stunde angenommen von 80 Motorrädern, 960 Personenwagen und 125 Lastwagen und Cars. Weiter hat man angenommen, dass ⅔ der Fahrzeuge in Bergfahrt, ⅓ in Talfahrt begriffen seien und dass der Verkehr ungehemmt, d. h. mit einer Geschwindigkeit zwischen 40 und 60 km/h fliesse. Die CO-Mengen wurden gemäss dem Bericht der Expertenkommission für Tunnellüftung *(Ackeret, Stahel, Haerter)* an das Eidg. Amt für Strassen und Flussbau vom Jahre 1961 [1] getrennt berechnet für Berg- und Talfahrt sowie für Fahrzeuge mit Benzinmotoren (Personenwagen und Motorräder) und Dieselmotoren (Lastwagen und Cars).

Da die zulässige CO-Grenzkonzentration für den 6,60 km langen Tunnel gemäss den Empfehlungen der Experten $C_{zul} = 200$ ppm[1]) beträgt, ergibt sich entsprechend der unterschiedlichen Steigung folgender Frischluftbedarf Q_F pro m Länge für die beiden Tunnelhälften

Nordseite (0,95 % Steigung): $Q_{FN} = 0{,}129$ m³ Luft/s
Südseite (0,4 % Steigung): $Q_{FS} = 0{,}121$ m³ Luft/s

Durch die Multiplikation dieser Werte mit den entsprechenden Abschnittslängen wurden die in Bild 1 eingetragenen Frischluftmengen für die sechs Lüftungsabschnitte berechnet.

Druckverlauf in den Lüftungskanälen

Die Berechnung des Druckverlaufes in den Lüftungskanälen erfolgte ebenfalls anhand der im Expertenbericht [1] angegebenen Berechnungsmethoden. Insbesondere dürften hier die Druckverluste in den Zuluftkanälen sowie den Abluftsammlern in den eigentlichen Tunnelstrecken interessieren; es sollen deshalb die der Berechnung zugrunde gelegten Annahmen kurz zusammengestellt werden.

Die Frischluft wird durch die Zuluftventilatoren in den unter der Fahrbahn gelegenen rechteckigen Primärzuluftkanal gefördert und aus diesem durch die alle 2,5 m abwechselnd auf jeder Seite angebrachten sekundären Zuluftkanäle in die Fahrbahn eingeblasen. Da es sich um eine reine Querlüftung handelt, wird eine der Frischluftmenge entsprechende Abluftmenge durch die in der Zwischendecke über der Fahrbahn, in Abständen von 5 m angeordneten Abluftschlitze in den darüberliegenden Abluftsammelkanal gesaugt. Wegen der durch den Verbrennungsprozess der Motoren leicht erhöhten Temperatur der Abluft und des geringern Druckes im Abluftsammelkanal gegenüber dem Zuluftkanal wird mit einer um rund 4 % geringeren Dichte der Abluft im Vergleich mit der Zuluft gerechnet.

Die Wände der Luftkanäle werden sauber verputzt; die Annahme einer mittleren Wandrauhigkeit von 1 mm scheint deshalb angemessen. Unter Berücksichtigung der Abmessungen der Zuluft- und Abluftkanäle waren die folgenden Werte für die Berechnung der Druckverläufe massgebend:

	Zuluftkanal	*Abluftsammler*
Querschnitt F	8,10 m²	10,79 m²
Umfang U	12,60 m	18,22 m
Hydraul. Durchmesser $D = (4\,F)/U$	2,57 m	2,37 m
Reibungszahl λ ($\delta = 1$ mm)	0,018	0,019

Bei der Berechnung des statischen Druckrückgewinnes im Zuluftkanal gemäss [1] infolge Verzögerung der Luftströmung längs des Kanals war zu beachten, dass die Portalabschnitte mit vorgeschaltetem geradem Kanalstück versehen sind, während die Lüftungskanäle im Berginnern direkt an Krümmer anschliessen und sich demzufolge etwas ungünstiger verhalten.

Die Berechnung der Enddrücke an den Kanalenden erfolgte für die tiefste Drehzahl der Ventilatoren (rund 40 % der Nenndrehzahl), da auch für diesen Fall eine gleichmässige Belüftung der Fahrbahn unter dem Einfluss der Stördrücke gewährleistet sein muss. Dabei hat es sich gezeigt, dass für die Berechnung der notwendigen Enddrücke in Zuluftkanal und Abluftsammelkanal die Kolbenwirkung der Fahrzeuge massgebend ist und nicht etwa die meteorologisch bedingte Druckdifferenz zwischen den Portalen. Die Berechnung der Kolbenwirkung erfolgte dabei mit einer entsprechend auf 40 % verringerten Fahrzeugbelastung des Tunnels.

Um zu einer vorsichtigen Dimensionierung zu gelangen, wurde ferner festgelegt, dass 95 % der Fahrzeuge in der einen Richtung und nur 5 % in der Gegenrichtung fahren. Für die beiden portalnahen Lüftungsabschnitte ergibt sich damit bei der tiefsten Lüftungsstufe von 40 % ein Stördruck $p_v = 2{,}63$ kg/m²; für die vier inneren Lüftungsabschnitte ein solcher von $p_v = 2{,}38$ kg/m². Damit konnten anhand der im Expertenbericht [1] entwickelten Diagramme die End-

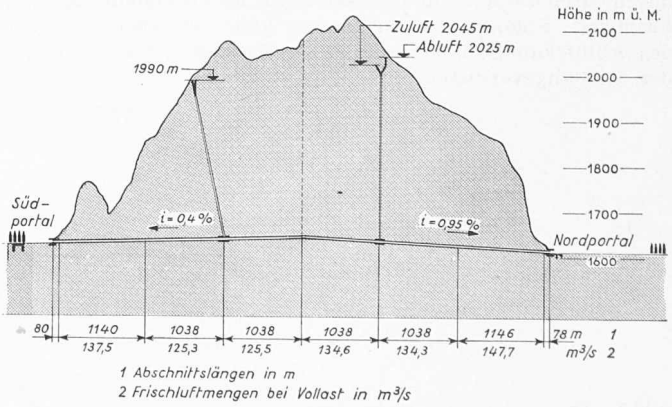

Bild 1. Längenprofil

[1]) Anzahl Teile Gas auf eine Million Teile Luft.

Bild 2a. Statischer Druckverlauf im Zuluftkanal des Portalabschnittes Nord bei Vollast

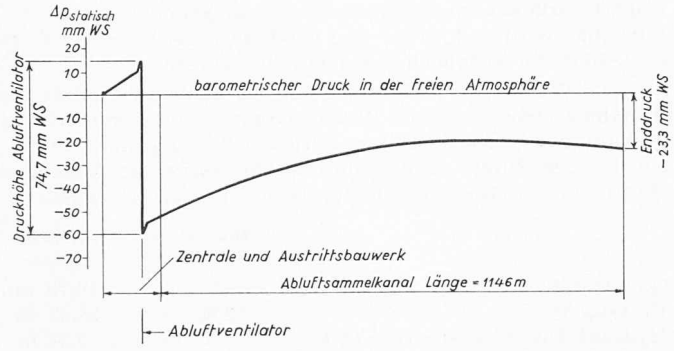

Bild 2b. Statischer Druckverlauf im Abluftkanal des Portalabschnittes Nord bei Vollast

drücke in den primären Zuluftkanälen und in den Abluftsammlern so bestimmt werden, dass unter dem Einfluss des Störddruckes p_r die Abweichung der längs der Lüftungsabschnitte in der Fahrbahn einströmenden und ausströmenden Luftmengen von der gleichmässigen Luftverteilung 20 % auch in der tiefsten Lüftungsstufe (40 %) nicht überschreiten. Eine entsprechend bessere Luftverteilung längs der Tunnelaxe ergibt sich damit automatisch für die höheren Lüftungsstufen.

Auf die Annahmen für die Berechnung der Druckverluste in den Eintrittsbauwerken, den Zuluftschächten und in den Ventilatorstationen bis zum Beginn der Zuluftkanäle sei hier nicht näher eingegangen, da damit keine neuartigen Probleme verknüpft sind.

Der statische Druckverlauf im Portalabschnitt Nord ist in den Bildern 2a und 2b für den Zuluftkanal und den Abluftkanal aufgezeichnet.

Es sei hier noch kurz auf den Verlauf des statischen Unterdrucks im Abluftkanal hingewiesen. Im Gegensatz zum Zuluftkanal erreicht der Unterdruck einen Minimalwert in etwa ⅔ der Abschnittlänge. Dies erklärt sich dadurch, dass die in den Sammelkanal einströmende Abluft durch die schräg angeordneten Schlitze und durch die Klappen in Richtung auf die Abluftventilatoren umgelenkt wird und dadurch ihren Impuls auf die bereits im Kanal strömende Luft überträgt. Solange die Luftmenge klein ist, also am Ende des Abluftkanals, überwiegt dieser Druckgewinn gegenüber den Reibungsverlusten.

Dimensionierung der sekundären Zuluftkanäle

Die Frischluftmenge, die durch jeden der alle 2,5 m angeordneten sekundären Zuluftkanäle ausströmt, beträgt bei Vollast

Tunnelhälfte Nord: $qz_N = 2{,}5 \cdot Q_{FN} = 0{,}32$ m³/s

Tunnelhälfte Süd: $qz_S = 2{,}5 \cdot Q_{FS} = 0{,}30$ m³/s

Im anschliessenden Bericht über die experimentellen Untersuchungen, die an Modellen im vollen Masstab dieser sekundären Zuluftkanäle durchgeführt wurden, wird gezeigt, welche konstruktiven Massnahmen ergriffen werden müssen, damit die gleichmässige Ausströmung der Frischluft über die ganze Tunnellänge für alle Betriebsbedingungen gewährleistet wird.

Dimensionierung der Ablufthauben

Bei einem Abstand der Absaugöffnungen von 5 m beträgt die Abluftmenge bei Vollast:

Tunnelhälfte Nord: $qa_N = 0{,}67$ m³/s

Tunnelhälfte Süd: $qa_S = 0{,}62$ m³/s

Aus konstruktiven Gründen wurden die unter 45° angebrachten Absaugschlitze mit verstellbaren Ablufthauben versehen (Bild 3). Durch passende Einstellung dieser Hauben wird eine gleichmässige Absaugung über den ganzen Lüftungsabschnitt erzielt. Die gewählte Konstruktion der Absaugöffnungen wurde an einem Modell im Masstab 1:5 untersucht, wobei es sich zeigte, dass infolge der stärkeren Umlenkung in die Kanalaxe eine entsprechende Impulsverstärkung gegenüber den im Expertenbericht [1] angegebenen Werten eintritt.

Ventilatoren

Der Dimensionierung der Ventilatoren wurden um 5 % erhöhte Luftmengen und um 10 % erhöhte Druckverluste zugrunde gelegt. Die sich für die einzelnen Lüftungsabschnitte ergebenden Betriebspunkte sind in Bild 4 im Kennbild der Ventilatoren eingezeichnet.

Für jeden der sechs Lüftungsabschnitte sind ein Zuluftventilator und ein Abluftventilator vorgesehen; zusammen mit einem Reserveventilator wurden deshalb bei der Firma Gebr. Sulzer in Winterthur insgesamt 13 Ventilatoren (Bild 5) in Auftrag gegeben. Für alle Ventilationsabschnitte sind Luftmengen und Druckhöhen ungefähr gleich, so dass derselbe Propeller-Ventilator für Frischluft und für Abluft Verwendung findet. Die Ventilatoren sitzen auf dem freien Wellenende der Antriebsmotoren, wodurch diese direkt in die Luftkanäle zu liegen kommen. Die Kühlung der Ventilatormotoren erfolgt jedoch durch Kühlluft, welche für alle Ventilatoren den Zuluftkanälen entnommen und durch besondere Kühlluftrohre von der Aussenseite der Ventilatorgehäuse bis in den Nabenkörper geführt wird. Diese Kühlluft zirkuliert dann zwischen den Kühlrippen der Motoren und einem kurzen Leitmantel bis zu einem ebenfalls auf der Motorwelle angebrachten zusätzlichen kleinen Radialventi-

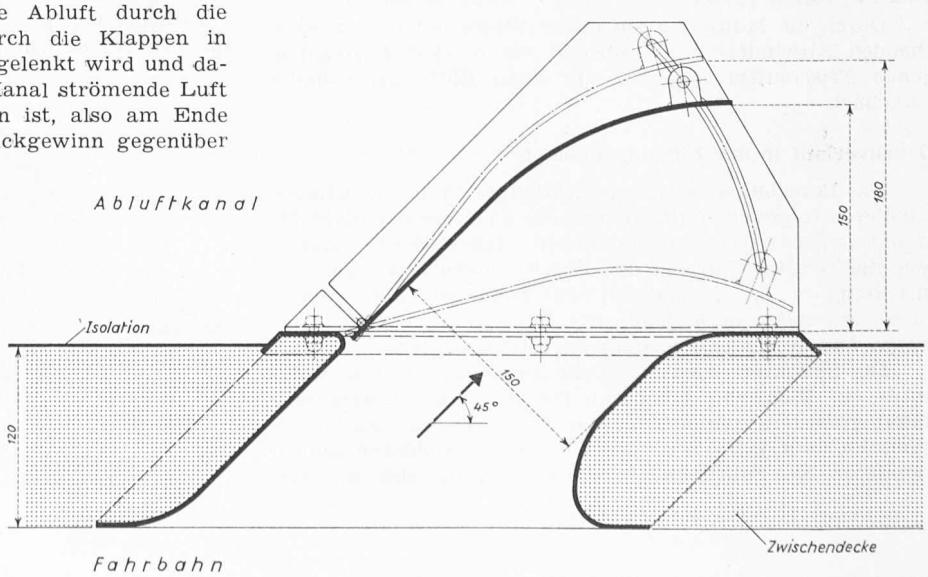

Bild 3. Absaugschlitz mit verstellbarer Abluftbaube, Masstab 1:5

lator, durch welchen sie in den Luftkanal hinausgefördert wird. Dadurch wird einerseits die Kühlung der Motoren der Abluftventilatoren auch bei einem Brand im Tunnel nach Möglichkeit aufrechterhalten, und anderseits können Zuluft- und Abluftventilatoren konstruktiv genau gleich ausgebildet werden.

Die Ventilatorgruppen bestehen aus einem zylindrischen Gehäuse, innerhalb welchem sich der Nabenkörper mit Antriebsmotor, Laufrad und Leitrad befinden. Das horizontal unterteilte Gehäuse ist mit profilierten Leitschaufeln und Kontrollöffnungen versehen. Die Laufräder von 2800 mm Durchmesser mit den acht, im Stillstand einstellbaren, profilierten Schaufeln werden aus Silafontguss hergestellt.

Zu den Ventilatorgruppen gehören ferner Abschlussklappen. Bei den vier Ventilatoren der Portalstationen ist nur je eine Abschlussklappe tunnelseitig vorgesehen, bei den Tunnelstationen jedoch deren zwei, nämlich je eine vor und nach jedem Ventilator. Dadurch sind Revisionsarbeiten an einer beliebigen Ventilatorgruppe möglich, ohne dass der Betrieb der anderen Gruppe in der gleichen Lüftungszentrale beeinträchtigt wird. Alle tunnelseitigen Abschlussklappen sind für Fernsteuerung vom Kommandoraum ausgerüstet und werden bei stehenden Ventilatoren geschlossen. Als Verbindung zwischen Ventilatorgehäusen und den Abschlussklappen sind elastische Manschetten vorgesehen.

Die 13 zugehörigen Elektromotoren sind polumschaltbare Dreiphasen-Niederspannungs-Asynchron-Käfigmotoren der Maschinenfabrik Oerlikon von 220 kW Nennleistung. Die Motorleistung ist um rund 10 % höher gewählt worden als die aufgenommene Leistung des am stärksten belasteten Ventilators. In Anbetracht der bereits vorher angebrachten

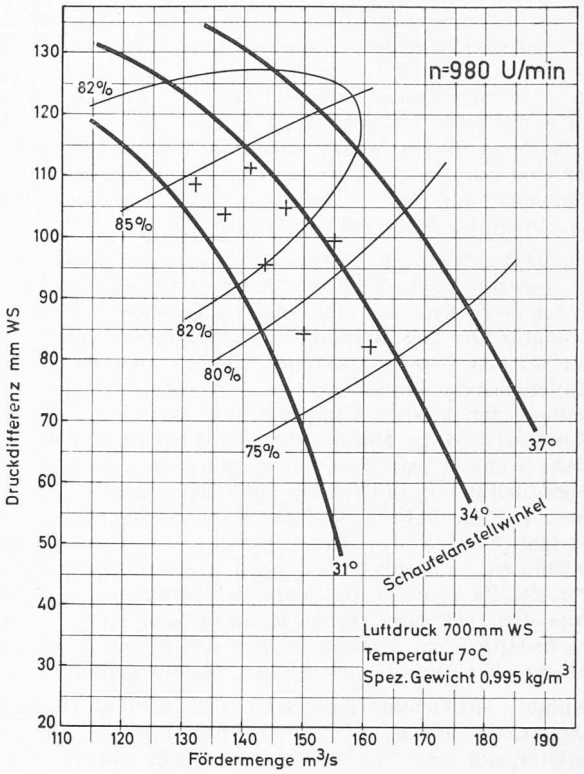

Bild 4. Kennbild der Ventilatoren

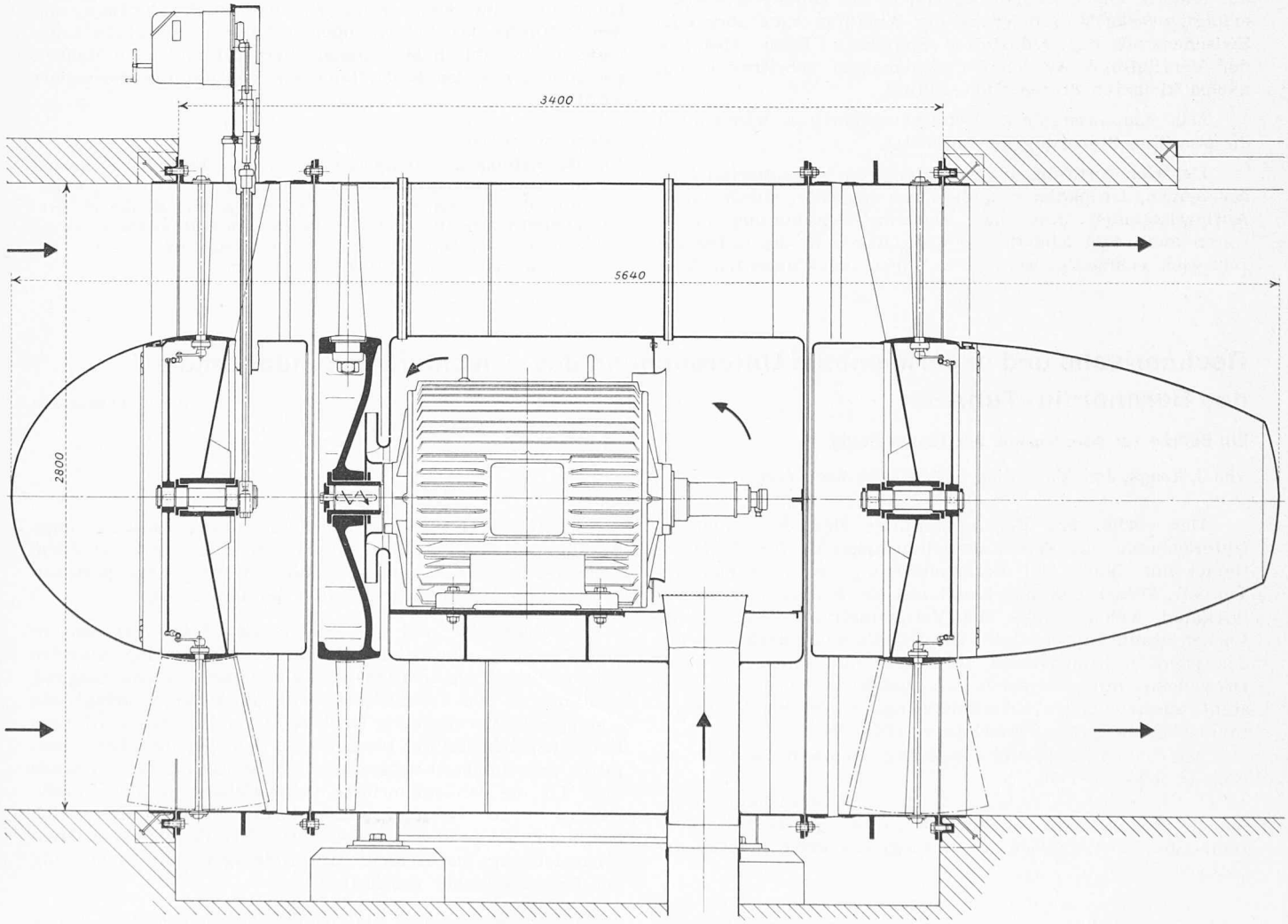

Bild 5. Längsschnitt durch die Ventilatorgruppe, Masstab 1:300

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