

Zeitschrift: Schweizerische Bauzeitung
Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
Band: 83 (1965)
Heft: 4

Artikel: Einfluss der Wandeffekte auf die Treibstrahlwirkung eines Strahlgebläses: ein Beitrag zur Aerodynamik der Tunnellüftung
Autor: Kempf, J.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-68079>

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: 22.02.2026

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

Einfluss der Wandeffekte auf die Treibstrahlwirkung eines Strahlgebläses

DK 625.712.35:628.83

Ein Beitrag zur Aerodynamik der Tunnellüftung

Von J. Kempf, dipl. Masch.-Ing. ETH, Elektro-Watt, Zürich

Problemstellung

Der vorliegende Beitrag umfasst die theoretische und experimentelle Untersuchung einer durch Strahlgebläse erzwungenen Längsströmung Q in einem Kanal von konstantem Querschnitt F . Für dieses System, welches bei der Längslüftung von kürzeren Strassentunnels zur Anwendung kommt [6], wurde insbesondere die Wirkung des Treibstrahles in Wandnähe und in Nischen experimentell untersucht¹⁾.

Durch das Strahlgebläse wird eine Luftmenge q aus dem Kanal angesaugt und anschliessend wieder mit hoher Geschwindigkeit u_s in diesen eingeblasen; der dadurch erzeugte Drucksprung bewirkt eine Längsströmung im Kanal. Prinzipiell befestigt man das Strahlgebläse (Totalquerschnitt f) im lichten Querschnitt des Kanals (Verkehrsraum). Es kann aber auch ein Einbau von Strahlgebläsen in Nischen notwendig werden, so z. B. bei einem Tunnelquerschnitt ohne Kalotte mit beschränktem Lichtraumprofil.

Da die Strömungsrichtung des Strahlgebläses umkehrbar sein muss, ist dessen Axe in allen Fällen parallel zur Kanalaxe gerichtet. Das mittlere Verhältnis F/f beträgt etwa 200. Die Anzahl n der Strahlgebläse, welche zur Förderung einer Luftmenge Q notwendig ist, berechnet sich nach dem Impulssatz, wie von U. Meidinger in [5] gezeigt wurde. Das Ergebnis aus dieser rein theoretischen Berechnung ist aber nur richtig, wenn sich der Treibstrahl in grösserem Abstand von den Wänden gegen die Kanalmitte zu befindet. Diese Forderung kann bei der Längslüftung eines Strassentunnels nicht erfüllt werden, da die Strahlgebläse in Wandnähe, möglicherweise sogar in Nischen längs des Verkehrsraumes, angebracht werden müssen. Dadurch tritt der Coanda-Effekt stark in Erscheinung, wobei sich der Strahl an der

Wand ansaugt und sich seine Wirkung beträchtlich abschwächt. In der theoretischen Ableitung muss somit eine Korrekturgrösse berücksichtigt werden; diese Grösse, welche im weiteren als Strahlwirkungskoeffizient $k_{(N)}$ bezeichnet wird, wurde an Hand eines Modellversuches bestimmt.

Die analytische Auswertung der Ergebnisse zeigt, dass der Strahlwirkungskoeffizient für gewisse Stellungen der Düse mehr als 30% vom theoretischen Wert 1 abweichen kann. Eine wesentliche Verbesserung konnte durch eine Ablenkung des Treibstrahles nach der Kanalmitte erzielt werden. Der Mischungsvorgang der beiden parallel gerichteten Luftströme (Hauptstrom Q und Treibstrahl q) wird an Hand von Druckverläufen und Geschwindigkeitsprofilen längs des Kanals untersucht. Schliesslich werden die notwendigen Berechnungsgrundlagen geschaffen zur Auswertung von $k_{(N)}$ und zur Bestimmung von n .

Bezeichnungen

Strömungsgrössen

q_s	Luftdichte des Treibstrahles	$\text{kg} \cdot \text{s}^2/\text{m}^4$
q_v	Luftdichte der Kanalströmung	$\text{kg} \cdot \text{s}^2/\text{m}^4$
ν	kinematische Zähigkeit	m^2/s
<i>Kanal</i>		
F	Querschnitt des Kanals	m^2
D	Hydraulischer Durchmesser des Kanals	m
x	laufende Koordinate	m
y' , z'	Koordinaten in einer Ebene senkrecht zur Kanalaxe	m
Q	geförderte Frischluftmenge	m^3/s

¹⁾ Die experimentellen Untersuchungen wurden am Institut für Aerodynamik der ETH durchgeführt. Ich möchte meinem sehr verehrten Lehrer, Professor Dr. J. Ackeret, für seine ständige und wohlwollende Unterstützung herzlich danken. An dieser Stelle sei auch F. E. Vos, dipl. Ing., für seine tatkräftige Mitarbeit bei den Messungen und seine Verbesserungsvorschläge bestens gedankt.

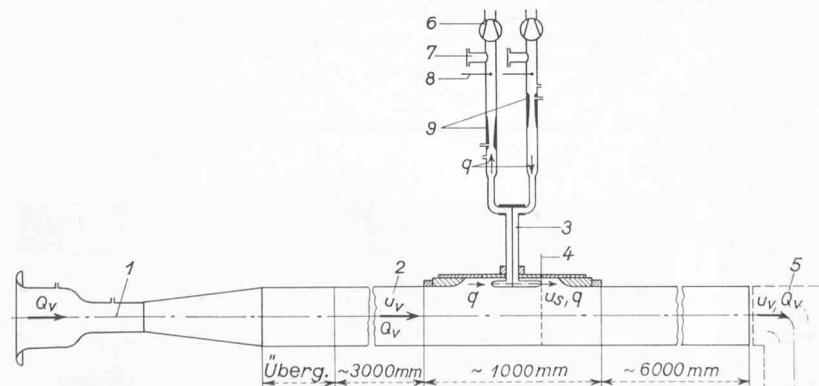
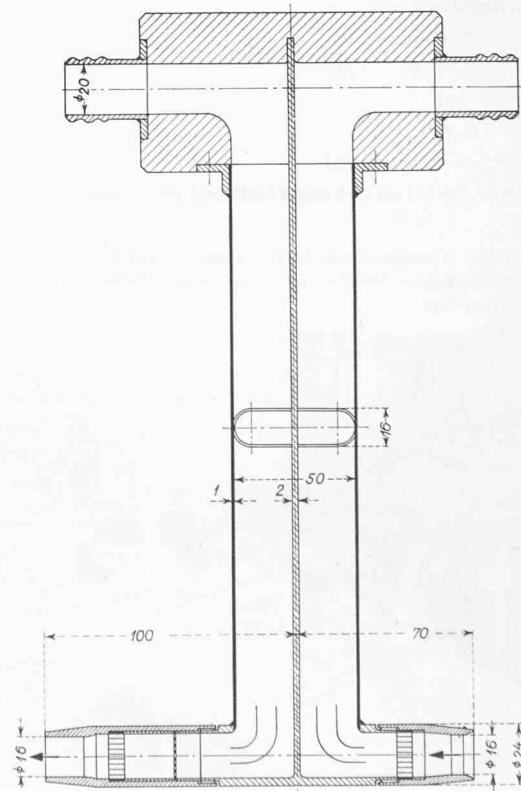


Bild 1. Schema der Versuchsanlage.

- | | |
|---|--|
| 1 Düse für Mengenmessung | 5 freier Austritt, bzw. Anschluss an Radialgebläse |
| 2 Kanal von quadratischem Querschnitt
200 × 200 mm | 6 Ringgebläse |
| 3 Treibstrahldüse | 7 Bypass-Regulierung |
| 4 Austrittsebene des Treibstrahles | 8 Thermometer |
| | 9 Venturidüsen für Mengenmessung |

Bild 2 (rechts). Längsschnitt durch die Treibstrahldüse, 1:3



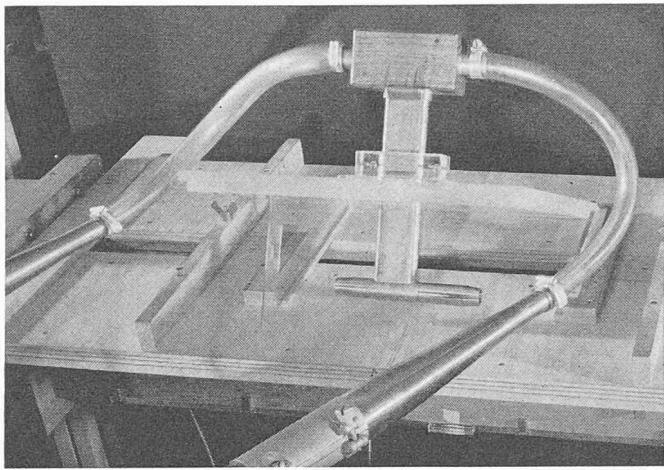


Bild 3 (links). Versuchskanalstück mit ausgebauter Treibstrahldüse und Nischeneinbau

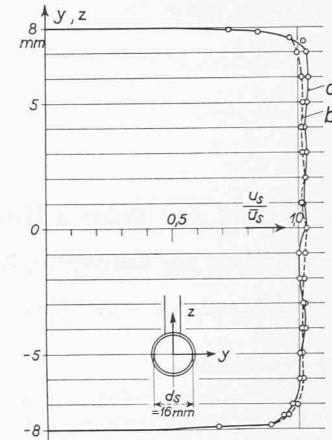


Bild 4 (rechts). Gemessenes Geschwindigkeitsprofil am Austritt aus der Treibstrahldüse (Ebene 4 in Bild 1)
 a Verlauf in Abhängigkeit von der vertikalen Axe z
 b Verlauf in Abhängigkeit von der horizontalen Axe y

u_v	Längsgeschwindigkeit im Kanal	m/s
p	statischer Druck im Kanal	kg/m ²
Re_D	Reynoldszahl ($Re_D = u_v D / \nu$)	—
λ	Reibungskoeffizient im Kanal	—

<i>Nische</i>		
f_N	Querschnitt der Nische	m ²
b_N	Breite der Nische	m
t_N	Tiefe der Nische	m
ξ_N	Widerstandsbeiwert der Nische mit Düse	—

<i>Treibstrahldüse</i>		
f	Austrittsquerschnitt aus der Düse	m ²
d	Durchmesser des Austrittsquerschnittes	m
q	Treibstrahldüse	m ³ /s
u_s	Austrittsgeschwindigkeit des Treibstrahles	m/s
Re_d	Reynoldszahl ($Re_d = u_s d / \nu$)	—
y, z	Koordinaten der Strahlaxe im Kanal ohne Nische (Bild 8a)	m
y_N, z_N	Koordinaten der Strahlaxe im Kanal mit Nische (Bild 8b)	m
ξ_d	Widerstandsbeiwert der Düse	—

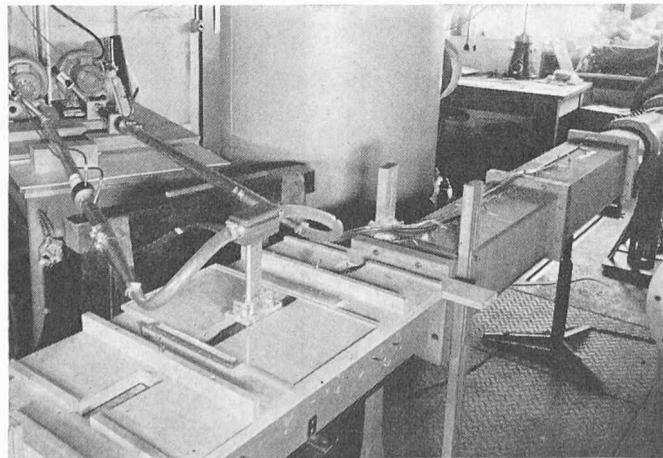
$$\chi = \frac{\varrho_v F u_v}{\varrho_s f^{(*)} u_s} = \frac{\dot{m}_v}{\dot{m}_s} \quad \text{Verhältnis der Massenströme}$$

$$\varphi = \frac{\varrho_v F}{\varrho_s f^{(*)}}$$

$P^{(*)}$ Druckglied

k bzw. k_N Strahlwirkungskoeffizient ohne bzw. mit Nische

Bild 5. Versuchskanal. Vorn eingebaute Treibstrahldüse mit in y -Richtung verschiebbbarer Nische, links oben Ringgebläse mit Venturidüsen, rechts Einlaufdüse



I. Versuchsanlage und Messprogramm

Die Versuchsanlage ist in Bild 1 dargestellt. Entsprechend der üblichen Bauart eines reversiblen Strahlgebläses [6] wurde für die vorliegenden Versuche eine Treibstrahldüse für Blas- und Saugbetrieb gemäss den Bildern 2 und 3 entworfen; die Geschwindigkeitsverteilung im Austrittsquerschnitt f der Düse ist in Bild 4 ersichtlich. Mittels zwei getrennt arbeitenden Ringgebläsen wird dem Kanal einerseits die Luftmenge q entzogen, andererseits die gleich grosse Menge unter hoher Geschwindigkeit u_s injiziert; die zu- und abgeföhrte Luftmenge q wird mit Hilfe von zwei Venturidüsen gemessen und konstant gehalten (Bild 5). Alle Modellversuche wurden mit einer einzigen Treibstrahldüse, ohne oder mit Nischeneinbau, durchgeführt (Bilder 5, 6 und 7); die Düsenaxe war stets parallel zur Kanalaxe gerichtet.

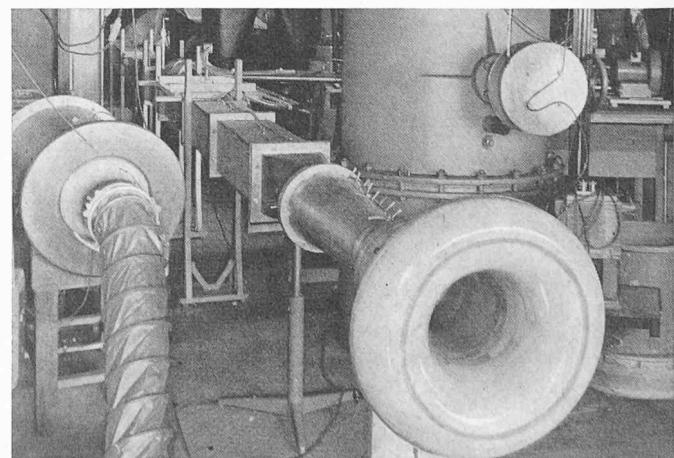
Die Gestaltung der Nische, deren Breite b_N und deren Tiefe t_N variabel sind, ist in Bild 8c zu sehen. Eine Strahlablenkung zur Verbesserung des Strahlwirkungskoeffizienten wurde an Hand der Ablenkvorrichtungen nach den Bildern 14 und 15 untersucht. Entsprechend einem mittleren Querschnitt der Tunnelröhre ist der Verkehrsraum als Holzkanal von quadratischem Querschnitt (20×20 cm) nachgebildet. Der statische Druckverlauf kann längs dieses Kanals gemessen werden (Bilder 5 und 6). Die Versuche wurden für das Flächenverhältnis $F/f = 199$ durchgeführt.

Die Luftmenge Q wird am Kanaleintritt durch eine Messdüse bestimmt (Bild 6). Bei freiem Ausströmen in die Atmosphäre am Kanalaustritt wird diese Menge durch die Treibstrahldüse gefördert. Um bei gleichstarkem Treibstrahl u_s höhere Durchflussmengen Q einstellen zu können, wird der Kanalaustritt mit der Saugseite eines Radialgebläses verbunden, was einem längeren Kanal mit mehreren Treibstrahldüsen entspricht (Bild 1).

Es wurden folgende Messungen vorgenommen:

- Bestimmung des Strahlwirkungskoeffizienten k für verschiedene χ und Stellungen y, z der Düse im lichten Kanalquerschnitt F ohne Nischeneinbau, Bild 8 a.

Bild 6. Versuchskanal mit Einlaufdüse zur Bestimmung der Luftmenge Q



- Bestimmung des Strahlwirkungskoeffizienten k_N für verschiedene χ und Stellungen y_N, z_N der Düse in Nischen (Bild 8 b).
- Druckverläufe und Geschwindigkeitsprofile längs des Kanals für verschiedene Düsenstellungen, ohne oder mit Nischeneinbau.
- Bestimmung eines verbesserten Strahlwirkungskoeffizienten k bzw. k_N durch Strahlablenkung, Bilder 14 und 15.

II. Theoretische Grundlagen

In diesem Abschnitt werden die Gleichungen für die Auswertung der experimentellen Ergebnisse sowie die Berechnung der Anzahl n der Treibstrahldüsen aufgestellt. Das Problem wird eindimensional betrachtet und die laufende Koordinate x in Richtung der Kanalströmung als unabhängige Variable eingeführt; als abhängige Variable werden die Mittelwerte des Druckes und der Geschwindigkeit verwendet. Die Ableitung erfolgt bei $\varrho_v \neq \varrho_s$ für ein reversibles Strahlgebläse gemäß Bild 9 mit einem Strömungsquerschnitt f^* und einem Nabenguerschnitt $f-f^*$.

1. Strahlwirkungskoeffizient k bzw. k_N

Nach dem Impulssatz gilt für die gestrichelte Kontrollfläche 1-2 (Bild 9)

$$(p' - p'') F = \varrho_v'' F u_v''^2 - \varrho_s f^* u_s^2 - \varrho_v (F - f) u_v'^2 + \lambda \frac{\Delta x_2}{D} \bar{v}_v / 2 \cdot \bar{u}_v^2 F$$

Die Kontinuitätsgleichung lautet

$$\varrho_v'' u_v'' F = u_v' (F - f) \varrho_v + \varrho_s u_s f^*$$

$$u_v' = [1 / (F - f)] [\varrho_v'' / \varrho_v] u_v'' F - (\varrho_s / \varrho_v) u_s f^*$$

weiter gilt

$$\varrho_v u_v F = \varrho_v'' u_v F$$

$$u_v'' = (\varrho_v / \varrho_v'') u_v$$

somit

$$(1) \quad u_v' = [1 / (F - f)] [u_v F - (\varrho_s / \varrho_v) u_s f^*]$$

und

$$(2) \quad (p' - p'') F = \varrho_v'' F (\varrho_v / \varrho_v'')^2 u_v''^2 - \varrho_s f^* u_s^2 - \varrho_v (F - f) u_v'^2 + \lambda \frac{\Delta x_2}{D} \bar{v}_v / 2 \cdot \bar{u}_v^2 F$$

Nach der Energiegleichung gilt von 0 bis 1

$$(3) \quad (p' - p) F = \varrho_v / 2 \cdot u_v^2 F - \varrho_v / 2 \cdot u_v'^2 F - \xi_a \cdot \bar{v}_v / 2 \cdot \bar{u}_v^2 F - \lambda \frac{\Delta x_1}{D} \bar{v}_v / 2 \cdot \bar{u}_v^2 F$$

ξ_a ist der Widerstandsbeiwert der Treibstrahldüse, bzw. der Nische mit Düse.

Aus Gleichung (2) und (3) ergibt sich

$$\Delta p F = (p'' - p) F = \varrho_s f^* u_s^2 + \varrho_v / 2 \cdot u_v^2 (F - 2f) - \varrho_v / 2 \cdot u_v^2 [2 (\varrho_v / \varrho_v'') - 1] F - \left(\xi_a + \lambda \frac{\Delta x}{D} \right) \bar{v}_v / 2 \cdot \bar{u}_v^2 F$$

Es gilt annähernd

$$\bar{v}_v / 2 \cdot \bar{u}_v^2 \cong \varrho_v / 2 \cdot u_v^2$$

somit

$$\left(\Delta p / (\varrho_v / 2 \cdot u_v^2) + \xi_a + \lambda \frac{\Delta x}{D} \right) \varrho_v / 2 \cdot u_v^2 F = \\ = \varrho_s f^* u_s^2 - \varrho_s f^* u_s u_v + \varrho_v / 2 \cdot u_v^2 (F - 2f) - \varrho_v / 2 \cdot u_v^2 [2 (\varrho_v / \varrho_v'') - 1] F + \varrho_s f^* u_s u_v$$

Als Abkürzung für das Druckglied gilt

$$(4) \quad P = \Delta p / (\varrho_v / 2 \cdot u_v^2) + \xi_a + \lambda \frac{\Delta x}{D}$$

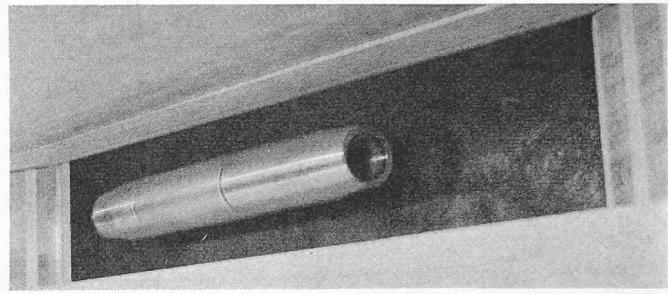


Bild 7. Ansicht der Treibstrahldüse mit Nische

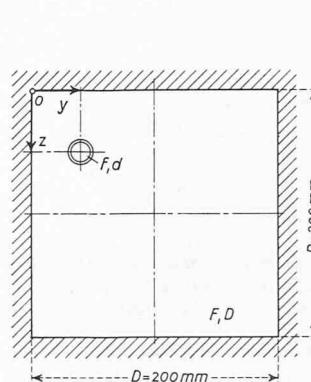


Bild 8a. Querschnitt durch den Versuchskanal ohne Nische mit den Koordinaten y, z der Treibstrahldüse

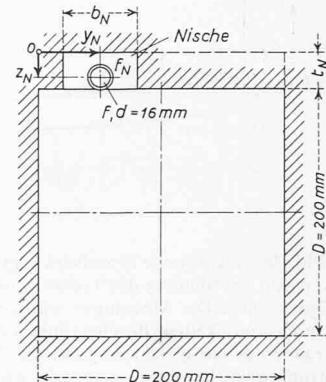


Bild 8b. Querschnitt durch den Versuchskanal mit Nische von der Breite b_N und der Tiefe t_N und den Koordinaten der Treibstrahldüse y_N und z_N

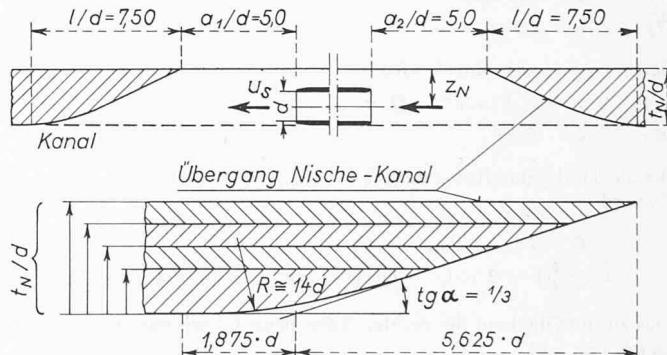


Bild 8c. Nischenformen von verschiedenen Tiefen t_N

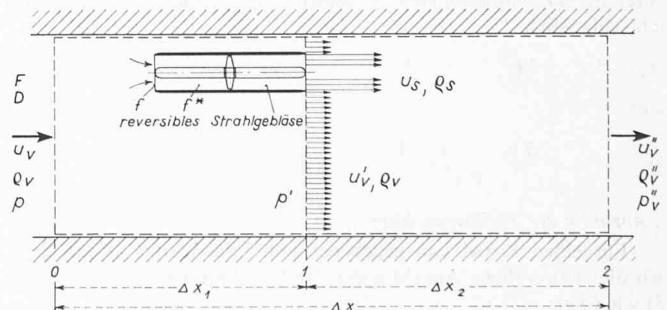


Bild 9. Kanalausschnitt mit Treibstrahldüse und den verwendeten Bezeichnungen. Gestrichelt der Bereich, für den der Impulssatz angewendet wird

Unter Berücksichtigung von Gleichung (1) ergeben sich nach einigen Umformungen

$$P = 2 (\varrho_s u_s f^* / \varrho_v u_v F)^2 (\varrho_v F / \varrho_s f^* - \varrho_v u_v F / \varrho_s u_s f^*) + \\ + [(1 - 2 f/F) / (1 - f/F)^2] (\varrho_v u_v F / \varrho_s u_s f^* - 1)^2 (\varrho_s u_s f^* / \varrho_v u_v F)^2 - \\ - [2 (\varrho_v / \varrho_v'') - 1] + 2 (\varrho_s u_s f^* / \varrho_v u_v F)$$

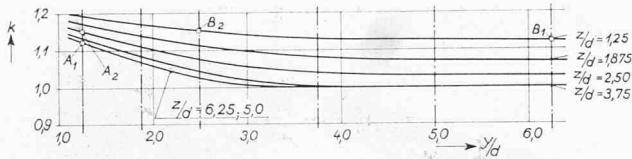


Bild 10a (links). Kanal ohne Nische

Bild 11a (rechts). Kanal ohne Nische

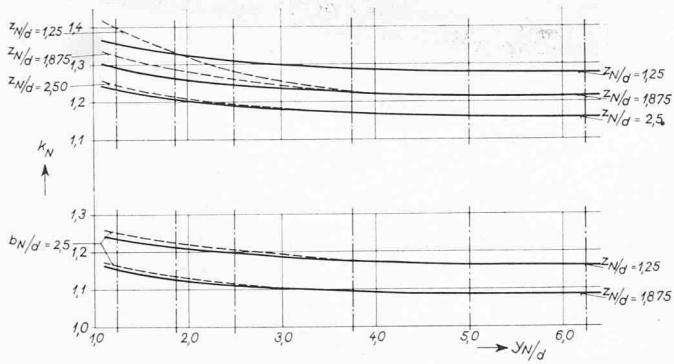
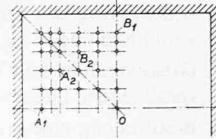


Bild 10. Gemessene Strahlwirkungskoeffizienten k bzw. k_N in Abhängigkeit von der Stellung der Treibstrahldüse für einen Kanal von konstantem Querschnitt. Die Messungen wurden mit zwei verschiedenen Treibstrahl-Geschwindigkeiten durchgeführt ($Re = 5,76 \cdot 10^4$ und $3,90 \cdot 10^4$) und ergaben genau gleiche k - bzw. k_N -Werte. Die Wandabstände der Treibstrahldüsen, bei denen gemessen wurde, sind durch die strichpunkteten Vertikalen bezeichnet

Folgende Kenngrößen werden eingeführt

$$(5) \quad \chi = \varrho_v F u_v / \varrho_s f^* u_s = \dot{m}_v / \dot{m}_s$$

$$(6) \quad \varphi = \varrho_v F / \varrho_s f^*$$

$$(7) \quad \mu = f/F$$

Bei $\varrho_v = \varrho_s = \text{konst. wird}$

$$(5') \quad \chi = u_v F / u_s f^* = Q / q$$

$$(6') \quad \varphi = F / f^*$$

für die Treibstrahldüse nach Bild 2 ist $f = f^*$.

Es wird

$$P = 2(\varphi - \chi) / \chi^2 + \\ + 1 / \chi^2 \left\{ (1 - 2\mu)(\chi - 1)^2 / (1 - \mu)^2 - [2(\varrho_v / \varrho_s)'' - 1] \chi^2 + 2\chi \right\}$$

Das zweite Glied auf der rechten Seite dieser Gleichung ist annähernd gleich $1/\chi^2$ und

$$P \chi^2 = 2(\varphi - \chi) + 1$$

Unter Berücksichtigung eines Strahlwirkungskoeffizienten $k_{(N)}$ ergibt sich schliesslich

$$k_{(N)} P \chi^2 = 2(\varphi - \chi) + 1$$

oder

$$(8) \quad k_{(N)} = \frac{2(\varphi - \chi) + 1}{P \chi^2}$$

2. Anzahl n der Treibstrahldüsen

Für einen Kanal von gegebener Durchflussmenge Q berechnet sich die erforderliche Anzahl n der Treibstrahldüsen nach Gleichung (8) wie folgt:

$$k_{(N)} P^* \chi^2 = n [2(\varphi - \chi) + 1]$$

$$(9) \quad n = k_{(N)} \frac{P^* \chi^2}{2(\varphi - \chi) + 1}$$

mit

$$(10) \quad P^* = \Sigma (\text{aller Druckverluste längs Kanal}) \neq P$$

Bei der Längslüftung eines Tunnels mit Strahlgebläsen kann $\varrho_v = \varrho_s = \text{konst. gesetzt werden, und es sind dann in Gleichung (9) die Kenngrößen nach den Gleichungen (5') und (6') massgebend.}$

Bild 10b (links). Kanal mit tiefen Nischen ($t_N/d = 1,875; t_N = 30 \text{ mm}$), Nischenbreiten $b_N/d = 2,5; 3,75; 5,0$ und $12,5$ ($y_N = 40; 60; 80$ und 200 mm) und drei Höhenlagen der Treibstrahldüse $z_N/d = 1,25; 1,875; 2,5$ ($z_N = 20; 30; 40 \text{ mm}$)

Bild 11b (rechts). Kanal mit tiefen Nischen

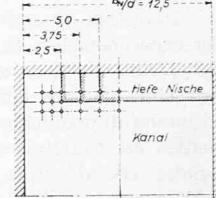


Bild 10c (links). Kanal mit flachen Nischen ($t_N/d = 0,75; t_N = 12 \text{ mm}$), gleiche Nischenbreiten wie bei Bild 10b und zwei Höhenlagen der Treibstrahldüse $z_N/d = 1,25; 1,875$ ($z_N = 20; 30 \text{ mm}$)

Bild 11c (rechts). Kanal mit flachen Nischen

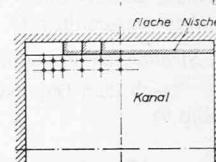


Bild 11. Stellungen der Treibstrahldüsen bei den Messungen nach Bild 10

III. Die Versuchsergebnisse

Da in den Modellversuchen der Treibstrahl u_s und die Kanalströmung u_v merkliche Temperaturunterschiede aufwiesen, wurden die Messergebnisse für k und k_N nach den Gleichungen (5), (6) und (8) ausgewertet. Die Versuche sind für zwei Treibstrahlgeschwindigkeiten $u_s = 63,5$ und $40,5 \text{ m/s}$ und χ -Werte von $6,5$ bis $9,0$ sowie $19,75$ durchgeführt worden. Bei allen Variationen von u_s und χ konnten für eine bestimmte Stellung der Treibstrahldüse innerhalb der Messgenauigkeit keine Unterschiede in den k -bzw. k_N -Werten festgestellt werden.

1. Strahlwirkungskoeffizient für den Kanal ohne Nische

Die gemessenen k -Werte sind in Bild 10a in Abhängigkeit von den Wandabständen y/d beziehungsweise z/d der Treibstrahldüse dargestellt. Die Düsenstellungen sind in Bild 11a angegeben. Aus Symmetriegründen genügt es, die Düse nur innerhalb eines Quadranten zu verschieben. Die Kurven in Bild 10a geben den Verlauf der k -Werte bei horizontaler Verschiebung der Düse in fünf verschiedenen Höhenlagen z/d wieder. Da der Kanal zur Diagonale symmetrisch ist, gelten die Kurven auch bei Vertikalverschiebung der Düse in fünf verschiedenen Abständen y/d von der Seitenwand. Dank dieser Symmetrie müssen entsprechende Stellungen (z.B. A_1 und B_1 beziehungsweise A_2 und B_2) gleiche Messwerte ergeben.

Wie ersichtlich, ist der theoretische Wert $k = 1$ für die Kanalmitte (Punkt O in Bild 11a mit $y/d = z/d = 6,25$) gewährleistet, ebenso im umliegenden Bereich bis $y/d = z/d = \sim 5$. In Wandnähe tritt der Coanda-Effekt in Erscheinung, was eine Verminderung der Treibstrahlwirkung, also eine Zunahme von k zur Folge hat. Der höchste Messwert wird, wie zu erwarten war, in der Kanalecke ($y/d = z/d = 1,25$) erreicht; er beträgt nahezu $k = 1,2$. Für den Fall einer Tunnellüftung, bei der das Strahlgebläse in einer eckenfreien Kalotte steht, können mit guter Annäherung für den Strahlwirkungskoeffizienten k je nach der Höhenlage die Werte aus Bild 10a für $y/d = 6,25$ verwendet werden.

2. Strahlwirkungskoeffizient für den Kanal mit Nische

Die Bilder 10b und 10c zeigen den Verlauf der k_N -Werte für verschiedene Stellungen der Strahldüsen und verschiedene Stellungen und Abmessungen der Nische. Dabei bezieht sich Bild 10b auf die Nischentiefe $t_N/d = 1,875$ ($t_N = 30 \text{ mm}$) und Bild 10c auf die Tiefe $t_N/d = 0,75$ ($t_N = 12 \text{ mm}$). Die Versuche wurden mit vier verschiedenen Nischenbreiten durchgeführt. Bei den Breiten $b_N/d = 5,0; 3,75; 2,5$ ($b_N = 80; 60; 40 \text{ mm}$) befand sich die Strahldüsennaxe stets in Nischenmitte ($b_N/2$), und es wurden Düse und Nische miteinander horizontal verschoben. Auf diese Weise sind bei der tieferen Nische (Bild 10b) drei Höhenlagen z_N/d der Düse ausgemessen worden, nämlich $z_N/d = 1,25; 1,875; 2,5$ ($z_N = 20; 30; 40 \text{ mm}$, Bild 11b), bei der flacheren Nische nur die beiden kleineren Höhenlagen (Bild 11c). Es ist klar, dass der Abstand y_N/d der Düse von der Wand nicht

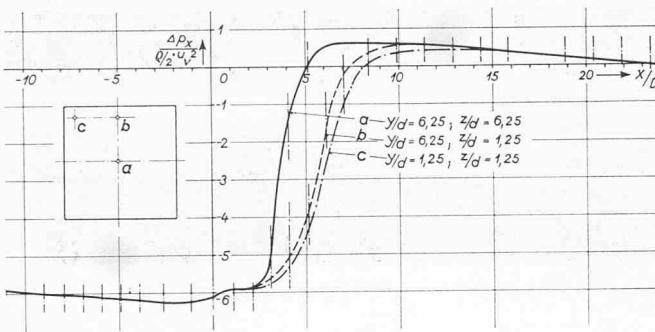


Bild 12a. Kanal ohne Nische, Treibstrahlgeschwindigkeit entsprechend $Re_d = 5,76 \cdot 10^4$

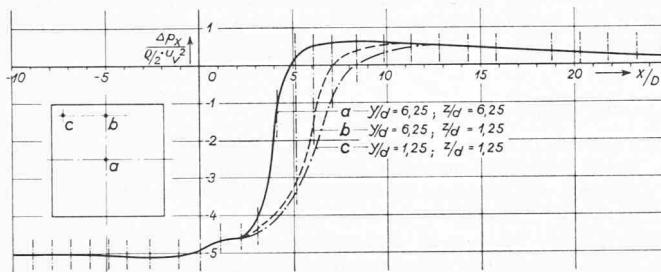


Bild 12b. Kanal ohne Nische, Treibstrahlgeschwindigkeit entsprechend $Re_d = 3,90 \cdot 10^4$

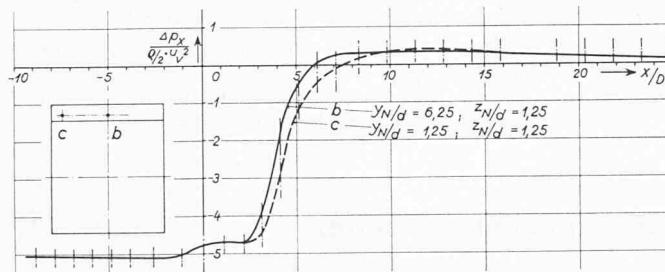


Bild 12c. Kanal mit breiter, tiefer Nische ($b_N/d = 12,5$; $t_N/d = 1,875$), Treibstrahlgeschwindigkeit entsprechend $Re_d = 5,76 \cdot 10^4$

Bild 12. Verlauf des Druckverhältnisses $\Delta P_x (\rho_2 \cdot u^2)$ in Abhängigkeit vom Abstand x von der Austrittsebene des Treibstrahles aus der Düse für die drei Düsenstellungen a, b und c. Die Messpunkte liegen auf den strichpunkteten Vertikalen

kleiner sein konnte als die halbe Nischenbreite, dass also die Stellungen $y_N/d = 1,25$ nur bei der schmalsten Nischenbreite gemessen werden konnten. Bei der Nischenbreite $b_N/d = 12,5$ (also gleich der Kanalbreite) wurde der Wandabstand y_N/d der Strahldüse verändert.

Die Messungen ergaben für breite Nischen ($b_N/d = 12,5$; 5,0; 3,75; $b_N = 200, 80, 60$ mm) bei gleicher Höhenlage gleiche k_N -Werte. Diese werden durch die ausgezogenen Kurven in den Bildern 10b und 10c dargestellt. Bei der schmalen Nische ($b_N/d = 2,5$; $b_N = 40$ mm) macht sich die seitliche Begrenzung des Treibstrahles durch die Nische geltend, wie aus den gestrichelten Kurven in den Bildern 10b und 10c zu erkennen ist. Dieser Einfluss ist bei der tieferen Nische und der höchsten Düsenlage ($z_N/d = 1,25$) besonders ausgeprägt: Während sich die Wirkung gegenüber dem Fall mit breiten Nischen und Nischenstellung in der Kanalecke ($y_N = 1,25$) verschlechtert ($k_N = 1,4$), verbessert er sich, je mehr Nische und Düse in die Mitte rücken (die k_N -Werte fallen mit denen für die Höhenlage $z_N/d = 1,875$ zusammen).

3. Mischungsvorgang

Um eine Übersicht über den Mischungsvorgang der beiden Mengenströme q und Q zu gewinnen, wurden einige Druckverläufe und Geschwindigkeitsprofile längs des Kanals aufgenommen. Die Messergebnisse sind in den Bildern 12 und 13 aufgetragen, wobei die Ebene f durch den Düsenaustritt als Ursprung 0 der x -Koordinate gewählt wurde. Die Bilder 12a, 12b und 12c zeigen bei verschiedenen Düsenstellungen den dimensionslosen Druckverlauf bezogen auf den Aussendruck vor und nach der Treibstrahldüse.

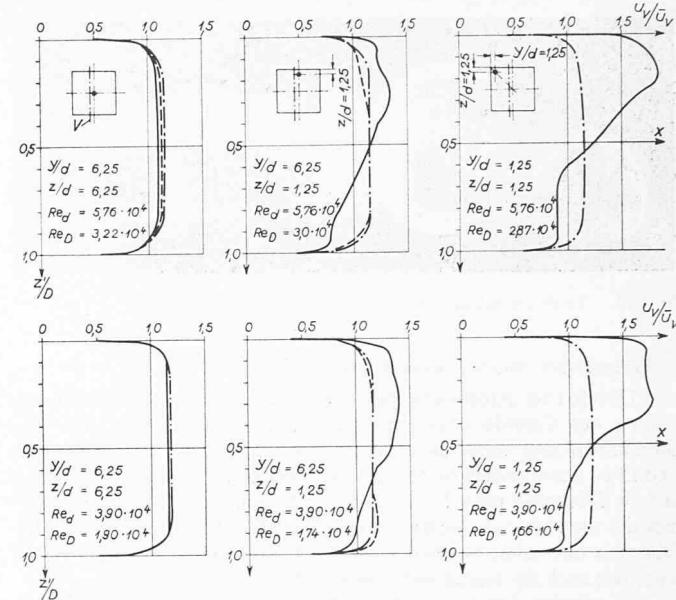


Bild 13a. Kanal ohne Nische, oben grosse Luftgeschwindigkeiten; unten kleine Luftgeschwindigkeiten, Düsenstellungen entsprechend den Querschnittsskizzen oben

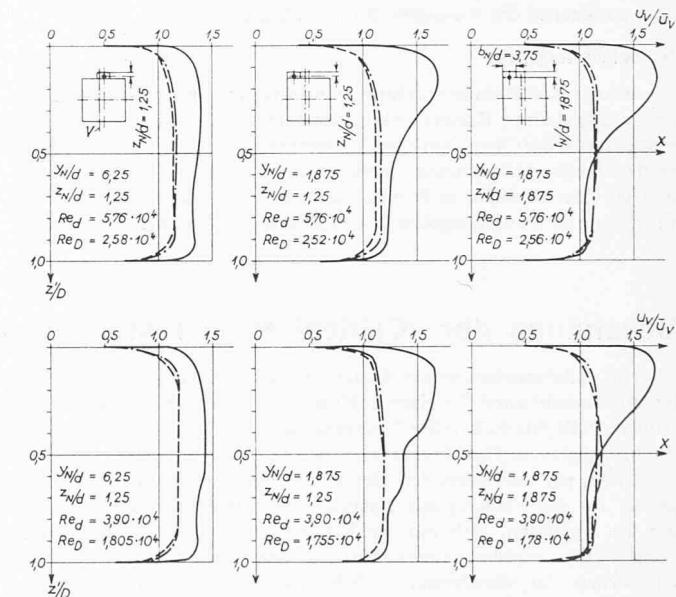


Bild 13b. Kanal mit tiefer, mittelbreiter Nische ($t_N/d = 1,875$, $t_N = 30$ mm; $b_N/t = 3,75$, $b_N = 60$ mm), oben grosse Luftgeschwindigkeiten, unten kleine Luftgeschwindigkeiten, Düsenstellungen entsprechend den Querschnittsskizzen oben

Bild 13. Geschwindigkeitsprofile bezogen auf die mittlere Kanalgeschwindigkeit \bar{u}_v , gemessen längs der Vertikalen V im Abstand $y'/D = 0,4$ ($y' = 80$ mm) von der Seitenwand. Ausgezogene Kurven: Abstand x von der Düsenaustrittsebene $x/D = 8,35$ ($x = 1670$ mm); gestrichelte Kurven: $x/D = 13,35$ ($x = 2670$ mm); strichpunktete Kurven: $x/D = 18,35$ ($x = 3670$ mm). Für jedes Profil wurden rund 20 Punkte aufgenommen.

Die Geschwindigkeitsprofile (Bilder 13a und 13b) sind gemessen in drei Kanalebenen nach der Treibstrahldüse bei verschiedenen Düsenstellungen; dabei wurde in jeder Kanalebene ein Geschwindigkeitsprofil in der Vertikalen bei einem Wandabstand $y'/D = 0,4$ aufgenommen.

Abgesehen von der günstigsten Düsenstellung in der Kanalmitte ist bei allen Strahlversuchen mit oder ohne Nischen die Kanalströmung nach einer Mischlänge $x/D = 13,35$ annähernd ausgeglichen. Im vorliegenden Fall, wo die Strahlgeschwindigkeit u_s viel grösser als die Kanalgeschwindigkeit u_v ist, ist der Mischungsvorgang weitgehend durch den Impulsaustausch an der Strahlgrenze gewährleistet; im Gegensatz dazu würden bei kleinen Verhältnissen u_s/u_v praktisch nur der Impulsaustausch der turbulenten Strömung zur Strahlmischung beitragen, was grössere Mischlängen zur Folge hätte.

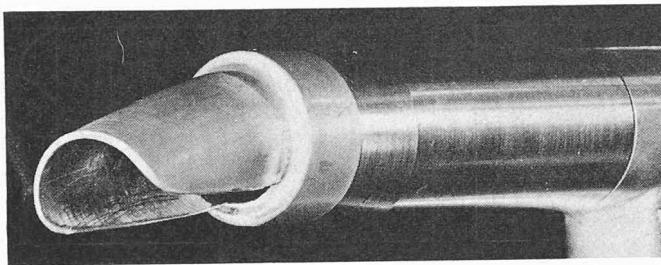


Bild 14. Treibstrahldüse mit Strahlablenkung durch Haube

4. Verbesserter Strahlwirkungskoeffizient

Durch eine Ablenkung des Treibstrahles nach der Kanalmitte konnte der Coanda-Effekt praktisch aufgehoben werden. Die zur Strahlablenkung verwendeten Vorrichtungen sind in den Bildern 14 und 15 zu sehen, wobei der Neigungswinkel des Treibstrahles in bezug auf die Düsenaxe etwa 12° beträgt. Beide Ablenkvorrichtungen können um die Düsenaxe gedreht werden, so dass bei jeder Stellung der Düse mit oder ohne Nischeneinbau der Treibstrahl stets von der Wand weg, also nach der Kanalmitte hin gerichtet ist.

Es wurden Messungen für verschiedene Stellungen der Treibstrahldüse in Wandnähe, Kanalecke und in Nischen durchgeführt; aus ihnen ergab sich für den gleichen Energieaufwand ein mittlerer konstanter Wert des Strahlwirkungskoeffizienten $k = k_N = 1,10$. Wie Kontrollmessungen gezeigt haben, gelten für den Mischungsvorgang annähernd die Aussagen des Abschnittes 3.

IV. Schlussfolgerung

Bei der Anwendung von Strahlgebläsen zur Förderung einer Luftmenge durch einen Kanal von konstantem Querschnitt, der wesentlich grösser ist als der Querschnitt des Treibstrahles, muss der Wandeinfluss auf den Treibstrahl berücksichtigt werden. Je nach Einbauart und Stellung der Strahlgebläse in Wandnähe oder in Nischen kann der entsprechende Strahlwirkungskoeffizient k bzw. k_N den Bildern 10a, 10b

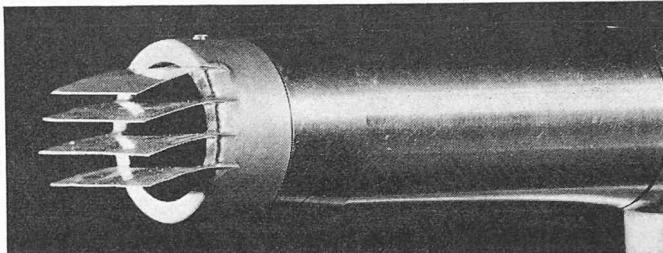


Bild 15. Treibstrahldüse mit Strahlablenkung durch Gitter

und 10c entnommen werden; dieser lässt sich durch eine zusätzliche Strahlablenkung von der Wand weg verbessern. Es obliegt dem Konstrukteur, die unter Ziffer III 4 gemachten Vorschläge zur Verbesserung von k bzw. k_N dem Strahlgebläse anzupassen. Als mittlerer Abstand der Strahlgebläse längs des Kanals wird gemäss Ziffer III/3 eine Mischlänge x/D von mindestens 12 bis 14 empfohlen.

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] E. Broecker: Vermischung von Flüssigkeits- oder Gasströmen bei kleiner Gesamtdruckänderung. «Forschung» Band 24 (1958), Nr. 6.
- [4] R. Vogel: Theoretische und experimentelle Untersuchungen an Strahlapparaten. «Maschinenbautechnik», 5. Jg. (1956), Heft 12.
- [5] U. Meidinger: Längslüftung von Autotunneln mit Strahlgebläsen. «Schweiz. Bauzeitung», 82. Jg. (1964), Heft 28, S. 498.
- [6] E. Rohne: Über die Längslüftung von Autotunneln mit Strahlventilatoren. «Schweiz. Bauzeitung», 82. Jg. (1964), H. 48, S. 840.

Anwendung der «Critical Path Method» auf Bauingenieur-Arbeiten

DK 624:658.51

Das Baudepartement des Staates Washington hat bei der Planung der Ingenieurarbeiten für einen 1500 m langen Autobahn-Viadukt die Critical Path Method (CPM) angewendet. Hierüber wird in «Civil Engineering» vom Oktober 1964, S. 46, berichtet.

CPM, ein Verfahren der Netzplantechnik, wird jetzt schon allgemein für die Planung der eigentlichen Bauausführung gebraucht, und ist in diesem Fall auf die Festlegung der Berechnungs- und Konstruktionsarbeiten angewendet worden. Nach diesem Verfahren werden die verschiedenen Arbeiten eines grösseren Projektes innerhalb der gegebenen Einschränkungen (z.B. vorhandene Arbeitskräfte oder zeitliche Folge gewisser Tätigkeiten) chronologisch so festgelegt, dass ein optimaler Operationsplan entsteht. Die Optimierung kann im Sinne von minimalen Konflikten und Wartezeiten von Arbeitsequipen und maximaler Ausnützung der Geräte geschehen. Mathematisch wird sie immer im Sinne von minimalen Kosten oder maximalem Gewinn ausgedrückt. Im Netzwerk der Operationen, welches die Beziehungen der einzelnen auszuführenden Arbeiten graphisch darstellt, entsteht dabei ein kritischer Weg (Critical Path), welcher jene Operationen enthält, die genau zur vorgeschriebenen Zeit begonnen und beendet werden müssen, falls das erwartete Optimum erreicht werden soll. Für andere, nichtkritische Arbeiten sind gewisse Spielräume vorhanden. Die Anfangsdaten für die Optimierung bestehen aus Angaben über auszuführende Unterarbeiten, vorhandene Arbeitskräfte und gebene chronologische Folgen gewisser Arbeiten (so muss z.B. das Eisenlegen vor dem Betonieren erfolgen).

Im vorliegenden Fall wurde das ganze Bauprojekt in zehn einzelne Objekte wie Brücken, Rampen usw. unterteilt. Jedes Objekt wurde in einzelne Bauteile eingeteilt, und es wurden die nötigen Arbeiten (Entwurf, Berechnung, Zeichnungsanfertigung, Material usw.) für jeden Bauteil festgelegt. Dann musste der Arbeitsaufwand geschätzt und die logischen Beziehungen der einzelnen Arbeiten zueinander bestimmt werden. Damit war es möglich, im Netzwerk die nicht-kritischen Arbeiten chronologisch so zu verschieben, dass ein rationelles Arbeitsschema entstand. Später, während des Fortgangs der Arbeiten, wurde die tatsächliche Lage ständig mit der ideell geplanten

verglichen. Abweichungen und deren Folgen konnten so viel besser überblickt und der Plan entsprechend angepasst werden.

Obwohl die ersten Schätzungen die Vollendung der Berechnung und Konstruktion auf Anfang 1964 ansetzen, wurden die Arbeiten infolge optimaler Organisation mit CPM schon im September 1963 abgeschlossen. Anfangs hatten Bedenken bestanden, dass eine solche «Planung der Planung» zu teuer wäre, dass sich Ingenieurarbeiten nicht gleich wie die eigentliche Bauausführung zeitmäßig zum voraus einteilen lassen und dass sich die Abschätzung des Arbeitsaufwandes für solche Arbeiten als unverlässlich erweisen könnte. Trotzdem ist dieser Weg durch das Seattle Engineering Department offenbar erfolgreich begangen worden, und die gesammelten Erfahrungen über Schätzungen der Arbeitsaufwände werden für spätere Anwendungen als wertvoll erachtet. Vor allem werden folgende Vorteile dieses Verfahrens als Hilfsmittel für die Planung von Arbeitsprogrammen genannt: 1. Man erhält schon von Anfang an alle Information über das Verhalten des Netzwerkes der Operationen und kann so die Lage besser überblicken. 2. Die kritischen Operationen werden sofort erkannt und können besonders aufmerksam verfolgt werden. 3. Durch die systematische Planung des Projektes lassen sich nutzlose Arbeiten (Doppelpurigkeiten, Änderungen, Missverständnisse) weitgehend vermeiden.

Bei grossen Projekten kann das Netzwerk der Operationen so kompliziert werden, dass es ein einziger Bearbeiter unmöglich ganz überblicken kann. In solchen Fällen wird die eigentliche Optimierung mit Vorteil auf einem digitalen Computer durchgeführt. Entsprechende Programme bestehen schon seit einiger Zeit. Dadurch, dass die Routinearbeit maschinell erledigt wird, steht dem Bearbeiter mehr Zeit zur Verfügung, seine eigentliche Aufgabe zu erfüllen.

Es sei noch darauf hingewiesen, dass das Betriebswissenschaftliche Institut der ETH vom 8. bis 12. März dieses Jahres einen weiteren Kurs über Netzplantechnik durchführt (s. SBZ 1964, H. 49, S. 871).

Dr. S. Mauch, Forschungsinstitut für militärische Bautechnik, Auf der Mauer 2, Zürich 1.