

Wolff Koenig

Untersuchungen
über verbesserte Strahlgebläse
für Tunnellüftung

D i s s e r t a t i o n

zur Erlangung der Würde
eines Doktor-Ingenieurs
der Technischen Hochschule Berlin
vorgelegt am 25. 7. 1933 von

Hermann Henschke, Dipl.=Ing.
aus Potsdam

genehmigt am 2. 3. 1934

1937

Druck von Eduard Stichnote in Potsdam

VORWORT

Im Jahre 1929 wandte sich die Reichsbahndirektion Trier an den Leiter des Institutes für Technische Strömungsforschung an der Technischen Hochschule Berlin, Herrn Professor Dr. Ing. Föttinger, um seinen Rat bezüglich der Neugestaltung der Lüftung des Kochemer Tunnels einzuholen. Es sollte insbesondere die Frage geklärt werden, ob es möglich sei, das bisher verwandte Lüftungssystem mittels Strahlgebläses (Saccardo-Lüftung) so zu verbessern, daß auch unter ungünstigsten atmosphärischen Bedingungen bei mäßigem Leistungsaufwand ausreichende Lüftung sichergestellt ist. Professor Föttinger schlug einen grundsätzlich neuen Aufbau der Anlage vor und regte zur Feststellung der günstigsten Ausgestaltung des Strahlgebläses Modellversuche an, über die in der vorliegenden Arbeit berichtet wird.

Mein hochverehrter Lehrer, Herr Professor Föttinger förderte die Untersuchungen durch stets bereiten Rat und Anregungen. Ich sage ihm dafür meinen besten Dank.

Hermann Henschke

Berichter: Prof. Dr.-Ing. Föttinger

Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. Meineke



INHALTSVERZEICHNIS:

I. Einleitung	
a) Zweck der Belüftung von Tunneln	7
b) Beschreibung und Kritik bekannter Lüftungssysteme	8
c) Verbesserungsvorschlag von Prof. Dr.-Ing. Föttinger für die Entlüftung mittels Strahlgebläses	11
d) Ziel der Versuche	12
II. Vorbemerkungen	
a) Bezeichnungen, Benennungen und Maßeinheiten	13
b) Definition des Wirkungsgrades des Strahlgebläses	14
III. Theoretische Betrachtung des Strahlgebläses	
a) Ermittlung des Gesamtdruckverhältnisses und des Wirkungsgrades	16
b) Besprechung der theoretischen Ergebnisse	20
c) Bestimmung des „Betriebspunktes“	24
d) Einfluß der Reynoldsschen Zahl	26
IV. Versuchsanlage	
a) Beschreibung der Versuchsanlage	28
b) Gemessene Größen und Meßeinrichtungen	32
V. Versuchsergebnisse	
a) Ziel der Versuche	36
b) Darstellung der Versuchsergebnisse	37
c) Modellmaßstab	38
d) Verlauf der Strömung im Mischraum	39
e) Druckmessungen im Mischraum	42
f) Zylindrische Mischdüse	43
g) Abhängigkeit der Strahlapparatcharakteristik von der Reynoldsschen Zahl	45

h) Einfluß der Strahldüsenzahl bei gleichem Gesamtdüsenquerschnitt	46
i) Systematische Einzelversuche am Kreisprofil mit gleichmäßiger Verteilung der Strahldüsen am Profilumfang	47
k) Systematische Versuche am Kreisprofil bei ungleichmäßiger Verteilung der Strahldüsen am Profilumfang	51
l) Günstigste Anlage für das Beispiel des Kochemer Tunnels	52
m) Versuche am wirklichen Tunnelmodell	52
VI. Verhalten der Strahlgebläselüftung im Betrieb	
a) Berücksichtigung äußerer Einflüsse (natürliche Lüftung)	56
b) Einfluß verschiedener Tunnellänge	59
VII. Zusammenfassung der Ergebnisse	61
VIII. Literaturnachweis	63
IX. Versuchsübersicht	65
X. Lebenslauf	68

I. EINLEITUNG

a) Zweck der Belüftung von Tunnels.

Über die Gründe, die zur künstlichen Belüftung eines Tunnels zwingen, ist ein ausgedehntes Schrifttum vorhanden. (Vgl. Lit. 2; 3; 9; 10; 14; 18; 27 und 29.) Wir können deshalb hier kurz zusammenfassen:

Übersteigt der Rauchgasgehalt der Tunnelluft ein gewisses Maß (bis 0,3 ‰ CO sind zulässig), so besteht Gefahr für das im Tunnel beschäftigte Rottenpersonal, wie auch für Zugführer und Begleiter. Unterhaltungsarbeiten im Tunnel werden dadurch sehr erschwert. Besonderes Gewicht erhält diese Tatsache, wenn man bedenkt, daß im Tunnel der Oberbau durch Einwirkung der Feuchtigkeit und der Rauchgase wesentlich schneller unbrauchbar wird, als auf freier Strecke. Im Kochemer Tunnel z. B. muß der Oberbau etwa viermal so oft erneuert werden als sonst. Versuche, die Rauchentwicklung in der Lokomotivfeuerung selbst zu vermindern, schlugen fehl.

Nun ist zwar bei jedem Tunnel eine gewisse „natürliche Lüftung“ vorhanden, die durch Außenwinde, Druckunterschiede an den Portalen oder Auftrieb der im Tunnel erwärmten Luft bei verschiedener Höhenlage der Portale erzeugt wird. Ist der Tunnel jedoch sehr lang, die Zugdichte groß, oder die Rauchentwicklung bei starker Steigung und schweren Zügen übermäßig, so ist man zu künstlicher Lüftung gezwungen. Besondere örtliche Verhältnisse können dabei noch eine Rolle spielen. Beim Kochemer Tunnel z. B. bewirken die Außenwinde überwiegend eine natürliche Lüftung in Richtung Eller-Kochem. Unmittelbar vor dem Kochemer Portal liegt aber die Stadt Kochem, die der Rauchbelästigung nicht ausgesetzt werden darf, so daß eine künstliche Lüftung in Richtung Kochem- Eller erforderlich ist. Außer der Rauchbeseitigung beabsichtigt man durch die künstliche Lüftung auch eine weitgehende Herabsetzung der Feuchtigkeit im Tunnel.

b) Beschreibung und Kritik bekannter Lüftungssysteme.

Zur Belüftung von Tunnels werden folgende Systeme angewandt:

1. Lüftung mittels Vorhang,
2. Lüftung mittels Schacht,
3. Lüftung mittels Saccardo-Anlage.

1. Lüftung mittels Vorhang.

Bei diesem Lüftungssystem wird ein Portal durch einen Vorhang möglichst luftdicht abgeschlossen. Dann wird durch einen Ventilator Luft in den Tunnel geblasen, die den Rauch zum freien Portal herausdrückt. Die Anlage ist billig im Bau und Betrieb. Abgesehen von kleinen Mengenverlusten durch Undichtigkeit des Vorhanges treten nur geringe Verluste in der Maschinenanlage und bei der Überleitung der Luft vom Gebläse zum Tunnel auf¹⁾. Ein großer Nachteil dieses Systems ist aber, daß der Vorhang bereits längere Zeit vor der Zudurchfahrt weggezogen werden muß und erst kurz nach dem Passieren des Zuges wieder geschlossen werden kann. Während der Zwischenzeit ist die künstliche Lüftung also unterbrochen. Bei größerer Zugdichte scheidet die Lüftung mittels Vorhang daher aus.

2. Lüftung mittels Schacht.

Das Prinzip der Schachtlüftung ist aus Abb. 1²⁾ ersichtlich. Etwa in Tunnelmitte sitzt ein durch einen Deckel verschließbarer Schacht. Die Tunnelluft wird mittels des neben der Schachtmündung sitzenden Ventilators abgesaugt. Ist die Tunnelluft erheblich wärmer als die Außenluft, so genügt u. U. die Kaminwirkung des Schachtes. Dann wird der Schachtdeckel abgenommen, der Zugang zum Ventilator dagegen abgesperrt. Bei einem aufgesetzten Schornstein von geeigneter Form wird die Kaminwirkung durch die Saugwirkung des vorbeistreichenden Windes verstärkt. Örtliche Besonderheiten bedingen oft zwei oder mehr Schächte, oder es werden besondere Luftfüh-

¹⁾ Unter „Verlusten“ sind hier nur die in der eigentlichen Lüftungsanlage auftretenden verstanden, dagegen nicht die Verluste durch Wandreibung im Tunnel selbst.

²⁾ Die Abbildungen befinden sich im Anhang.

rungskanäle neben dem Tunnel vorgesehen. (Nähere Angaben vergl. Lit. 27.) Wesentlich für eine gute Wirkung der Schachtlüftung ist die richtige Lage des Schachtes. Durch einseitige Winde kann die Luftförderung im gegenüberliegenden Tunnelast vollkommen unterbunden werden. Der Schacht muß daher so gelegt werden, daß beide Tunnelzweige bei Berücksichtigung der natürlichen Lüftungsverhältnisse möglichst gleich gut entlüftet werden. Das ist bei stark wechselnden natürlichen Lüftungsbedingungen oft undurchführbar. Ein Tunnelast bleibt dann verqualmt. Der Schachtquerschnitt muß möglichst groß ausgeführt werden, um die Widerstände klein zu halten. Ein Vorteil der Schachtlüftung ist, daß durch das gleichzeitige Absaugen aus beiden Tunnelzweigen der Tunnel — bei gleicher Luftgeschwindigkeit — schneller entlüftet wird als bei den anderen beiden Systemen, bei denen der Rauch durch den ganzen Tunnel gedrückt werden muß. Nachteilig sind die hohen Anlagekosten des Schachtes, so daß dieses System nur bei mäßigen Gebirgsüberlagerungen wirtschaftlich angewandt werden kann. Ein weiterer Nachteil ist die schon oben gekennzeichnete schwierige Beherrschung der Außenwinde usw. Die Betriebskosten sind stark vom Schachtdurchmesser und der Schachthöhe abhängig. Sie werden im allgemeinen größer als bei Vorhang-Lüftung sein.

3. Lüftung mittels Saccardo-Anlage.

Dieses nach dem italienischen Erfinder Saccardo genannte System wurde erstmalig beim 3000 m langen Partolino-Tunnel angewandt, später auch beim 2727 m langen Apennin-Tunnel bei Prachia, beim Gotthard-Tunnel, beim Tauern-Tunnel, beim Kochemer-Tunnel, beim Alleghany-Tunnel der Virginia-Bahn, neuerdings beim Tunnel von Mornay u. a.

Das Prinzip des Saccardo-Systems ist folgendes: (vgl. Abb. 2): Der Ventilator V fördert Luft in die Ringkammer K; von hier strömt die Luft durch die Ringdüse D in den Tunnel, wobei ein Teil der Geschwindigkeitsenergie in Druck umgesetzt wird. Durch dieses ringförmige Luftstrahlgebläse werden die Rauchgase zum gegenüberliegenden Portal hinausgefördert. Aus strömungstechnischen Gründen wird hinter dem Düsenring der Tunnelquerschnitt verengt. Die ganze Anlage wird profilfrei ausgeführt. Über verschiedene Abarten des hier ge-

kennzeichneten Systems berichtet E. Wiesmann (Lit. 27). Beschreibung und Ergebnisse ausgeführter Saccardo-Anlagen findet man in den Abhandlungen Lit. 2; 3; 9; 10; 15; 17; 18 und 29.

Der Vorteil des Saccardo-Systems gegenüber dem System mit Vorhang besteht darin, daß der Betrieb ununterbrochen durchgeführt werden kann. Im Vergleich zur Schachtlüftung wird die Saccardo-Anlage wesentlich billiger in der Ausführung. Wird die Saccardo-Anlage genügend stark ausgeführt, so kann man auch eventuelle Gegenwirkung der natürlichen Lüftung überwinden. Im allgemeinen ist es zweckmäßig, die Anlage so zu bauen, daß sie in Richtung der häufigsten natürlichen Winde arbeitet. Immer ist dies jedoch nicht durchführbar, wie das oben angeführte Beispiel des Kochemer Tunnels zeigt. Der schwerwiegende Nachteil des bisherigen Saccardo-Systems ist sein außerordentlich geringer Wirkungsgrad. Außer dem Energieverlust im Ventilator treten noch folgende Verluste auf: Verluste in den Windkanälen, die zur Luftkammer führen, Verluste beim Übergang vom Windkanal zur Kammer, Verluste in der Kammer, Verluste in der Düse, Verluste bei der Mischung des Düsenstrahles mit der Tunnelluft und Verluste durch Entweichen von Luft aus dem Portal. Bei allen bisher gebauten Saccardo-Anlagen ist die Luftführung vom Gebläse bis zu der Ringdüse außerordentlich ungünstig ausgeführt. Besonders große Verluste traten meist beim Übergang vom Windkanal zur Luftkammer auf. In der Kammer selbst ist die Druckverteilung ungleich. Demzufolge ist die Beaufschlagung der Ringdüse sehr verschieden. Die Umlenkung der in der Kammer etwa senkrecht zur Tunnelachse ankommenden Luft zur Ringdüse hin erfolgt sehr unvollkommen. Der Hauptverlust entsteht jedoch beim Übergang der Luft aus der Düse in den Tunnel. Grundsätzlich ist das der gleiche Vorgang wie bei jeder „plötzlichen Erweiterung“. Es handelt sich also im wesentlichen um Wirbelverluste. Erschwert wird der Überblick jedoch dadurch, daß durch das benachbarte Portal Luft entweder ein- oder austreten kann. Der Wirkungsgrad ist stark abhängig von der Gestaltung der Anlage und von dem zu belüftenden Tunnel (Länge, Querschnitt, Gegenwinde usw.). Es können daher nicht allgemein gültige Zahlen angegeben werden. Wir verweisen diesbezüglich auf die Literatur-Angaben 2; 3; 15 und 27. Als ganz rohen Anhalt gibt E. Wiesmann an, daß der Gesamtwir-

kungsgrad für einen zweigleisigen Tunnel von größerer Länge etwa bei 6% liegt. Das entspricht ungefähr den Ergebnissen am Kochemer- und am Tauern-Tunnel. Stärkere Gegenwinde werden jedoch in beiden genannten Anlagen nicht überwinden. Der Wirkungsgrad sinkt auf Null ab, ja die Gegenwinde können sogar einen Luftzug entgegen der künstlichen Lüftung hervorbringen. Die Saccardo-Anlagen sind also in der bisherigen Form sehr unwirtschaftlich und unzureichend.

c) Verbesserungsvorschlag von Professor Föttinger für die Entlüftung mittels Strahlgebläses.

Professor Föttinger schlug vor, statt einer Ringdüse eine Anzahl zylindrischer oder konischer Strahldüsen ohne Zuluftkammer (Abb. 3) profilfrei anzuordnen.

In jede Strahldüse (Abb. 4) wird ein Achsialventilator gesetzt, der durch einen vor oder hinter ihm liegenden Elektromotor angetrieben wird. Propellernabe und Motor werden so verkleidet, daß sie einen Stromlinienkörper bilden. Jede Strahldüse erhält einen gut abgerundeten Einlauf ohne Luftkammer oder Kanäle.

Dieser Vorschlag übernimmt vom ursprünglichen Saccardo-System nur den Grundgedanken eines profilfrei angeordneten Luftstrahlgebläses. Die Vorzüge der Idee Föttingers liegen in folgendem:

1. Die für die großen Windmengen (beim Kochemer-Tunnel 200 bis 300 m³/sec) erforderlichen umfangreichen Zuführungskanäle, sowie die riesige Einlaufkammer werden vermieden. Dieser Vorteil macht sich nicht nur dadurch bemerkbar, daß die erheblichen Kosten für diese komplizierten Bauten wegfallen, sondern in weit höherem Maße dadurch, daß die Druckverluste, die in den Kanälen und in der Kammer entstehen, bei der neuen Anlage überhaupt nicht auftreten. Dadurch wird der Leistungsbedarf der Anlage weitgehend vermindert.

2. Es werden keine besonderen Maschinenräume benötigt. Der Platzbedarf der Anlagen ist daher gering.

3. Sehr einfach gestaltet sich die Regulierung: Durch Zu- oder Abschalten einzelner Düsen kann der Betrieb vollkommen elastisch angepaßt werden. Da bei dieser Regulierungsart die Ventilatoren stets mit gleicher Drehzahl laufen

können, ist die Möglichkeit gegeben, zum Antrieb einfachste und billigste Drehstrom-Motoren zu verwenden.

4. Für große Mengen und kleine Drucke ist der Achsialventilator, dessen Einbau in die Strahldüsen leicht möglich ist, besonders gut geeignet. Da die Drehzahl konstant bleibt und der Druck in der Strahldüsenmündung sich praktisch kaum ändert, wird der Ventilator für einen ganz bestimmten Betriebspunkt gebaut, bei dem man dauernd maximalen Wirkungsgrad erreichen kann. Die Austrittsenergie wird fast vollständig ausgenutzt.

5. Als letzter Vorzug mag die große Betriebssicherheit der Anlage genannt werden. Durch etwaigen Ausfall eines Motors wird die Lüftung nicht wesentlich beeinträchtigt. Die Auswechslung der Motoren ist einfach.

d) Ziel der Versuche.

Bei der obengenannten Neugestaltung der Strahlgebläse-Entlüftung sind die bei den bisherigen Anlagen auftretenden Verluste zwischen Ventilator und Düseneinlauf völlig beseitigt. Aufgabe der hier mitgeteilten Versuche war es, die Verluste des eigentlichen Strahlgebläses (das von der Strahldüsenmündung ab gerechnet wird) zu senken. Es war vor allem zu klären, ob es zweckmäßig ist, mit großen Mengen und kleinen Drucken, oder mit kleinen Mengen und hohen Drucken zu arbeiten. Diese Frage läuft darauf hinaus, festzustellen, welche Querschnitte die Strahlendüsen-Mündungen im Verhältnis zum Tunnel-Querschnitt erhalten sollen. Weiter war zu untersuchen, unter welchem Winkel die Strahldüsen zur Tunnelachse stehen sollen, wie der Mischraum zu gestalten ist, wie die Strahldüsen am Tunnelumfang profilfrei anzuordnen sind usw. Die schärfere Formulierung dieser Fragen wird später nachgeholt, wenn wir durch die Theorie Richtlinien und Anhaltspunkte erhalten haben.

II. VORBEMERKUNGEN

a) Bezeichnungen, Benennungen und Maßeinheiten.

Es sei (vgl. Abb. 5):

f_d = Querschnitt einer Strahldüsen-Mündung [m^2]

F_d = Gesamtquerschnitt der Strahldüsenmündungen [m^2]

F_t = Tunnel-Querschnitt [m^2]

F_x = beliebiger Querschnitt des Mischraumes (auch Mischdüse genannt) [m^2]

F_e = engster Querschnitt des Mischraumes [m^2]

F_a = von Strahldüsen freier Querschnitt in der Ebene a—a [m^2]

F_b = Querschnitt, bei dem der Mischvorgang beendet ist [m^2]

F_p = Querschnitt des lichten Profiles, das entsprechend der Bau- und Betriebsordnung der Bahn eingehalten werden muß [m^2]

β = Winkel, unter dem die Strahldüsen gegen die Tunnelachse geneigt sind [$^\circ$]

w = Geschwindigkeit [m/sec]

p = Druck [kg/m^2]

Der Nullpunkt für die Druckmessung ist der Atmosphärendruck.

γ = spezifisches Gewicht [kg/m^3]

$\rho = \frac{\gamma}{g}$ = Massendichte [$kg \text{ sec}^2/m^4$]

$q = \frac{w^3}{2g} \gamma$ = Staudruck [kg/m^2]

Q = Volumen pro Sekunde [m^3/sec]

m = Massenstrom pro Sekunde [$kg \text{ sec}/m$]

Die Stellen, auf welche die genannten Größen sich beziehen, werden durch die bei den Querschnitten schon angegebenen Indizes gekennzeichnet.

Außerdem werden noch folgende Bezeichnungen verwendet:

- P = Kraft [kg]
 t = Temperatur [° Cels.]
 T = Temperatur [° abs.]
 d = Durchmesser [m] bzw. [mm]
 x = Abstand in Tunnelrichtung [m] bzw. [mm]
 m = Querschnittsverhältnis der zur Messung benutzten Blenden
 α = Durchfließzahl der Blende¹⁾
 μ = Kontraktionszahl der Strahldüsen¹⁾
 φ = Geschwindigkeitszahl der Strahldüsen
 ξ = Widerstandszahl
 λ_{R} = Rohrreibungskoeffizient
 L = Länge des Tunnels [m] bzw. [km]
 U = Umfang des Tunnelquerschnittes [m]
 χ = Volumenverhältnis
 $\Delta; \Delta'; \delta$ = Druckverhältnis
 η = Wirkungsgrad

b) Definition des Wirkungsgrades des Strahlgebläses.

Der Gesamtwirkungsgrad der Lüftungsanlage Abb. 5 umfaßt die Verluste der Elektromotoren, der Ventilatoren, die Düsenverluste und die Verluste des eigentlichen Strahlapparates. Der Wirkungsgrad des Strahlapparates, den wir mit η bezeichnen, interessiert hier besonders. Die Verluste des Strahlapparates sind:

1. Verluste, die dadurch entstehen, daß die Umwandlung von Geschwindigkeit in Druck nicht ideal erfolgt. Es entstehen beim Mischvorgang wie bei jeder plötzlichen Erweiterung Wirbel, deren Energie nicht zurückgewonnen werden kann.
2. Mengenverluste, die beim Abströmen von Luft aus dem Portal auftreten können.
3. Wandreibungsverluste und Verluste im Diffusor, der den Übergang zum Tunnelprofil vermittelt.

¹⁾ In älteren Veröffentlichungen werden α und μ oft in umgekehrter Bedeutung gebraucht.

Als Wirkungsgrad des Strahlapparates werde definiert:

$$\eta = \frac{\text{Energie der Luft im Tunnelanfang}}{\text{Energie der Luft, die dem Strahlapparat zugeführt wird}} = \frac{E_t}{E_s}$$

Unter „Tunnelanfang“ soll die Stelle verstanden werden, an der der Diffusor des Mischraumes in das eigentliche Tunnelprofil übergeht. Meist erstreckt sich die Wirkung des Strahlapparates noch weiter in den Tunnel hinein. Hier findet also noch solange ein weiterer Druckanstieg statt, bis der durch die Reibung an der Tunnelwand hervorgerufene Druckverlust überwiegt und wieder ein Absinken des Druckes zur Folge hat. Der höchste statische Druck im Tunnel soll mit p_t bezeichnet und der Energieberechnung zugrunde gelegt werden.

Unter der Energie, die dem Strahlapparat zugeführt wird, wollen wir die Energie verstehen, die die Luft beim Verlassen der Strahldüsen besitzt. Die Düsenverluste sowie die Verluste in den Ventilatoren und Elektromotoren werden also vom Wirkungsgrad des Strahlapparates nicht erfaßt.

Mit den oben angegebenen Bezeichnungen wird:

$$E_t = (p_t + \frac{w_t^2}{2g} \cdot \gamma_t) \cdot Q_t = (p_t + q_t) \cdot Q_t$$

$$E_s = (p_d + \frac{w_d^2}{2g} \cdot \gamma_d) \cdot Q_d = (p_d + q_d) \cdot Q_d$$

Die Expansionsarbeit wurde hierbei nicht berücksichtigt. Diese Vernachlässigung ist zulässig, da infolge der sehr geringen Drucke p_t und p_d der Fehler im allgemeinen unter 0,25%, im Höchstfall unter 0,4% bleibt.

Es wird daher:

$$\eta = \frac{(p_t + q_t) \cdot Q_t}{(p_d + q_d) \cdot Q_d} = \Delta \cdot \chi \quad (1)$$

wobei folgende Bezeichnungen eingeführt sind:

$$\text{Gesamtdruckverhältnis } \frac{p_t + q_t}{p_d + q_d} = \Delta \quad (2)$$

$$\text{Volumen- oder Förderverhältnis } \frac{Q_t}{Q_d} = \chi; (\chi \leq 1)$$

III. THEORETISCHE BETRACHTUNG DES STRAHLGEBLÄSES

Die folgenden theoretischen Betrachtungen haben zur Voraussetzung, daß die auftretenden Druckdifferenzen klein genug sind, um die Veränderung des spezifischen Gewichtes vernachlässigen zu können. Zur Abschätzung des Fehlers sei bemerkt, daß die für die Belüftung des 4200 m langen Kochemer Tunnels z. B. erforderliche Druckdifferenz 15 bis 30 mm WS beträgt. Das spezifische Gewicht der Luft wird dadurch nur um 0,15 bis 0,3% beeinflusst. Die Berücksichtigung der Veränderung des spezifischen Gewichtes ist im übrigen nicht schwierig, beeinträchtigt aber die Übersicht der Rechnung. Das Ergebnis wird zum Vergleich auch mit Berücksichtigung des spezifischen Gewichtes angeführt. Im folgenden wird gesetzt:

$$\gamma_a = \gamma_b = \gamma_d = \gamma_x = \gamma_t = \gamma$$

und damit

$$\varrho_a = \varrho_b = \varrho_d = \varrho_x = \varrho_t = \varrho$$

a) Ermittlung des Gesamtdruckverhältnisses und des Wirkungsgrades.

Abb. 6 zeigt einen schematischen Schnitt durch den Strahlapparat. Auf den stark umrandeten Teil wenden wir den Impulssatz an:

$$R = p_b \cdot F_b - p_a \cdot F_a - p_d \cdot F_d \cdot \cos \beta - \int_a^b p_x \cdot dF_x = m_d \cdot w_d \cdot \cos \beta + m_a \cdot w_a - m_b \cdot w_b \quad (a)$$

(Bezeichnungen vgl. Absatz IIa).

Es ist:

$$\begin{aligned} m_d \cdot w_d \cdot \cos \beta &= F_d \cdot w_d^2 \cdot \varrho \cdot \cos \beta \\ m_b &= F_b \cdot w_b \cdot \varrho = Q_b \cdot \varrho \end{aligned} \quad (b)$$

$$w_b = \frac{Q_b}{F_b}$$

$$m_b \cdot w_b = \frac{Q_b^2}{F_b} \cdot \varrho$$

mit $\frac{Q_t}{Q_d} = \chi$ und $Q_b = Q_t$ wird dann:

$$Q_b = \chi \cdot Q_d$$

$$m_b \cdot w_b = \chi^2 \cdot \frac{Q_d^2}{F_b} \cdot \varrho = \chi^2 \cdot \frac{F_d^2}{F_b} \cdot w_d^2 \cdot \varrho \quad (c)$$

$$m_a = F_a \cdot w_a \cdot \varrho = Q_a \cdot \varrho$$

$$w_a = \frac{Q_a}{F_a}$$

$$m_a \cdot w_a = \frac{Q_a^2}{F_a} \cdot \varrho$$

Nun ist aber

$$m_a + m_d = m_b = m_t$$

$$Q_a \cdot \varrho + Q_d \cdot \varrho = Q_t \cdot \varrho; Q_t \cdot \varrho = \chi \cdot Q_d \cdot \varrho$$

$$Q_a = \frac{Q_d}{\varrho} \cdot (\chi \cdot \varrho - \varrho) = F_d \cdot w_d (\chi - 1)$$

$$m_a \cdot w_a = \frac{F_d^2}{F_a} \cdot w_d^2 \cdot \varrho \cdot (\chi - 1)^2 \quad (d)$$

Setzt man die Gleichungen (b), (c) und (d) in (a) ein, so ergibt sich:

$$p_d \cdot F_b - p_a \cdot F_a - p_d \cdot F_d \cdot \cos \beta - \int_a^b p_x \cdot dF_x = F_d \cdot w_d^2 \cdot \varrho \cdot \cos \beta + \frac{F_d^2}{F_a} \cdot w_d^2 \cdot \varrho (\chi - 1)^2 - \chi^2 \cdot \frac{F_d^2}{F_b} \cdot w_d^2 \cdot \varrho$$

Dividiert man diese Gleichung F_b und $q_d = \frac{w_d}{2} \cdot \varrho$, so wird:

$$\frac{p_b}{q_d} - \frac{1}{q_d} \cdot (p_a \cdot \frac{F_a}{F_b} + p_d \cdot \frac{F_d}{F_b} \cdot \cos \beta + \int_a^b p_x \cdot dF_x) =$$

IV. VERSUCHSANLAGE

Wie schon in Abschnitt Ic mitgeteilt war, ist geplant, bei der Ausführung in jede Strahldüse einen Achsialventilator einzubauen. Da hier aber nur der eigentliche Strahlapparat untersucht werden soll, ist es gleichgültig, wie die Strahldüsen die Luftzufuhr erhalten, wenn nur die Luftstrahlen in gewünschter Weise die Düsen verlassen. Für die Modellversuche ist daher zentrale Luftzuführung entsprechend den weiter unten gemachten Erläuterungen gewählt worden.

Um für die grundsätzlichen Fragen des Mischvorganges möglichst einfache Versuchsbedingungen zu erhalten, wurde zunächst statt des eigentlichen Tunnelprofils Kreisquerschnitt gewählt. Nach Abschluß der Versuche am Kreisrohr wurde ein Umbau der Versuchseinrichtung vorgenommen, bei dem dann ein wirkliches Tunnelprofil (das Profil des zweigleisigen Kochener Tunnels) ausgeführt wurde.

a) Beschreibung der Versuchsanlage

In Abb. 8 ist die Versuchsanlage mit Angabe der Hauptmaße aufgezeichnet. Der Elektromotor E treibt über einen Riemen das Gebläse G an. Von dem Gebläse wird die Luft durch eine Rohrleitung mit Röhrengleichrichter R in den Sammelkasten K gedrückt. Die zugeführte Luftmenge wird mittels Stauscheibe S 1 gemessen. Aus dem Sammelkasten strömt die Luft durch die Strahldüsen D in den Mischraum M, von hier in das Tunnelrohr T. Die durch das Tunnelrohr gehende Luftmenge wird mittels Stauscheibe S 2 bestimmt.

Beschreibung von Einzelheiten

1. Die Drehzahl des 5 PS Gleichstrom-Nebenschluß-Motors E konnte durch einen in das Motorfeld eingeschalteten Schiebewiderstand von 75 Ohm in geringem Maße vom Instrumententisch aus reguliert werden.

2. Das Gebläse lieferte 25 m³/min bei einem Gegendruck

von 500 mm WS. Motor und Gebläse waren auf zwei 3,2 m langen U-Eisen NP 14 montiert.

3. Die Rohrleitung zwischen Gebläse und Stauscheibe S 1 besteht aus drei 1 mm starken, stumpf geschweißten Blechschüssen mit aufgeschweißten Flanschen. Das Rohr hat 3 m Länge, das ist das 21,4 fache des Durchmessers (140 mm). Der Röhrengleichrichter R besteht aus einem Messingrohrbündel von 20 cm Länge.

4. Zur Messung der vom Gebläse gelieferten Luftmenge dienten Stauscheiben; S 11 mit 110 mm oder S 12 mit 100,05 mm Innendurchmesser. Sie waren nach den vom VDI 1930 herausgegebenen „Regeln für die Durchflußmessung mit genormten Düsen und Blenden“ angefertigt. Die Druckentnahme entspricht aber nicht den neuen Regeln, die erst nach dem Bau der Apparatur erschienen. Die Druckentnahme erfolgte an je vier um 90° versetzten Anbohrungen von 1,5 mm Ø, die um 14 mm, das ist $\frac{1}{10}$ des Rohrdurchmessers, vor bzw. hinter der Stauscheibe lagen. Der Einfluß der nicht ganz normgerechten Anordnung der Druckentnahmestellen wurde bei der Ermittlung der Durchflußzahl berücksichtigt. Hierzu wurden die Angaben der Abb. 21 und 22 der „Regeln für die Durchflußmessung mit genormten Düsen und Blenden“ VDI-Verlag 1932 verwendet.

5. Der Sammelkasten K ist verhältnismäßig groß, um zu vermeiden, daß die Luft mit einer merkbaren Vorgeschwindigkeit in die Strahldüsen eintritt. Dem gleichen Zwecke dient der im Kasteneinlauf eingebaute Ablenkkörper W.

6. Regulierung des Druckes im Sammelkasten. Um den Druck im Sammelkasten verändern zu können, wurde vor den Saugstutzen des Gebläses ein Absperrschieber gesetzt. Zur Feineinstellung und zum Nachregulieren während des Versuches diente der in das Motorfeld eingeschaltete Schiebewiderstand, der auf dem Instrumententisch stand.

7. Die Strahldüsen D wurden aus leichtflüssigem Metall (Setzmaschinenmetall) in sauber gearbeiteten Holzformen gegossen. Sie brauchten dann nur noch leicht nachgearbeitet zu werden. Es wurden zwei verschiedene Sorten Strahldüsen verwendet (vgl. Abb. 9), die kleinere mit einem Drittel des Mündungsquerschnittes der großen. Die einzelnen Düsen unterschieden sich im Mündungsdurchmesser um weniger als \pm

0,5%. Der Gesamtquerschnitt wurde auf den mittleren Durchmesser bezogen.

8. Einbau der Strahldüsen. Der Blechzylinder A (vgl. Abb. 8) hat Schlitze, in welche die Strahldüsen gesteckt werden. Die Schrägstellung der Düsen erfolgt durch Unterlagringe C von verschiedener Stärke. Die Düsen werden durch Drahtreifen festgehalten und mit Plastilinfüllungen B gegen den Zylinder und die auf dessen Enden sitzenden Holzflanschen F abgedichtet, sie sind also in Plastilin eingebettet.

Die Abb. 10 zeigt den fertig zusammengebauten Düsenkranz vor dem Einbau in den Sammelkasten. Nach Einbau der Düsen wird der ganze Kranz in den Sammelkasten eingeschoben und mit diesem unter Zwischenlage von Gummischnüren G verschraubt. Nach jedem Umbau wurden die Düsenmündungen durch Gummipropfen verschlossen, der Rohrleitungsflansch vom Gebläse gelöst und der Sammelkasten einschließlich Zuleitung einer Dichtigkeitsprobe unterzogen.

9. Mischraum. Um den Einfluß des Abstandes der engsten Stelle des Mischraumes M, nachstehend auch Mischdüse genannt, von den Strahldüsen zu ermitteln, wurde die Mischdüse in dem Blechzylinder A (vgl. Abb. 8) verschiebbar angeordnet. Zur Abdichtung wurde zwischen Mischdüse und Flansch F eine Plastilinwulst H aufgebracht. Acht verschiedene Formen von Mischdüsen wurden ausprobiert, deren innere Konturen in Abb. 11 im Schnitt dargestellt sind.

10. An den Mischraum schloß sich das 4 m lange Tunnelrohr T. Sein Innendurchmesser betrug 20 cm, die Länge war also gleich dem 20fachen Durchmesser, bot also für die Mengemessung bei der Stauscheibe S 2 ausreichende Einlauflänge. Zur Feststellung des Druckverlaufes im Tunnelrohr wurden 4 Anbohrungen J vorgesehen.

11. Zur Messung der durch das Tunnelrohr strömenden Luftmenge dienen drei Ausführungen von Stauscheiben: S 21 mit 122,3 mm, S 22 mit 150,15 mm und S 23 mit 171,4 mm Lochdurchmesser. Die Stauscheiben waren nach den vom VDI 1930 herausgegebenen Regeln hergestellt. Je vier um 90° versetzte Druckentnahmestutzen mit 1,5 mm Bohrung saßen im Abstände 20 mm, das ist $\frac{1}{10}$ des Rohrdurchmessers vor bzw. hinter der Stauscheibe. Der Einfluß der nicht normgerechten

Anordnung wurde bei der Ermittlung der Durchflußzahl berücksichtigt (vgl. Unterabsatz 4).

12. An die Stauscheibe S 2 schloß sich entsprechend den neuen Regeln ein Endrohr L von 1 m — das sind 5 Rohrdurchmesser — Länge.

13. Auf dem Ende des Rohres L saß ein mittels Schnur zusammenziehbare Drosselsack N, zum Zwecke, den im Tunnel durch Wandreibung entstehenden, bzw. infolge von Gegenwinden vorhandenen Gegendruck zu ersetzen und zu regeln. Bei ganz offenem Drosselsack ist nur der Druckverlust durch Wandreibung in dem verhältnismäßig kurzen Tunnelrohr T, sowie der Widerstand der Stauscheibe S 2 zu überwinden, bei zusammengezogenem ein wesentlich vermehrter. Die Versuchseinrichtung entspricht also, je nach Öffnung des Drosselsackes, einem kurzen oder langen Tunnel bzw. keinem oder beliebig starken Gegenwinden.

14. Für den Fall, daß der Strahlapparat große Luftmengen durch das Portal mit ansaugt, konnte die Formgebung des Portales von Wichtigkeit sein. Zu diesem Zwecke wurde bei hier nicht mitgeteilten Vorversuchen vor den Sammelkasten K eine mit Paraffin ausgegossene und ausgedrehte „Portaldüse“ gesetzt. Ein meßbarer Einfluß konnte nicht festgestellt werden. Die Portaldüse wurde daher bei den Hauptversuchen nicht benutzt.

Für den Fall, daß ein großer Teil der durch die Strahldüsen geförderten Luftmenge wieder durch das Portal entweiche (γ klein), konnte es vielleicht von Nutzen sein, den Portalquerschnitt außerhalb des Profils durch eine Blende abzusperrern. Auch in dieser Richtung wurden Untersuchungen angestellt. Die Blende bestand aus einem dünnen Blechring, der im Zylinder A (Abb. 8) verschoben werden konnte.

15. Um zu untersuchen, wie weit Ungenauigkeiten beim Einbau die Güte der Ergebnisse beeinträchtigt, wurden einige Versuche nach Monaten bei völlig neuem Aufbau wiederholt. Die Abweichungen blieben innerhalb der durch die Streuung der Versuchspunkte gegebenen Toleranz.

16. Nach Abschluß der grundsätzlichen Versuche am Kreisrohr wurde die Versuchseinrichtung auf das wirkliche Tunnelprofil umgebaut. Hierüber wird an späterer Stelle berichtet.

b) Gemessene Größen und Meßeinrichtungen (vgl. hierzu Abb. 12)

1. Druck im Sammelkasten p_k . Während jeder Versuchsreihe, d.h. während der stufenweisen Veränderung der Drosselsacköffnung, wurde der Druck im Sammelkasten p_k konstant gehalten. p_k wurde durch das U-Rohr-Manometer U 2 gemessen.

Zum Zwecke der Druckentnahme waren an den Stellen k_1 und k_2 des Sammelkastens (vgl. Abb. 8) Messingplatten mit Druckstutzen in die Wand eingelassen. Bei Gegeneinanderschalten beider Meßstellen wurde die größte Abweichung der Druckanzeige zu 0,25% festgestellt und zwar zeigte k_2 den höheren Druck an. Hier erfolgte dann auch die Druckentnahme p_k . Zur weiteren Prüfung, ob in der Luft vor Eintritt in die Strahlröhren noch eine von der Stauscheibe S 1 herrührende merkbare Vorgeschwindigkeit vorhanden war, wurde durch die Strahldüsen von der Mündung her ein Staurohr gesteckt und so weit wie möglich im Sammelkasten gedreht. Der gemessene Staudruck wurde gegen den der Druckmeßstelle k_2 , also gegen p_k geschaltet. Hierbei war eine meßbare Differenz nicht festzustellen.

2. Druck im Tunnelanfang p_t und Druckverlauf im Tunnelrohr. Im Abschnitt IIb wurde bereits darauf hingewiesen, daß der höchste statische Druck nach Beendigung des Mischvorganges je nach Versuchsbedingungen an einer anderen Stelle des Tunnelrohres lag. Zur Feststellung der Lage dieses Druckmaximums dienten erstens Druckmessungen an den Entnahmestellen J 1 bis J 4 des Tunnelrohres und zweitens weiter unten beschriebene Versuche über den Druckverlauf im Strahlapparat selbst. Daraus ergab sich, daß bei fast allen Versuchen das Druckmaximum mit einer innerhalb der Grenzen der Meßgenauigkeit liegenden Toleranz an der Stelle J 1 lag. Der Druck im Tunnelanfang p_t wurde mittels Alkoholmanometers M 2 gemessen. Der Druckverlauf im Tunnelrohr wurde ebenfalls vermittels Manometers M 2 so bestimmt, daß durch Gegen-schaltung die Differenzdrucke $p_{t_1} - p_{t_2}$, $p_{t_1} - p_{t_3}$, $p_{t_1} - p_{t_4}$ gemessen wurden, wobei p_{t_1} der Stelle J 1, p_{t_2} der Stelle J 2 usw. entspricht.

3. Die Druckdifferenz p_1 an der Stauscheibe S. 1 wurde mittels Alkoholmanometers M 1 gemessen.

4. Die Druckdifferenz p_2 an der Stauscheibe S 2 wurde durch Alkoholmanometer M 2 gemessen.

5. Der Druck vor der Stauscheibe S 1 p_{s_1} wurde mittels U-Rohr-Manometer U 1 bestimmt.

6. Der Druck vor der Stauscheibe S 2 p_{s_2} , der ebenso wie der Druck p_{s_1} zur Bestimmung des spezifischen Gewichtes der durchströmenden Luft bekannt sein mußte, konnte bei der nur wenige mm WS betragenden Differenz sehr angenähert gleich p_1 gesetzt werden.

Alle vorstehend aufgeführten Druckmessungen konnten von den auf dem Instrumententisch vereinigten Manometern zentral abgelesen werden.

7. Die Temperatur der Luft vor der Stauscheibe S 1 wurde sehr angenähert gleich der Temperatur t_k im Sammelkasten gesetzt. Bei der geringen Änderung der Absolutdrucke und bei der fast fehlenden Möglichkeit zur Abkühlung der durch das Gebläse um einige Grad erwärmten Luft auf dem kurzen Wege von der Stauscheibe zum Kasten war dies durchaus zulässig. Die Meßstelle befindet sich an dem in Abb. 8 mit t_k bezeichneten Ort.

8. Die Temperatur der Luft nach Verlassen der Strahldüsen t_a wurde bei einigen Versuchsreihen durch Einführen des an einem Ständer befestigten Thermometers vom Portal her gemessen. Der Unterschied gegenüber der Kastentemperatur t_k war aber so gering, daß auf die Messung im allgemeinen verzichtet wurde.

9. Lufttemperatur im Tunnelrohr t_t wurde beim Austritt aus dem Drosselsack gemessen. Der Temperaturabfall infolge Wärmedurchgang durch das Tunnelrohr wurde in extremen Fällen allerdings bis zu 1° , das ist etwa $1/3\%$ der absoluten Temperatur, festgestellt, aber trotzdem vernachlässigt. Gerade in den ungünstigsten Fällen (sehr starke Drosselung des Luftdurchganges durch das Tunnelrohr) wurde nämlich die Meßgenauigkeit durch sehr kleine Druckdifferenzen an der Stauscheibe S 2 wesentlich stärker beeinflusst.

10. Die Raumtemperatur t_r wurde laufend festgestellt.

11. Barometerstand und -Temperatur wurden zu Beginn und zu Ende jeder Versuchsreihe abgelesen. Der Berechnung wurde der mittlere Wert zugrunde gelegt.

Abb. 12 zeigt eine Fotografie des Instrumententisches mit der näheren Umgebung. Im Hintergrund sieht man den Sammelkasten K. Von links kommt das Zuleitungsrohr mit der Stauscheibe S 1. Aus dem Kasten heraus führt die Mischdüse mit anschließendem Tunnelrohr. Die Aufnahme wurde bereits nach dem Umbau auf das wirkliche Tunnelprofil gemacht. Auf dem Tunnelrohr sieht man die Druckmeßstellen J 1 bis J 4 und die zugehörigen Leitungen. Auf der Einlaufseite des Sammelkastens ist das Thermometer t_k erkennbar, in der rechten oberen Ecke des Kastens sieht man die Leitung der Druckentnahmestelle k_2 . Auf dem Tisch stehen im Vordergrund von links nach rechts der Regulierwiderstand, die Manometer M 1 und M 2. Auf dem Gestell dahinter sind die U-Rohr-Manometer U 1 und U 2 befestigt. Am Ständer daneben ist das Thermometer zur Messung der Raumtemperatur t_r festgeklemmt.

12. Die in den vorstehenden Absätzen 1 bis 11 gekennzeichneten Messungen dienten zur Feststellung der Strahlapparatcharakteristik. Bei vielen Versuchen wurden außerdem noch Untersuchungen über die Druckverteilung im Mischraum angestellt. Wie wir später sehen werden, wird die Meßgenauigkeit durch starke Wirbelbildung im Mischraum beeinträchtigt. Mit der folgenden einfachen Einrichtung (Abb. 13) wurde versucht, Einblicke in die Druckverteilung im Mischraum zu erhalten:

Auf dem Tisch, der den Sammelkasten K trug, stand 25 cm vom Portal entfernt ein Bock A, der zwei Arme B hatte. Durch Bohrungen dieser Arme konnte das Meßrohr C geschoben werden. Der vordere Teil der verwendeten Meßrohre ist in Abb 13 herausgezeichnet. Das gerade Meßrohr a wurde für Druckmessungen in der Achse der Mischdüse benutzt. Das gebogene Rohr b diente zu Messungen an der Mischdüsenwand und in der Nähe der Strahldüsen. Die Schwierigkeit bestand darin, das Rohr b in die Strömungsrichtung zu stellen. Hierauf wird bei Besprechung der Versuchsergebnisse näher eingegangen. Da das Rohr b in jede gewünschte Richtung einzustellen sein mußte, konnte der Bock A auf dem Tisch verschoben werden. Winkelbeilagen und Abstandsplatten D legten die Lage des Bockes fest.

13. Geschwindigkeitsziffer φ der Strahldüsen. Um die Vorgänge der Strahlmischung für sich betrachten zu können,

muß die Geschwindigkeit der Luft am Ende der Strahldüsen bekannt sein. Deshalb wurden in je 2 Versuchsreihen die Geschwindigkeitsziffern der Strahldüsen ermittelt und zwar erstens unter Benutzung der Versuchsapparatur selbst, zweitens durch eine Eichung mit Wasser. Dazu wurde der große Tank der Versuchsanstalt für Strömungsmaschinen benutzt. Bei der Eichung an der Versuchsapparatur selbst ergab sich eine Abnahme der Geschwindigkeitsziffer bei abnehmender Reynoldsscher Zahl (vgl. Abb. 14). Diese Kurven, die den sonst bei Düsenrichtungen im gleichen Gebiet Reynoldsscher Zahlen gefundenen Ergebnissen entsprechen, wurden den Rechnungen zugrunde gelegt. Bei der Wassereichung blieb die Geschwindigkeitsziffer im gleichen Gebiet Reynoldsscher Zahlen konstant und zwar wurde für die 34,3 mm Düse $\varphi = 0,949$ und für die nicht genau ähnliche 19,8 mm Düse $\varphi = 0,954$ festgestellt. Der Unterschied beider Messungen dürfte darin seine Ursache haben, daß bei der Wassereichung der Wasserstrahl in Luft übertrat, während bei der Eichung an der Versuchsapparatur der Strahl im gleichen Medium blieb.

zugeführt werden muß, erhalten wir aus Gleichung (9) (Abschnitt VIa). Die Ergebnisse sind im Diagramm Abb. 66 dargestellt.

Da vorausgesetzt war, daß natürliche Lüftung nicht vorhanden sei, ist der Wirkungsgrad unabhängig von der Lüftungsgeschwindigkeit w_1 (vgl. Abschnitt IIIc). Der Wirkungsgrad η erreicht bei $L = 1,2$ km das Maximum 55,8% und fällt mit zunehmender Tunnellänge bis auf 33,7% bei 10 km. Dementsprechend wächst die erforderliche Leistung stärker als proportional der Länge des Tunnels. Auch aus diesem Diagramm geht die starke Abhängigkeit des Leistungsbedarfes von der Luftgeschwindigkeit im Tunnel hervor.

Es muß noch besonders betont werden, daß Lüftungsanlagen nur für Verhältnisse, die ungefähr dem Kochemer Tunnel entsprechen, zweckmäßig nach dem Vorbild des Modellversuches T 3 zu bauen sind.

Das sind also zweigleisige Tunnels, die etwa 3 bis 5 km lang sind; für eingleisige Tunnel liegt dieser Bereich bei 2,5 bis 4,0 km.

Für Tunnel, die von diesen Angaben abweichen, gilt folgendes:

1. Die Druckanstiegzone liegt nicht mehr in der Nähe der engsten Stelle des nach Modell T ausgeführten Mischraumes. Ist der Tunnel kürzer, so verlagert sich die Druckanstiegzone weiter von den Strahldüsen weg. Die Einschnürung des Mischraumes muß daher weiter in den Tunnel gerückt werden. Das umgekehrte gilt für längere Tunnel. Aufschluß über die richtige Lage des engsten Querschnittes geben die Druckanstiegkurven.
2. Das günstigste Verhältnis des engsten Querschnittes zum Gesamtquerschnitt der Strahldüsen, sowie die zweckmäßige Neigung der Strahldüsen ist von den Bedingungen des einzelnen Tunnels abhängig. Anhand des mitgeteilten Versuchsmaterials ist die Ermittlung leicht möglich.

VII. ZUSAMMENFASSUNG DER ERGEBNISSE

Die Eigenschaften eines Strahlgebläses lassen sich am besten aus Diagrammen erkennen, die den Q-H-Charakteristiken der Turbo-Arbeitsmaschinen entsprechen. Trägt man das Gesamtdruckverhältnis auf, so erhält man als Charakteristik eine einzige Kurve, deren Schnittpunkt mit der Kennlinie der äußeren Widerstände den Betriebspunkt ergibt. Diese Strahlgebläse-Charakteristik ist von der Reynoldsschen Zahl weitgehend unabhängig, sofern die auftretenden Druckdifferenzen so klein sind, daß die Kompressibilität vernachlässigt werden kann.

Maßgebend für die Charakteristik des Strahlgebläses sind vor allem die Querschnittsverhältnisse. Es zeigt sich, daß es bis zu einem gewissen Grade günstig ist, das Verhältnis des Strahldüsenquerschnittes zum engsten Querschnitt im Mischraum groß auszuführen. Bei der Verwendung des Strahlgebläses zur Tunnellüftung ist der Verkleinerung des engsten Mischraum-Querschnittes durch das lichte Profil eine Grenze gezogen. Der Verjüngung des Mischraumes soll die Neigung der am Profillumfang angeordneten Strahldüsen angepaßt werden. Die Entfernung des engsten Querschnittes des Mischraumes von den Strahldüsenmündungen muß entsprechend dem Druck, gegen den die Anlage zu arbeiten hat, bemessen werden. Je größer dieser Gegendruck im Verhältnis zum Gesamtdruck in der Strahldüsenmündung ist, desto näher muß der engste Querschnitt den Strahldüsen liegen. Eine Aufteilung des Antriebsstrahles in allzu viele Einzelstrahlen hat zur Folge, daß die Mischung früher beendet ist. Dadurch ist man gezwungen, die Verjüngung des Mischraumes schroff auszuführen. In weiten Grenzen ist es also zweckmäßig, wenige, dafür aber umso größere Strahldüsen anzuordnen. Bei Strahlgebläsen, die der durch den Bahnbetrieb gebotenen Beschränkung, das lichte Profil freizulassen, nicht unterliegen, wird man daher eine Unterteilung des Antriebsstrahles vermeiden. Eine Unsymmetrie in der Anordnung der Strahldüsen am Profillumfang, die besonders durch

Freilassung des Gleiskörpers bedingt ist, hat keine nachteilige Wirkung.

Es ist gelungen, den Wirkungsgrad von Tunnellüftungsanlagen mittels Strahlgebläses sehr hoch zu treiben. Für den Kochemer Tunnel z. B. ist einschließlich der Ventilatorverluste im Mittel ein Wirkungsgrad von 35% zu erwarten, gegenüber 4 bis 6% der bisherigen Anlagen.

Über das Gebiet der Tunnellüftung hinaus dürfte die Arbeit von allgemeinem Interesse für den Bau von Strahlgebläsen sein. Es sei hier nur auf die Charakteristiken B 1 und B 6 verwiesen, wo beim Förderverhältnis 2,1 bzw. 3,0 ein Wirkungsgrad von 40 bzw. 30% erreicht wurde. In beiden Fällen haben die Wirkungsgradlinien aber noch stark steigende Tendenz in der Richtung größerer Förderverhältnisse. Extrapoliert man die Wirkungsgradlinie B 1 bis zum Förderverhältnis 3, so erreicht man Wirkungsgrade von 44%. Die Wirkungsgrad-Charakteristik B 7 kann man zweifellos mit Sicherheit bis zum Förderverhältnis 2,5 extrapolieren, wo etwa 60% Wirkungsgrad erreicht werden.

Durch planmäßig angelegte Versuche dürfte es daher gelingen, auch bei wesentlich größeren Förderverhältnissen den Wirkungsgrad erheblich zu steigern und damit die Strahlapparate auf ein bisher nicht erreichtes Wirkungsgradniveau zu bringen.

VIII. LITERATUR-NACHWEIS

1. Dolezalek, „Der Eisenbahn-Tunnel“ 1919.
2. Haas, „Die Lüftungsanlage des Kaiser-Wilhelm-Tunnels bei Kochem“, Glasers Annalen 1906, S. 61.
3. Handbuch der Ingenieur-Wissenschaften 1920, Teil I, Bd. 5, IV. Kapitel, 3. Abschnitt, „Tunnelbau“.
4. Hermann R. und Th. Burbach, „Strömungswiderstand und Wärmeübergang in Rohren“. Leipzig 1930.
5. Jakob M. und F. Kretzschmar, „Die Durchflußzahlen von Normaldüsen und Staurändern für Rohrdurchmesser von 100 bis 1000 mm“, VDI-Forschungsheft 311.
6. Kumbbruch, H., „Messung strömender Luft mittels Staugeräten“, VDI-Forschungsheft 240.
7. Lukas, G., „Der Tunnel“ 1920.
8. Maerks, J., „Die Streckenbewetterung durch Lutten“. Z. d. VDI., Bd. 73, 1929, S. 1549.
9. Organ f. d. Fortschr. d. Eisenbahnwesens, Jahrgang 1910, S. 161. „Tunnellüftung nach Saccardo auf den italienischen Staatsbahnen“.
10. Organ für die Fortschritte des Eisenbahnwesens, Jahrg. 1915, S. 105. „Die Lüftungsanlage des Alleghany-Scheitel-Tunnels“.
11. „Regeln für die Durchflußmessung mit genormten Düsen und Blenden“. VDI.-Verlag 1930.
12. Ruppel, G. und H. Jordan, „Die Durchflußzahlen von Normblenden mit und ohne Störung des Zuflusses“. Forschung Bd. 2 (1931), S. 207.
13. Schmitt, C., „Neue Wege, die künstliche Lüftung von Tunnels im Betriebe wirkungsvoll und wirtschaftlich zu gestalten“. Mitt. Aerodyn. Instit. Aachen. TH., Heft 9.
14. Schubert, C., „Lüftung im Tunnelbau“. Dissert. TH. Dresden, 1912.
15. Schumann, R., „Die Tunnellüftungsanlagen der Tauern-Bahn“. Z. d. VDI. Bd. 59 (1915), S. 253.
16. Schütt, H., „Versuche zur Bestimmung der Energieverluste bei plötzlicher Rohrerweiterung“. Mitt. des Hydr. Inst. der TH. München, Heft 1, 1926.
17. Schweizer Bauzeitung, 1899, S. 216. „Lüftungsanlage nach dem System Saccardo für den Gotthard-Tunnel“.
18. Schweizer Bauzeitung, 1926, S. 316. „Zur Lüftung des Tunnels von Mornay“.
19. Spitzgläß, J. M., „Orifice Coefficients“. Am. Soc. Mech. Eng. Transactions 44 (1922) S. 919.
20. Strahl, G., „Untersuchung und Berechnung der Blasrohre und Schornsteine von Lokomotiven“. Organ f. d. Fortschritte des Eisenbahnwesens 1911, S. 321.

21. Strahl, G., „Untersuchung und Berechnung der Blasrohre und Schornsteine von Lokomotiven“. Zeitschr. d. VDI. Bd. 57 (1913), S. 1739.
22. Sutter, K., „Untersuchungen über den Luftwiderstand von Eisenbahnzügen im Tunnel“. Dissertation.
23. Tollmien, W., „Berechnung turbulenter Ausbreitungsvorgänge“. ZaMM. Bd. 6, 1926, S. 468.
24. Tollmien, W., „Luftwiderstand und Druckverlauf bei Fahrt von Zügen in einem Tunnel“. Z. d. VDI. Bd. 71 (1929), S. 199.
25. Trüpel, Th., „Über die Einwirkung eines Luftstrahles auf die umgebende Luft“. Dissertation TH. Karlsruhe 1914.
26. Watson, F. R. B., „The production of a vacuum in an air tank by means of a steam jet“. Engineering 1933, S. 230.
27. Wiesmann, E., „Künstliche Lüftung im Stollen- und Tunnelbau, sowie von Tunnels im Betrieb“. Zürich 1919.
28. Witte, R., „Die Strömung durch Düsen und Blenden“. Forschung Bd. 2, 1931, S. 245.
29. Zeitschrift des Vereins Deutscher Eisenbahnverwaltungen 1900, S. 991. „Über die Lüftung von Tunneln“.
30. Zerkowitz, G., „Beiträge zur Strömungslehre mit besonderer Berücksichtigung der Mischvorgänge“. Zeitschr. f. d. ges. Turbinenwesen 1916, S. 13.
31. Zeuner, G., „Das Locomotiven-Blasrohr“. Zürich, 1863.
32. Zimm, W., „Über die Strömungsvorgänge im freien Luftstrahl“. VDI-Forschungsheft 234.

IX. VERSUCHSÜBERSICHT

Versuchsreihe Nr.	Strahldüse Ø mm	Zahl	Winkel β Grad	Abstand x *) mm	Druck im Sammelkasten mm WS
Mischdüse A.					
A 1	34,3	5	0	0	200
A 2	34,3	10	0	0	200
A 3	34,3	14	0	0	70
A 4	34,3	10	12,5	0	100
A 5	34,3	10	24,5	0	100
Mischdüse B.					
B 1	19,8	10	9,5	13	400
B 2	19,8	10	9,5	13	300
B 3	19,8	10	9,5	13	200
B 4	19,8	10	9,5	13	100
B 5	19,8	10	9,5	13	50
B 6	19,8	5	9,5	13	400
B 7	19,8	15	9,5	13	200
Mischdüse C.					
C 1	34,3	5	6,5	6	200
C 2	34,3	5	12,5	6	200
C 3	19,8	15	6,5	6	200
C 4	19,8	15	12,5	6	200
Mischdüse D.					
D 1	34,3	10	0	6	100
D 2	34,3	10	6,5	6	100
D 3	34,4	10	12,5	6	100
Mischdüse E.					
E 1	34,3	10	0	10	100
E 2	34,3	10	6,5	10	100

*) Abstand x = Abstand des Mischdüsenanfangs von der Kante der Strahldüsenmündung.

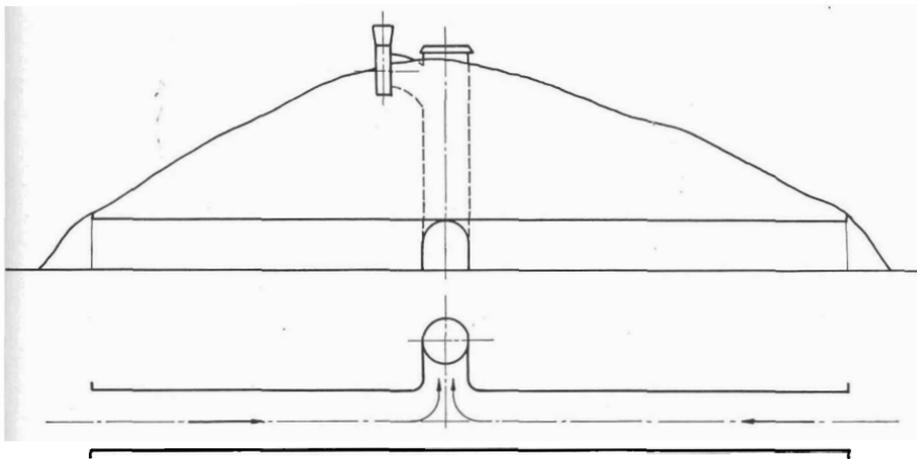


Abb. 1
Schema einer Schachtlüftung

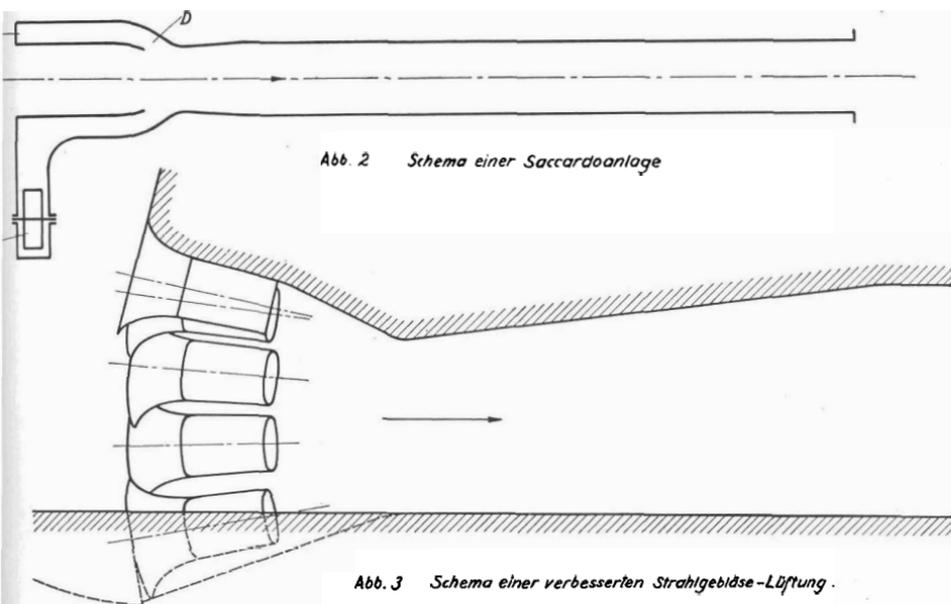


Abb. 2 Schema einer Saccardanlage

Abb. 3 Schema einer verbesserten Strahlgebilde-Lüftung.

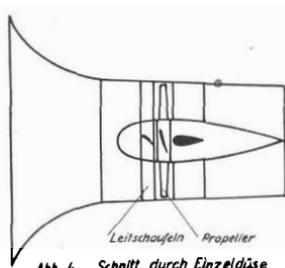
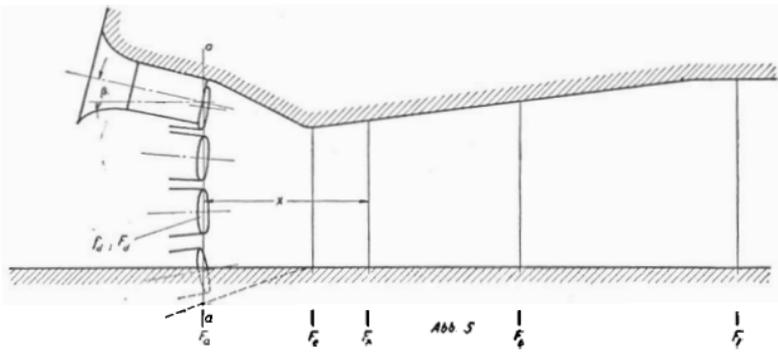
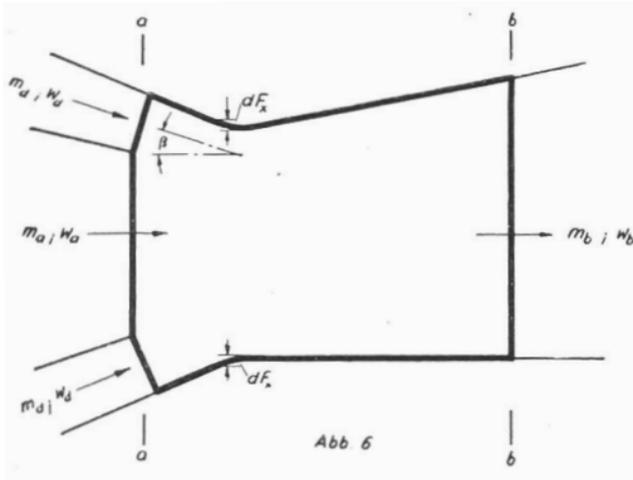


Abb. 4 Schnitt durch Einzeldüse



Bezeichnungen



Anwendung des Impulssatzes

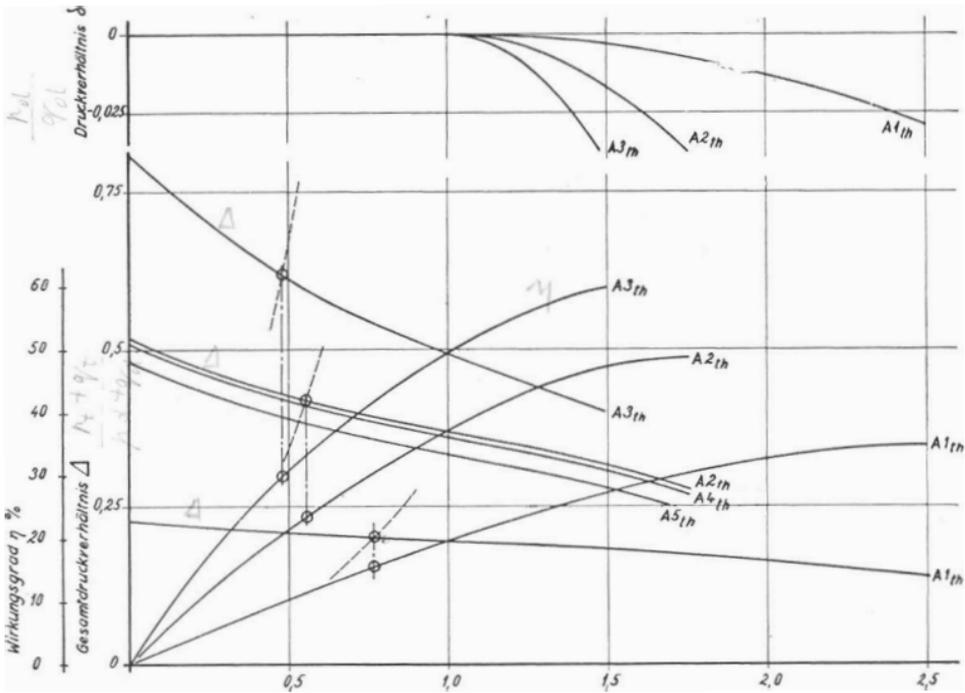


Abb. 7 Theoretisch ermittelte Strahlapparatcharakteristik

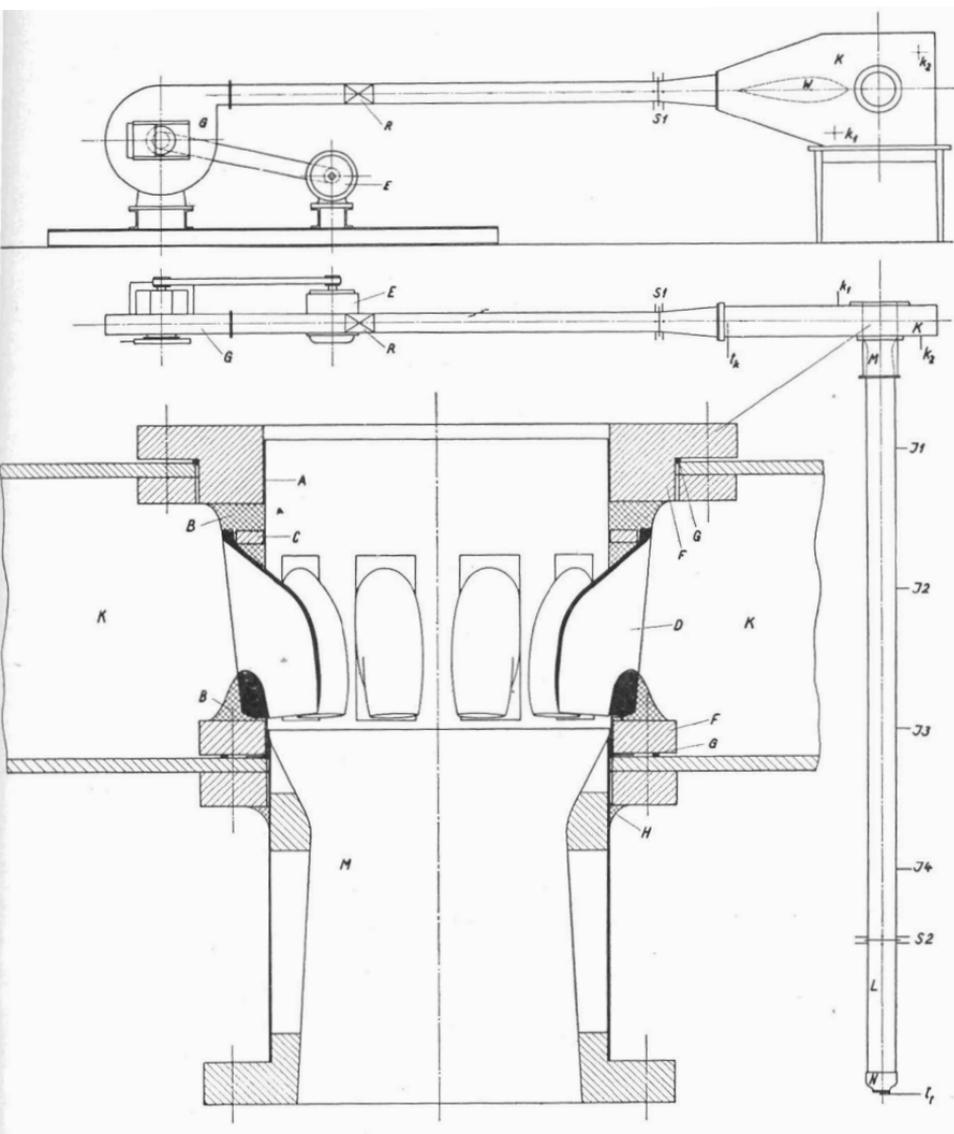


Abb. 8

Versuchsanlage

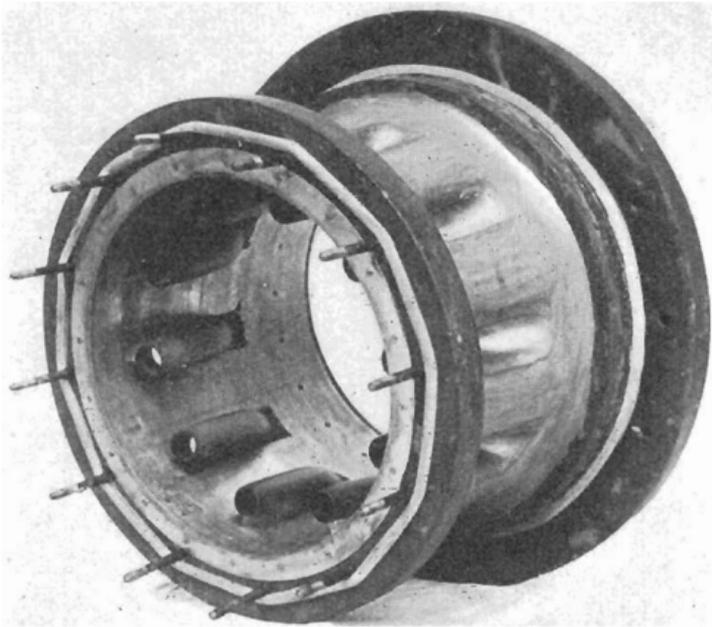
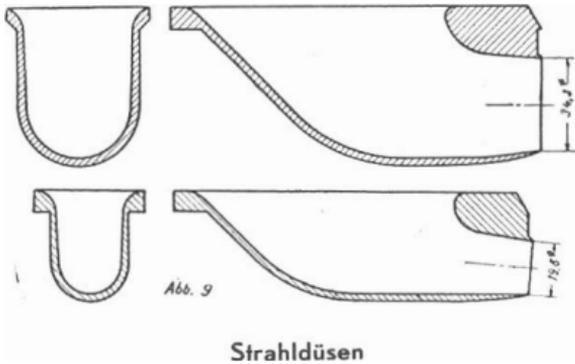


Abb. 10 Düsenkranz

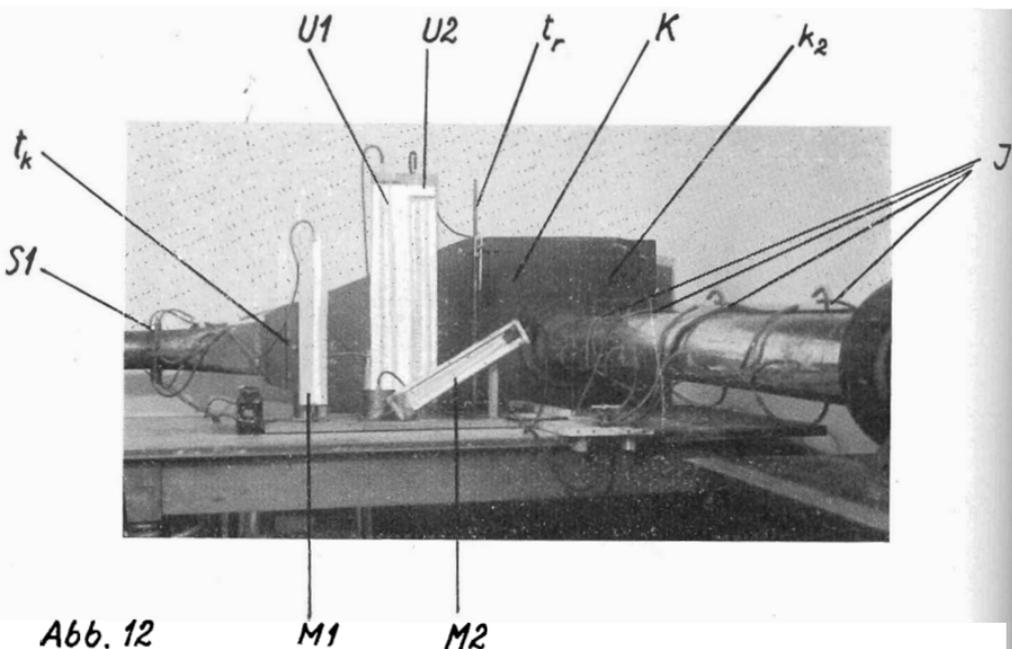


Abb. 12

Versuchsanlage

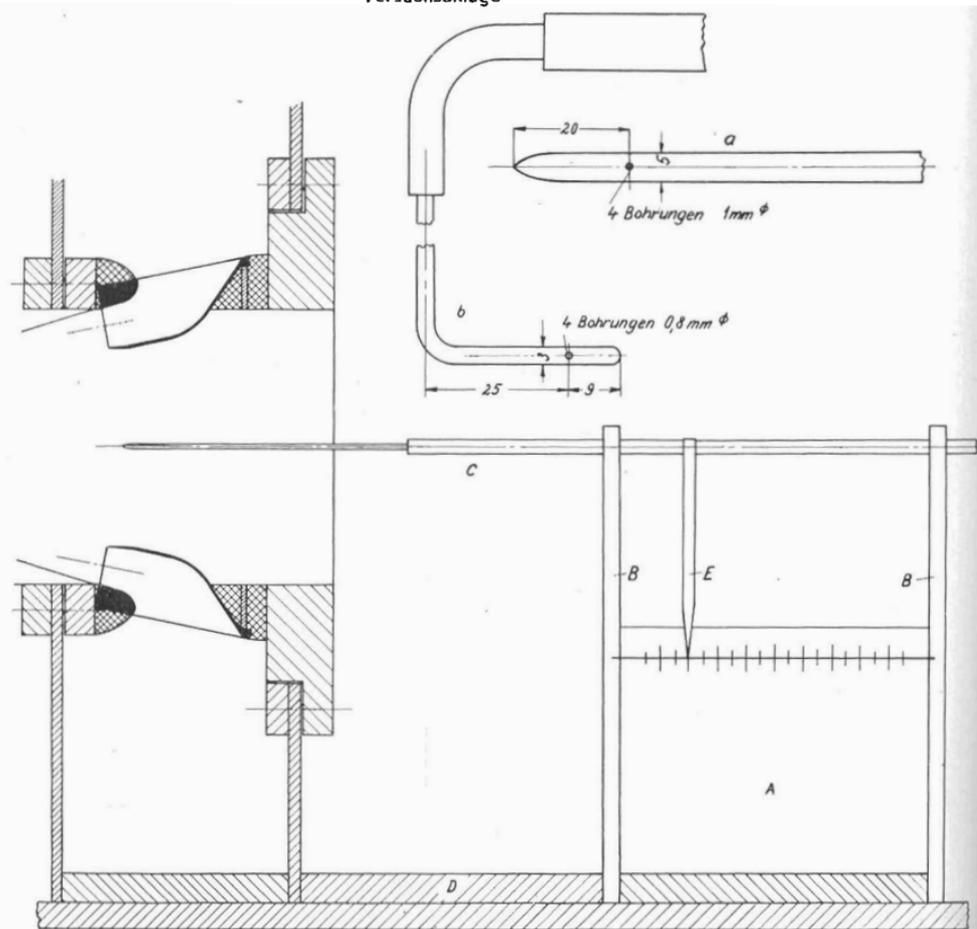
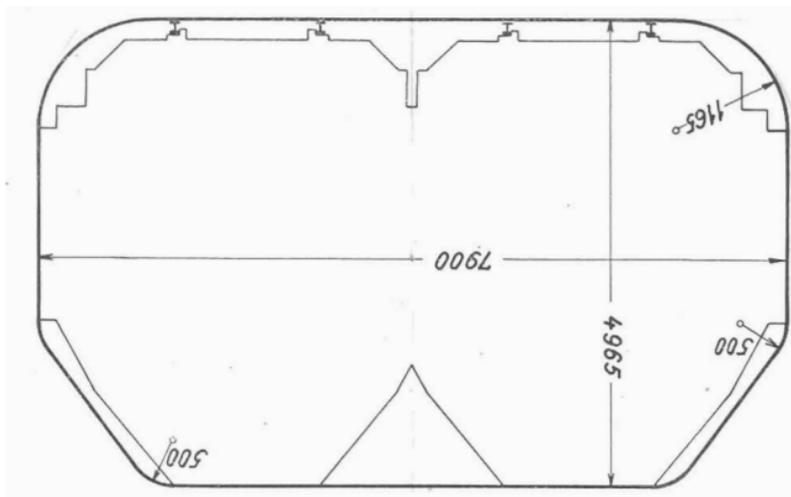


Abb. 13 Einrichtung zur Bestimmung des statischen Druckes im Mischraum

Abb. 60 Umgrenzung des lichten Raumes



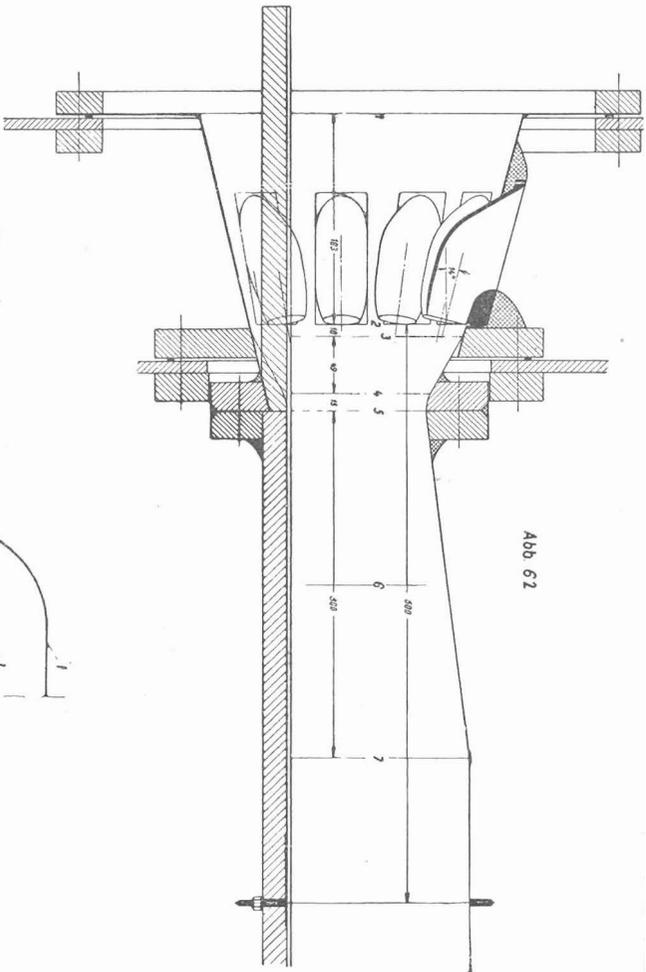
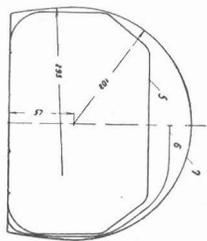
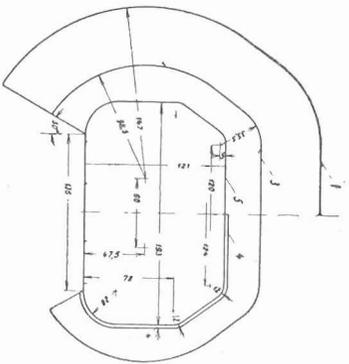
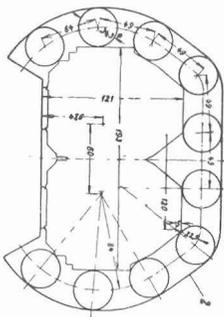


Abb 62



Wirkliches Tunnelmodell