

97 | 1962

## SCHRIFTENREIHE SCHIFFBAU

K. Wieghardt

# Belüftungsprobleme in U-Bahn- und Autotunnels

**TUHH**

*Technische Universität Hamburg-Harburg*

# Belüftungsprobleme in U-Bahn- und Autotunnels

K. Wieghardt, Institut für Schiffbau

Die folgenden Ausführungen stellen keinen Beitrag zur Theorie des Schiffes dar sondern sollen nur zeigen, daß an das Institut für Schiffbau auch schon außerfachliche Probleme herangetragen worden sind, die technisch interessant sind.

Die praktischen Ausgangsfragen bei der U-Bahn waren die, wie man die lästige Zugluft in den Bahnhöfen (in London underground-gale genannt) beseitigen bzw. bei Neubauten vermeiden kann, ferner welche größten Luftkräfte auf das Dienstpersonal in einem engen Tunnel beim Passieren eines Zuges auftreten können.

Bei der Planung des Rendsburger Straßentunnels unter dem Nord-Ostsee-Kanal sowie noch zu errichtenden Straßentunnels in Hamburg war die Frage gerade umgekehrt die nach einer natürlichen oder künstlichen Längs-Belüftung, die eine Anreicherung der zum Teil giftigen Abgase der Wagenmotoren bei allen Verkehrslagen verhindern soll.

Beiden Problemgruppen gemeinsam sind die im folgenden erörterten Hauptfragen: welche Luftströmungen verursachen ein oder mehrere Fahrzeuge in einem Tunnel, und wie groß ist der Luftwiderstand eines Fahrzeugs im Tunnel.

## A. U-Bahn

### 1. Die Luftströmung in einem befahrenen Tunnel

Ein Zug, der in einem langen Tunnel zwischen zwei Bahnhöfen mit konstanter Geschwindigkeit  $u_Z$  fährt, bringt sehr bald nach dem Anfahren die Luft im ganzen Tunnel vor und hinter ihm auf eine mittlere Geschwindigkeit  $u_T < u_Z$  in Fahrtrichtung. Dadurch erhöht er den statischen Luftdruck  $p_E$  in der davorliegenden Haltestelle (am Tunnelende) und erniedrigt den Luftdruck  $p_A$  der vorherigen Station (am Tunnelanfang) gegenüber dem Barometerdruck  $p_0$  außerhalb der Bahnhöfe. Da alle Luftgeschwindigkeiten klein gegen die Schallgeschwindigkeit und alle Drucke klein gegen den Barometerdruck bleiben, kann die Luftdichte  $\rho$  konstant gesetzt werden.

Die Kraft, mit der der Zug die Tunnelluft antreibt, ist offensichtlich zugleich sein Luftwiderstand  $W_L$ , der proportional dem Quadrat der Relativgeschwindigkeit zwischen Zug und Tunnelluft anzunehmen ist:

$$W_L = \frac{\rho}{2} (u_Z - u_T)^2 F_Z c_w$$

Dabei ist  $F_Z$  der Zugquerschnitt und  $c_w$  ein Beiwert, der von der Wagenform und auch noch von der Versperrung des Tunnels durch den Zug abhängt, also von

$$\beta = \frac{\text{Zugquerschnitt}}{\text{Tunnelquerschnitt}} = F_Z/F_T < 1.$$

In der als stationär betrachteten Strömung bewirkt die Antriebskraft  $W_L$  einerseits den Druckunterschied  $p_E - p_A$ , andererseits überwindet sie die Luftreibung an

den Tunnelwänden (Beiwert  $\xi_T$ ). Wie schon W. Tollmien [1] zeigte, ergibt der Impulssatz angewandt auf eine Kontrollfläche zwischen Tunnelanfang und -ende:

$$W_L = \frac{\rho}{2} (u_Z - u_T)^2 F_Z c_w = (p_E - p_A) F_T + \xi_T \frac{\rho}{2} u_T^2 F_T.$$

In die Station  $E$  wird nun je Zeiteinheit die Luftmenge  $Q_T = F_T u_T$  gedrückt (s. Bild 1). Von dieser Menge fließt

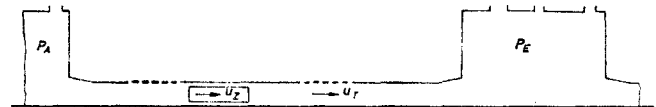


Bild 1 U-Bahn-Zug in langem Tunnel zwischen zwei Stationen

ein kleiner Teil in den weiterführenden Tunnel oder auch in den eventuell vorhandenen Paralleltunnel der Gegenrichtung wieder zurück zur Station 1; der Hauptanteil  $\epsilon_I F_T u_T$  (mit  $\epsilon_I < 1$ ) wird jedoch von der Druckdifferenz  $p_E - p_0$  durch die Bahnhofsausgänge ins Freie gedrückt. Es ist nun zweckmäßig, einen Beiwert  $c_B$  für den Luftwiderstand des Bahnhofs folgendermaßen einzuführen:

$$p_E - p_0 = c_B \frac{\rho}{2} (\epsilon_I Q_T)^2.$$

Denn von primärem Interesse ist hier die entweichende Luftmenge selbst und nicht etwa die Luftgeschwindigkeit, die an verschiedenen Stellen des Bahnhofs verschieden groß ist; allerdings ist dann  $c_B$  keine Dimensionslose, sondern hat die Dimension  $1/m^4$ . Nimmt man der Einfachheit halber an, dieser Bahnhofs-widerstand sei für alle Stationen — sogar für Ein- oder Ausströmung — gleich groß, und die aus der Atmosphäre durch den Bahnhof  $A$  angesaugte Menge sei ebenfalls  $\epsilon_I Q_T$ , so wird dort

$$p_A - p_0 = -c_B \frac{\rho}{2} (\epsilon_I Q_T)^2$$

und damit

$$p_E - p_A = 2 c_B F_T^2 \epsilon_I^2 \frac{\rho}{2} u_T^2.$$

Eine letzte Annahme betrifft die Abhängigkeit des Zugwiderstands von der Versperrung:

$$c_w = c_{w0}/(1 - \beta)^2.$$

Dabei soll  $c_{w0}$  nur noch von der Wagenform selbst abhängen, wie später begründet wird.

Schließlich sei als Abkürzung eine Zahl  $z$  eingeführt:

$$z^2 = (\xi_T + 2 c_B \epsilon_I^2 F_T^2)/c_{w0},$$

die das Verhältnis von Tunnel- plus Bahnhofs-widerstand zum Zugwiderstand charakterisiert. Sie ist so definiert, daß sie von der relativen Zuggröße im Tunnel, also von der Versperrung, nicht abhängt.

Führt man alle diese Beziehungen in den Impulssatz ein, so kann man die Mitführung der Tunnelluft berechnen:

$$u_T/u_Z = 1 / \left( 1 + \frac{1-\beta}{\sqrt{\beta}} z \right)$$

Für einen großen Tunnel wird  $\beta$  klein und ebenso  $u_T/u_Z$ ; in einem engen Tunnel mit  $\beta \rightarrow 1$  wirkt der Zug wie ein Kolben im Rohr und es wird  $u_T \rightarrow u_Z$ .

## 2. Tunnel- und Bahnhofswiderstand

Der Beiwert des Tunnelwiderstandes setzt sich zusammen aus denen für die Eintritts-, Austritts- und Wandreibungsverluste:

$$\xi_T = \xi_{\text{Ein}} + \xi_{\text{Aus}} + \lambda U_T L_T / 4 F_T,$$

mit  $U_T$  = Umfang des Tunnelquerschnitts,  $L_T$  = Tunnellänge. Wenn der Tunnel kurz vor der Station höher und eventuell auch breiter wird, kann man etwa annehmen:  $\xi_{\text{Ein}} = 0,1$  und  $\xi_{\text{Aus}} = 0,5$ . Für glattes Mauerwerk ist der Beiwert der Wandreibung etwa  $\lambda = 0,03$ .

Einen Bahnhof kann man mit einem Kessel (Überdruck  $\Delta p$ ) mit verschiedenen Undichtigkeiten auffassen. Aus dem  $i$ 'ten Ausgang entweiche die Luftmenge  $Q_i$ ; die Luft muß dabei den Widerstand dieses Ausgangs (Beiwert  $c_i$ ) überwinden, es wird also

$$\Delta p = \frac{\rho}{2} c_i Q_i^2.$$

Besteht dieser Ausgang etwa aus einem Gang mit Ecken und Verengungen so addieren sich deren Anteile zum Beiwert  $c_i$ , da ja die konstante Menge  $Q_i$  dort durchfließt.

Denkt man sich die Vielzahl der Ausgänge rechnerisch durch einen einzigen Ausgang (Beiwert  $c_B$ ) ersetzt, durch den die Gesamtmenge  $Q = \sum Q_i$  entweicht, so muß auch für diesen gelten

$$\Delta p = \frac{\rho}{2} c_B Q^2.$$

Aus beiden Gleichungen folgt  $Q_i = Q \sqrt{c_B/c_i}$  und wegen  $Q = \sum Q_i$ :

$$1/\sqrt{c_B} = \sum 1/\sqrt{c_i}.$$

Bei Laminarströmung (wie z. B. im Blutkreislauf) wäre die Durchflußmenge direkt proportional dem Druckgefälle; mit  $\mu$  = Zähigkeit wären hierfür Beiwerte  $k$  so einzuführen, daß

$$\Delta p = \mu k_i Q_i = \mu k Q \quad \text{mit} \quad Q = \sum Q_i$$

und

$$1/k = \sum 1/k_i.$$

Dann berechnete sich also der Endwiderstand  $k$  aus dem der einzelnen, parallel geschalteten Ströme analog zum elektrischen Widerstandsgesetz nach Kirchhoff.

Eine genaue Bestimmung des Bahnhofswiderstandes ist natürlich nur im Modellversuch möglich. Oft genügt aber schon eine angenäherte Ermittlung an Hand von Bauzeichnungen, wenn man auch beim Abschätzen gewisser Einzelwiderstände, wie z. B. von Rolltreppen, nicht allzuviel Skrupel haben darf. Für die Hamburger U-Bahn findet man so Werte von

$$c_B = 0,001/\text{m}^4 \quad \text{bis} \quad 0,02/\text{m}^4.$$

Hohe Werte ergeben sich für „geschlossene“, alte Stationen, niedrige Werte für neue Stationen mit vielen, breiten Ausgängen.

## 3. Luftwiderstand eines Zugs

Vom Zug aus gemessen, ist die mittlere Luftgeschwindigkeit zwischen Zug und Tunnel  $u_{ZT}$  aus Kontinuitätsgründen  $u_{ZT} = (u_Z - u_T) F_T / (F_T - F_Z)$ . Betrachtet man nun nicht den Staudruck der Anströmung  $\frac{\rho}{2}(u_Z - u_T)^2$  weit vor oder hinter dem Zug als maßgebend für den Druck und Reibungswiderstand des Zugs, sondern vielmehr den Staudruck dieser mittleren Geschwindigkeit neben dem Zug selbst, so wird der Luftwiderstand des Zugs

$$\begin{aligned} W_L &= c_w F_Z \frac{\rho}{2} (u_Z - u_T)^2 = c_{w0} F_Z \frac{\rho}{2} u_Z^2 \\ &= c_{w0} F_Z \frac{\rho}{2} (u_Z - u_T)^2 / (1 - \beta)^2, \end{aligned}$$

mit

$$\beta = F_Z / F_T < 1,$$

also  $c_w = c_{w0} / (1 - \beta)^2$ , wobei  $c_{w0}$  nur noch von der Form des Zugs selbst abhängt.

Mit einem entsprechenden Ansatz kann man in guter Näherung den Widerstand eines Siebes aus Runddraht in einem Rohr reduzieren auf den eines einzelnen quer angeströmten Zylinders, sogar einschließlich der Abhängigkeit von der Reynolds-Zahl [2].

Im Fall eines langen Zugs im Tunnel trifft diese Umrechnung allerdings nicht ganz so gut zu. Denn für  $\beta = F_Z / F_T \rightarrow 0$  wird danach  $c_w = c_{w0}$  und das müßte gleich dem Widerstandsbeiwert des Zugs im Freien  $c_{wF}$  sein. Dort besteht der Widerstand nur aus den Druck- und Reibungskräften am Zug; im Tunnel kommt aber noch die starke Erhöhung des Reibungswiderstandes an den Tunnelwänden neben dem Zug dazu. Da nun in den Anfangsformeln nur die Wandreibung des leeren Tunnels in  $\xi_T$  enthalten ist, ist dieser zusätzliche Wandreibungswiderstand dem Beiwert  $c_w$  zuzurechnen. Diesen kann man im Modellversuch leicht dadurch ermitteln, daß man durch einen Modelltunnel mit stehendem Zug Luft durchbläst. Mißt man dabei die Druckdifferenz weit vor und weit hinter dem Modellzug und zieht davon die Druckdifferenz des leeren Tunnels bei derselben mittleren Druckflußgeschwindigkeit  $\bar{u}$  ab, so erhält man aus

$$\Delta p F_T = c_w F_Z \frac{\rho}{2} \bar{u}^2 \quad \text{den gesuchten Beiwert } c_w. \quad \text{So}$$

wurde z. B. für einen Modellzug aus zwei Wagen im einleisigen Tunnel mit  $\beta = 0,55$  gemessen:  $c_w = 9,2$ , woraus  $c_{w0} = (1 - 0,55)^2 c_w = 1,86$  folgt. Leider wurde dieser Modellzug nicht auch noch in unbegrenzter Strömung untersucht. Berechnet man — etwa nach Hütte VB — den Luftwiderstand eines Triebwagens mit einem Anhänger, so erhält man hierfür nur  $c_{wF} \approx 1,1$ . Allerdings haben solche Eisenbahnwagen stärker abgerundete Formen als U-Bahn-Wagen, doch dürfte auch aus dem obigen Grund das so gemessene  $c_{w0}$  stets größer ausfallen als  $c_{wF}$ . Auch die im Modell zu kleine Reynolds-Zahl könnte etwas zu große Widerstandszahlen mitverursachen. Zumindest in erster Näherung wird jedoch die Widerstandserhöhung infolge der Tunnelversperrung durch die obige Formel gut dargestellt.

## 4. Verzweigung des Luftstroms in den Bahnhöfen

Der Einfachheit halber betrachten wir ein Netz von unendlich vielen Bahnhöfen gleichen Luftwiderstands  $c_B$ , die durch gleiche Tunnel mit dem Widerstand  $\xi_T$  verbunden sind. Von der Luftmenge  $Q_T$ , die der Zug vor sich herschiebt, fließt ein Anteil  $\varepsilon_I Q_T$  durch den nächsten

Bahnhof ins Freie; der Rest strömt weiter im Tunnel zur übernächsten Station, wo die Menge  $\varepsilon_{II} Q_T$  durch die Ausgänge abfließt usw. In der  $n$ 'ten und  $(n+1)$ 'ten Station gilt also

$$p_n - p_0 = c_B \frac{\rho}{2} (\varepsilon_n Q_T)^2$$

und

$$p_{n+1} - p_0 = c_B \frac{\rho}{2} (\varepsilon_{n+1} Q_T)^2,$$

so daß

$$p_n - p_{n+1} = c_B \frac{\rho}{2} Q_T^2 (\varepsilon_n^2 - \varepsilon_{n+1}^2).$$

Durch den Tunnel zwischen diesen beiden Stationen fließt noch die Menge  $Q_T (1 - \sum_{k=1}^n \varepsilon_k)$ ; die Druckdifferenz zwischen ihnen wird von der Wandreibung verbraucht:

$$p_n - p_{n+1} = \xi_T \frac{\rho}{2} \frac{Q_T^2}{F_T^2} (1 - \sum_{k=1}^n \varepsilon_k)^2.$$

Zusammen mit dem obigen Ausdruck für  $p_n - p_{n+1}$  und einer Dimensionslosen  $\tau$ , die das Verhältnis Tunnel- zu Bahnhofswiderstand charakterisiert

$$\tau = \frac{\xi_T}{c_B F_T^2}$$

ergibt sich die Rekursionsformel

$$\varepsilon_{n+1}^2 = \varepsilon_n^2 - \tau (1 - \sum_{k=1}^n \varepsilon_k)^2$$

mit  $\sum_{k=1}^{\infty} \varepsilon_k = 1$ .

Die Lösungen für  $\varepsilon_I$ ,  $\varepsilon_{II}$  und  $\varepsilon_{III}$  sind in Bild 2 abhängig von  $\tau$  dargestellt.

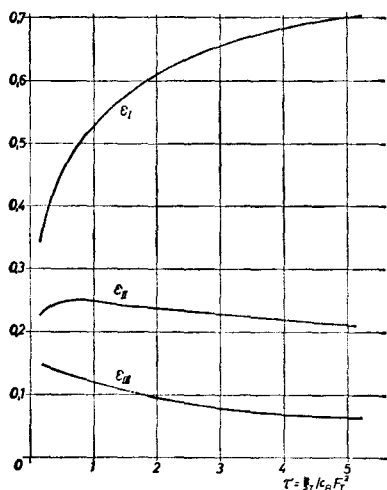


Bild 2 Anteile der Tunnelluft, die aus der ersten, zweiten und dritten Haltestelle vor dem Zug ins Freie strömen, abhängig vom Verhältnis Tunnel- zu Stationswiderstand

Mit diesen Grundlagen kann man nun die erzeugte Luftströmung von Fall zu Fall berechnen. So zeigt es sich z. B., daß die Luftzugbelastung in einer Station größer sein kann, wenn die Tunnels zweigleisig sind, als bei zwei eingleisigen Tunnels. Im engen Tunnel ist zwar die Kolbenwirkung des Zuges ausgeprägter und die Geschwindigkeit der Tunnelluft  $u_T$  größer als im weiten Tunnel, doch kommt es auf die erfaßte Luftmenge an, also auf  $u_T F_T$ . Durch Luftschächte vor den Haltestellen bzw. durch offene Bahnhöfe (mit kleinem  $c_B$ ) kann die Zugluft verringert werden.

Eine Halbierung des Luftwiderstands der jetzigen Wagen erscheint möglich, auch ohne extreme Stromlinienform zu verlangen. Bei Berücksichtigung des mechanischen Rollwiderstands bedeutete das eine Verringerung des Gesamtwiderstands der Züge im Tunnel um etwa 20–30%. Die Steigerung der Rentabilität wäre jedoch noch kleiner, da wegen der kurzen Bahnabstände der Hauptanteil der Leistung zum Anfahren und Abbremsen der Züge verbraucht wird.

## B. Autotunnel

### 5. Die CO-Abgabe von Kraftwagen in Straßentunnels

Der gefährlichste Bestandteil der Autoabgase ist das Kohlenmonoxyd (CO); bereits ein CO-Gehalt der Atmungsluft von 0,04 Volumenprozent ist auf längere Zeit medizinisch ungünstig wirksam. In Autotunnels sollte aber der CO-Gehalt sogar kleiner als 0,02% sein, weil sich sonst eine Sichtverschlechterung durch Bildung eines gelblichen Nebels ergeben kann.

Der leerlaufende Motor eines stehenden Wagens gibt nun etwa 20 Liter/min CO ab, so daß bei einer Verkehrsstockung in der Zeiteinheit eine CO-Menge von

$$Q_{CO} = 3,3 \cdot 10^{-4} N \text{ in m}^3/\text{s}$$

abgegeben wird, wenn  $N$  die Anzahl der Wagen im Tunnel ist. Nimmt man für fahrende Wagen an, daß der Kraftstoffverbrauch und damit die Entstehung von Abgasen proportional der Fahrtgeschwindigkeit  $u_w$  in m/s ist, so entsteht bei gemischtem Verkehr, wenn etwa auf 5 Personenwagen ein Lastwagen kommt, die Menge

$$Q_{CO} = 1,3 \cdot 10^{-4} N u_w [\text{m}^3/\text{s}].$$

Es muß also eine solche Frischluftmenge  $Q$  in jeder Sekunde in den Tunnel geleitet werden, daß der CO-Gehalt der Tunnelluft unschädlich bleibt:

$$co = Q_{CO}/Q \leq 0,02\% = 2 \cdot 10^{-4}$$

Bei Längsbelüftung ist das dann der Höchstwert am Tunnelende, auf den der CO-Gehalt vom Tunnelanfang an linear ansteigt.

Sieht man von der eventuellen, meist vernachlässigbaren, Längsbelüftung durch Wind oder Unterschiede im Barometerdruck an den Tunnelportalen ab, so bleibt außer der künstlichen Längsbelüftung noch diejenige zu untersuchen, die die Fahrzeuge selber in Gang setzen.

### 6. Selbstbelüftung durch den Fahrtwind bei Richtungsverkehr

Bei gleichmäßigem Richtungsverkehr, d. h. wenn Wagen gleicher Geschwindigkeit  $u_w$  in etwa gleichem Abstand  $l$  voneinander auf einer oder zwei Spuren (Spurzahl  $s = 1$  oder  $2$ ) den Tunnel passieren, entsteht wie beim U-Bahn-Zug eine Tunnelluftströmung  $u_T$ , auf die die Gleichungen des Abschnitts 1 angewandt werden können. Die Anzahl der Fahrzeuge im Tunnel ist jetzt  $N = s L_T/l$ , mit  $L_T =$  Tunnellänge, und es wird

$$NW_L = \frac{\rho}{2} (u_w - u_T)^2 F_w c_w N = (p_E - p_A) F_T + \xi_T \frac{\rho}{2} u_T^2 F_T.$$

$p_E - p_A$  wäre der Unterschied der Barometerdrücke bei den Tunnelportalen, den wir aber hier unberücksichtigt lassen wollen. Dann wird das Verhältnis der Geschwindigkeiten der Wagen zu der der Tunnelluft

$$u_w/u_T = 1 + \sqrt{\xi_T F_T / c_w F_w N},$$

und damit der CO-Gehalt der Tunnelluft am Tunnelausgang:

$$co = 1,3 \cdot 10^{-4} \frac{u_w N}{u_T F_T}$$

$$= 1,3 \cdot 10^{-4} \frac{L_T}{F_T} \left[ \frac{s}{l} + \sqrt{\frac{\xi_T F_T}{c_w F_w L_T}} \sqrt{\frac{s}{l}} \right]$$

Über den Widerstandsbeiwert  $c_{wF}$  (im Freien) und die Spantfläche  $F_w$  üblicher Wagen findet man in der Literatur [3] folgende Angaben:

$$\text{PKW } c_{wF} = 0,4 \quad F_w = 2 \text{ m}^2 \quad c_{wF} F_w = 0,8 \text{ m}^2$$

$$\text{LKW } c_{wF} = 0,8 \quad F_w = 6 \text{ m}^2 \quad c_{wF} F_w = 4,8 \text{ m}^2$$

Wenn wieder auf fünf Personenwagen ein Lastwagen angenommen wird, so ist im Mittel

$$c_{wF} F_w = \frac{5}{6} 0,8 + \frac{1}{6} 4,8 = 1,5 \text{ m}^2$$

Die Versperrung  $\beta = F_w/F_T$  ist hier viel kleiner als bei der U-Bahn. Ist z. B.  $F_T = 42 \text{ m}^2$ , so wird für zwei nebeneinander fahrende Personenwagen  $\beta = 2 \cdot 2 \text{ m}^2 / 42 \text{ m}^2 = 0,1$  und die Widerstandsvergrößerung im Tunnel  $1/(1 - \beta)^2 = 1,22$ . Da wir nur mit mittleren Werten rechnen können, nehmen wir an  $c_w F_w = 1,5 \cdot 1,2 = 1,8 \text{ m}^2$ .

Als Beispiel sei die Selbstbelüftung für einen Tunnel mit ein- oder zweisepurigem Richtungsverkehr berechnet; der Querschnitt sei  $F_T = 42 \text{ m}^2$  und der Umfang dieses Querschnitts  $U_T = 27 \text{ m}$ . Für den Tunnelwiderstand sei hier  $\xi_E + \xi_A \approx 1$  und  $\lambda = 0,03$  angenommen, so daß

$$\xi_T = 1 + \lambda \frac{U_T L_T}{4 F_T} = 1 + 0,0048 L_T \quad (L_T \text{ in m})$$

Ist etwa  $L_T = 500 \text{ m}$ , so wird  $\xi_T = 3,4$  und  $co = 15,5 \cdot 10^{-4} (s/l + 0,40 \sqrt{s/l})$ . Das hiernach ausgerechnete Bild 3

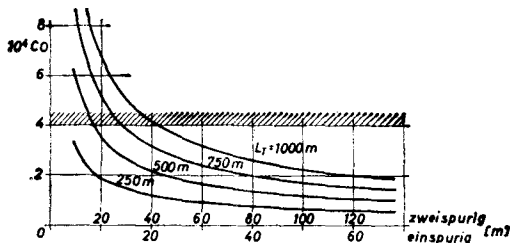


Bild 3 CO-Gehalt am Ausgang eines Tunnels (Länge  $L_T$  in m), der nur durch den Richtungsverkehr (Wagenabstand in m) belüftet wird, unabhängig von der Fahrtgeschwindigkeit

stimmt mit der Erfahrung überein, daß derartige Tunnel bei nicht zu dichtem Verkehr selbsttätig ausreichend belüftet werden, sofern sie nicht länger als etwa 1 km sind.

### 7. Künstliche Längsbelüftung

Eine künstliche Belüftung wird dann unbedingt erforderlich, wenn etwa der Tunnel zeitweilig im Gegenverkehr befahren werden muß, vor allem aber auch dann, wenn ein Unfall eine Verkehrsstockung bewirkt und sich Schlangen stehender Wagen bilden, deren Fahrer den Motor nicht abstellen. Deshalb muß — außer bei extrem kurzen Tunnels — stets die Möglichkeit vorgesehen werden, in den Tunnel künstlich Frischluft zu leiten. Bei Straßentunnels in Großstädten ist dabei übrigens darauf zu achten, ob diese Frischluft nicht schon selbst CO enthält. Bei Inversions-Wetterlagen ist in vielen Straßen in Hamburg stellenweise schon über 0,05 % CO festgestellt worden [4].

Man unterscheidet drei Belüftungsarten. Bei Querbelüftung wird Frischluft aus vielen kleinen Öffnungen (etwa alle 2 m) im Tunnelboden quer zur Tunnelachse eingeblasen; aus entsprechenden Schlitz in der Decke des Fahrerraums wird die verunreinigte Luft abgesaugt. Bei Halbquerbelüftung wird ebenso Frischluft eingeblasen, die verunreinigte Luft muß jedoch im Fahrerraum den Ausweg zu den Tunnelportalen selber finden. Bei Längsbelüftung wird einfach eine ausreichende Strömung in Längsrichtung des Tunnels erzeugt; als Zu- und Ab-Luft-Kanal dient hier der Fahrerraum selbst.

Im Bau und im Betrieb ist offensichtlich die Längsbelüftung am billigsten. Auch im Fall eines Wagenbrands dürfte sie — zumindest bei Richtungsverkehr — von Vorteil sein. Denn die Wagen vor dem Brand werden aus dem Tunnel fahren, während die sich dahinter aufstauenden Fahrzeuge dadurch geschützt werden, daß der Qualm fast vollständig in Fahrtrichtung aus dem Tunnel gedrückt wird. Man rechnet übrigens in den New Yorker Stadttunnels zwischen Manhattan und New Jersey mit etwa sechs leichten Brandfällen je Million Wagen; Brandursache ist dort, nach der Häufigkeit genannt: brennender Bremsbelag, Zigaretten, Vergaserbrand. Tankwagen (Benzin, Propan usw.) sind nicht zugelassen.

Eine Längsströmung im Tunnel kann man in bekannter Weise durch tangenciales Einblasen von Frischluft durch einen Spalt im oberen Teil des Tunnelquerschnitts in der Nähe des Tunnelleingangs erzeugen. Die Bezeichnungen seien:  $\alpha$  = Winkel zwischen Einblasrichtung und Tunnelachse,  $F_S$  = engster Spaltquerschnitt,  $f = F_S/F_T$ ,  $u_A$  = mittlere Luftgeschwindigkeit im Anfangsportal,  $u_S$  = Geschwindigkeit im Spalt,  $u_T$  = mittlere Geschwindigkeit der Tunnelluft nach der Vermischung mit dem Einblasstrahl,  $Q_1 = F_T u_1$  = vom Eingang angesaugte Luftmenge,  $Q_S = u_S F_S$  = eingeblasene Menge,  $Q_T = Q_S + Q_1 = F_T u_T$  = durch den Tunnel strömende Menge,  $\varepsilon = Q_S/Q_T$ ,  $p_A$  = statischer Druck im Anfangsportal,  $p_E$  = statischer Druck im Endportal. Aus der Kontinuität folgt zunächst  $F_T u_T = F_T u_1 + F_S u_S$  oder  $u_1/u_T = 1 - \varepsilon$ . Der Impulssatz, angewandt auf den Tunnelraum zwischen Anfangs- und Endportal, gibt

$$(p_A + \rho u_A^2) F_T + \rho u_S^2 F_S \cos \alpha = (p_E + \rho u_T^2) F_T + \xi_T \frac{\rho}{2} u_T^2 F_T$$

Das Ansaugen der Menge  $F_T u_A$  in das Anfangsportal dürfte praktisch verlustlos vor sich gehen, so daß

$$p_0 = p_A + \rho u_A^2 / 2, \quad \text{mit } p_0 = \text{Barometerdruck}$$

Am Tunnelende löst sich jedoch die Strömung ab und es entsteht ein Freistrahle, so daß hier  $p_E = p_0$ . (Unterschiede des Barometerdrucks zwischen den Portalen seien vernachlässigt, bzw. zum Tunnelwiderstand zugezählt). Im Beiwert  $\xi_T$  ist jetzt außer dem Reibungsverlust an den Tunnelwänden auch der Widerstand von Fahrzeugen enthalten, die — etwa wegen einer Verkehrsstockung — im Tunnel stehen.

Aus dem obigen Impulssatz folgt dann:

$$\xi_T = \varepsilon^2 (1 + 2/f) - 2\varepsilon - 1,$$

oder

$$\varepsilon = \frac{1}{1 + 2/f} \{1 + \sqrt{1 + (1 + \xi_T)(1 + 2/f)}\},$$

mit  $\varepsilon = Q_S/Q_T$  = Einblasmenge zu Tunnelstrom und  $f = F_S/F_T$  = Spaltquerschnitt zu Tunnelquerschnitt.

Als Wirkungsgrad der Anlage kann man definieren:

$$\eta = \frac{\text{Tunnelwiderstand} \times \text{Tunnelluftgeschwindigkeit}}{\text{Gebläseleistung}}$$

Bei Vernachlässigung der Verluste in der Zuleitung folgt für den Drucksprung  $\Delta p_G$ , den das Gebläse erzeugen muß, wenn es aus der Atmosphäre Luft ansaugt und durch den Spalt mit der Geschwindigkeit  $u_S$  in den Tunnel drückt

$$p_0 + \Delta p_G = p_S + \rho u_S^2/2.$$

Der statische Druck an der Einblasstelle  $p_S$  ist praktisch gleich dem im Anfangsportale  $p_S \approx p_A = p_0 - \rho u_A^2/2$ , so daß

$$\Delta p_G = \frac{\rho}{2} (u_S^2 - u_A^2).$$

Die Gebläseleistung ist  $\Delta p_G \cdot u_S F_S$ . Damit wird der Wirkungsgrad

$$\eta = \frac{F_T \xi_T \frac{\rho}{2} u_T^3}{\frac{\rho}{2} u_S F_S (u_S^2 - u_A^2)} = \frac{\xi_T}{\varepsilon [\varepsilon^2/f^2 - (1-\varepsilon)^2]}$$

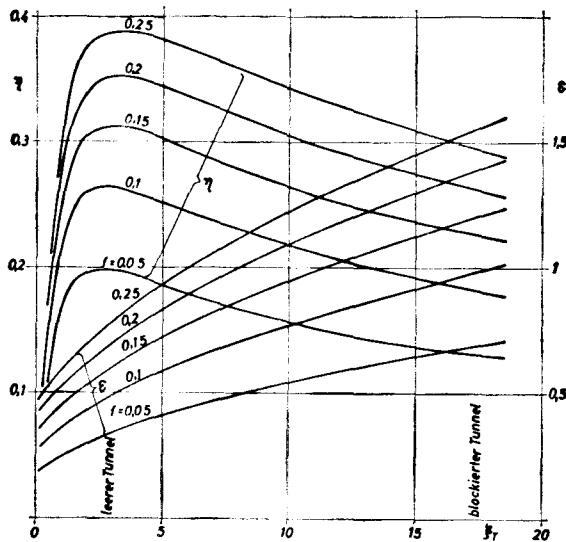


Bild 4 Tangentiales Einblasen einer Luftmenge  $Q_S$  in den Tunnel.  $\varepsilon = Q_S/Q_T$ ,  $Q_T$  = Luftstrom im Tunnel [m³/s]; Wirkungsgrad der Vermischung  $\eta$ ; Widerstandszahl des Tunnels  $\xi_T$ ; Querschnittsverhältnis Einblaspalt zu Tunnel  $f$

In Bild 4 ist  $\varepsilon$  und  $\eta$ , abhängig vom Tunnelwiderstand, für verschiedene Öffnungsverhältnisse des Einblaspaltes aufgezeichnet. Wenn der Tunnel durch stehende Wagen stark blockiert ist, kann es vorkommen, daß ein Teil der eingeblasenen Frischluft gleich zum Anfangsportale ausströmt ( $\varepsilon = Q_S/Q_T > 1$ ). Das Belüftungssystem wird dadurch aber nicht in Frage gestellt, wenn auch der Wirkungsgrad für große  $\xi_T$ -Werte sowieso etwas kleiner ist als für den leeren Tunnel.

### 8. Direkte Längsbelüftung

Noch einfacher und billiger als das Einblasen von Frischluft durch einen Spalt ist es, im Tunnelraum selbst unter der Decke mehrere Gebläse hintereinander anzuordnen und dadurch nötigenfalls eine Längsbelüftung direkt zu erzeugen. Zur Leistungsberechnung betrachten wir, wie in Bild 5, drei Tunnelquerschnitte in der Nähe

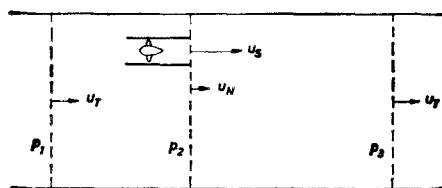


Bild 5 Gebläse im Tunnel

eines solchen Gebläses. Bei 1 und 3 sind die Geschwindigkeit ( $u_T$ ) und der Druck ( $p_1$ , bzw.  $p_3$ ) über dem Querschnitt ausgeglichen. Im ganzen Querschnitt 2 herrscht der Druck  $p_2$ , aber die Geschwindigkeiten sind verschieden groß. Denn hier tritt der Strahl  $u_S$  (Strahlquerschnitt  $F_S$ ) aus dem Gebläse, daneben ist die Geschwindigkeit  $u_N$  nach der Kontinuitätsgleichung

$$u_N/u_T = (1 - \sigma)/(1 - f)$$

mit  $f = F_S/F_T < 1$  und  $\sigma = u_S/u_T > 1$ ; das Mengenverhältnis  $\varepsilon = F_S u_S / F_T u_T = \sigma f$  ist natürlich kleiner als 1. Der Impulssatz für das Vermischungsgebiet zwischen den Querschnitten 2 und 3 gibt

$$F(p_3 + \rho u_T^2) = F p_2 + F_S \rho u_S^2 + (F - F_S) \rho u_N^2,$$

oder

$$(p_3 - p_2)/\rho u_T^2 = f(\sigma - 1)^2/(1 - f).$$

Zwischen 1 und 2 rechnen wir näherungsweise verlustfrei. Die Bernoulli-Gleichung gibt für eine Stromlinie außerhalb des Gebläses

$$p_1 + \frac{\rho}{2} u_T^2 = p_2 + \frac{\rho}{2} u_N^2$$

oder

$$(p_2 - p_1)/\rho u_T^2 = \frac{1}{2} \left[ 1 - \left( \frac{1 - f\sigma}{1 - f} \right)^2 \right];$$

und für eine Stromlinie durch das Gebläse mit dem Drucksprung  $\Delta p_G$

$$p_1 + \frac{\rho}{2} u_T^2 + \Delta p_G = p_2 + \frac{\rho}{2} u_S^2$$

oder

$$\Delta p_G/\rho u_T^2 = (p_2 - p_1)/\rho u_T^2 + (\sigma^2 - 1)/2.$$

Damit kann man nun  $p_3 - p_1$  berechnen; das ist der von einem Gebläse im Tunnel erzeugte Drucksprung nach der Vermischung des Gebläsestrahls mit der Tunnelluft. Im stationären Zustand ist diese Druckdifferenz im Gleichgewicht mit dem Tunnelwiderstand  $\xi_T$  (bezogen auf die Querschnittsfläche); falls  $n$  gleiche Gebläse hintereinander im Tunnel arbeiten, braucht jedes Gebläse nur den Widerstandsanteil  $\xi_T/n$  zu überwinden:

$$\frac{p_3 - p_1}{\rho u_T^2} = \frac{f(\sigma - 1)^2}{1 - f} + \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \left( \frac{1 - f\sigma}{1 - f} \right)^2 = \xi_T/2n$$

Als Wirkungsgrad  $\eta$  der Anlage sei wieder das Verhältnis Tunnelwiderstand mal Tunnelluftgeschwindigkeit zu Gebläseleistung definiert:

$$\eta = \frac{\xi_T \frac{\rho}{2} u_T^2 F_T u_T/n}{\Delta p_G u_S F_S}$$

Für den vorliegenden Zweck genügt es, Näherungen für  $f \ll 1$  zu betrachten. Denn es wird z. B. für ein Gebläse mit 0,5 m Durchmesser in einem Tunnel mit dem Querschnitt  $F_T = 42 \text{ m}^2$   $f = \frac{\pi}{4} 0,5^2/42 \approx 0,005$ . Mit der Abkürzung

$$A = 2 \xi_T/fn$$

wird dann

$$\sigma = u_S/u_T = \frac{1}{2} (1 + \sqrt{1 + A}),$$

oder

$$A = 4\sigma(\sigma - 1),$$

$$\eta = \frac{4}{3 + \sqrt{1 + A} + 2f(1 + \sqrt{1 + A})^2/A}$$

In den Grenzen  $u_T = 2$  bis  $10$  m/s und  $u_S = 20$  bis  $50$  m/s wird  $\sigma = 2$  bis  $25$  und  $A = 8$  bis  $2400$ ; hierfür kann man in  $\eta$  noch das dritte Glied des Nenners vernachlässigen und erhält einfach

$$\eta = 2/(\sigma + 1).$$

Durch passende Wahl der Gebläsezahl  $n$  ist es leicht, die gleichen oder bessere  $\eta$ -Werte zu erzielen wie beim Einblasen durch einen Spalt. Allerdings kommt es bei diesen Anlagen gar nicht so sehr auf Rentabilität an als auf Betriebssicherheit während der verhältnismäßig kurzen Zeiten, in denen sie überhaupt benötigt werden.

### 9. Strömungswiderstand stehender Wagen in einem Tunnel

Jede Belüftungsanlage muß so ausgelegt werden, daß sie auch im denkbar ungünstigsten Fall noch ausreichend Frischluft dem Tunnel zuführt. Dieser Fall tritt offenbar dann ein, wenn am Tunnelende — etwa durch einen Unfall — der Verkehr zum Halten kommt und auf beiden Spuren Wagen mit leerlaufenden Motoren stehen. Bei Längslüftung ist das auch insofern der ungünstigste Fall, als dann der Tunnelwiderstand  $\xi_T$  auf ein Vielfaches des Wertes für den leeren Tunnel ansteigt.

Da über den Widerstand eines so blockierten Tunnels keine Angaben bekannt waren, wurde er in einem Modell des Rendsburger Tunnels (im Maßstab 1:60) ausgemessen. Dieser 640 m lange Tunnel hat zwei zweispurige Röhren für Richtungsverkehr; Tunnelquerschnitt in den Rampen  $F_T = 47$  m<sup>2</sup> und im 140 m langen Mittelteil  $F_T = 37$  m<sup>2</sup>. Nach den Meßergebnissen sind z. B. folgende  $\xi_T$ -Werte im Tunnel zu erwarten:

1. Leerer Tunnel  $\xi_T \approx 2$
2. Eine Reihe von dicht aufgefahrenen 121 Volkswagen ( $F_w = 1,85$  m<sup>2</sup>)  $\xi_T = 4,8$
3. Eine Reihe von aufgefahrenen 59 LKW's ( $F_w = 6,5$  m<sup>2</sup>)  $\xi_T = 12$
4. Eine Reihe von 121 VW's, daneben eine Reihe von 59 LKW's  $\xi_T = 19$
5. Zwei Reihen von je 59 LKW's nebeneinander  $\xi_T = 38$

Das leere Tunnelmodell erwies sich als fast hydraulisch glatt mit  $\xi_T = 1,9$  und  $\lambda = 0,016$ ; die Erhöhung der Wandreibung im verstellten Tunnel wurde rechnerisch geschätzt (bis zu  $\xi_{T \text{ wandr.}} = 4$ ). Vom gemessenen Gesamtwiderstand wurde dieser Beitrag der Wandreibung abge-

zogen und der Rest wie im Abschnitt 3 auf den Staudruck der mittleren Strömung zwischen den Tunnelwänden und den jeweiligen (nebeneinander stehenden) Wagen bezogen:

$$c_{w0} = c_w(1 - \beta)^2 \text{ mit } \beta = F_w/F_T \text{ bzw. } \beta = (F_{w1} + F_{w2})/F_T$$

Diese Formel bewährte sich bei verschiedenen Aufstellungsanordnungen von LKW's und VW's, insbesondere konnte dadurch auch der reduzierte Widerstandsbeiwert  $c_{w0}$  des einzelnen Wagens gefunden werden, der um so kleiner ist, je mehr er durch Wagen vor oder hinter ihm abgeschirmt ist, d. h. je dichter die Kolonne aufgefahren ist. Bild 6, in dem  $c_{w0}$  über dem Verhältnis Wagenlänge/

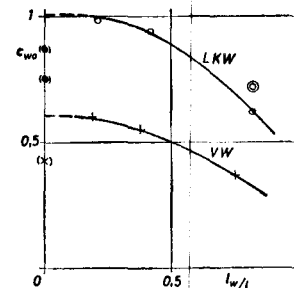


Bild 6 Reduzierter Widerstandsbeiwert eines einzelnen, von hinten angeströmten Wagens;  $l_w$  = Wagenlänge,  $l$  = Wagenabstand. (o) Doppelreihe LKW; (•) und (x) Beiwerte für von vorn angeströmte LKW oder VW im Freien

Wagenabstand =  $l_w/l$  aufgetragen ist, zeigt, daß sowohl bei den LKW's wie bei den VW's in der dicht aufgefahrenen Kolonne jeder Wagen nur noch den halben Widerstand hat, den er in weit aufgelockerter Reihe verursacht.

Hier interessiert nur der Widerstand der von hinten angeströmten Wagen, also nicht der eigentliche Fahrwiderstand  $c_w^+$ . Für diesen gibt B. Eck [3] folgende Werte

Lastwagen	$c_w^+ = 0,75$ bis $0,87$
Volkswagen	$c_w^+ = 0,43$

Diese Zahlen sind um etwa 20% niedriger als für  $c_{w0}$  nach Bild 6 zu erwarten. Abgesehen von der entgegengesetzten Anströmungsrichtung könnten sich Abweichungen dieser Größenordnung auch daraus erklären, daß die Holzmodelle rauher und kantiger waren als wirkliche Wagen oder große Einzelmodelle. Jedoch kann man nun den Widerstand eines beliebigen, blockierten Tunnels wenigstens auf etwa 20% genau abschätzen.

### Schrifttum

- [1] W. Tollmien: Zeitschrift des VDI, 1927
- [2] K. Wieghardt: Aeronautical Quarterly, 1953
- [3] B. Eck: Techn. Strömungslehre, Springer, 1957
- [4] E. Effenberger: Medizinisch-Meteorologische Hefte Nr. 12 (1957), Deutscher Wetterdienst.

Nachtrag zu vorstehendem Aufsatz auf den folgenden Seiten

## Nachtrag

Die obenstehenden Ausführungen waren als Vorausdruck vor dem Symposium gedruckt worden. Vorgetragen wurde jedoch über Messungen, die in der Zwischenzeit durchgeführt worden waren und im folgenden beschrieben werden.

In der Weströhre des Rendsburger Straßentunnels wurde der Luftwiderstand stehender Fahrzeuge ermittelt. Dazu wurde mit Hilfe der Belüftungsanlage eine Längsströmung durch den Tunnel erzeugt und die Differenz der statischen Drucke in zwei Tunnelquerschnitten mit einem Abstand von 460 m gemessen, wenn in dieser „Meßstrecke“ Fahrzeuge in verschiedenen Abständen und Anzahlen aufgestellt waren. Die wichtigsten Tunnelabmessungen sind in Bild 7 angegeben; der Höhenmaßstab ist etwa zehnfach überhöht; der Tunnelquerschnitt in den Rampen beträgt 47,4 m<sup>2</sup> und im Mittelstück 37,2 m<sup>2</sup>. Der Einblaspalt erstreckt sich über den oberen Teil des Rampenquerschnitts.

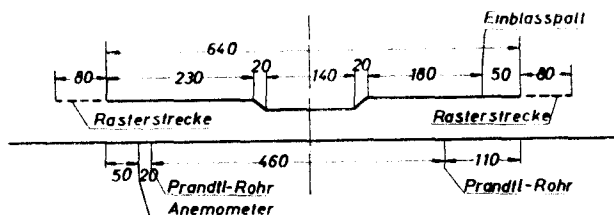


Bild 7

Die mittlere Durchflußgeschwindigkeit  $U_R$  der Luft im Tunnel wurde in einem Querschnitt 50 m vor dem Tunnelende mit zwölf Anemometern ermittelt. Sie betrug im leeren Tunnel rd. 6 m/s; war das 140 m lange Mittelstück mit 16 Lastwagen verstellt, so wurden Werte unter 2 m/s gemessen. Der Unterschied  $\Delta p$  der statischen Luftdrucke vor und hinter den Wagen wurde mit zwei Prandtl-Rohren bestimmt, von denen das erste 60 m hinter dem Einblaspalt der Belüftungsanlage und mindestens 40 m vor dem ersten Wagen stand, während das zweite mindestens 50 m hinter dem letzten Wagen und noch 20 m vor dem Anemometerquerschnitt war. Die Drucke wurden mit Plastikschläuchen von 3 mm Innendurchmesser in den Beobachtungsraum in Tunnelmitte geleitet und ihre Differenz mit einem Prandtl'schen Mikromanometer gemessen, das wegen seines geringen Luftbedarfs hierfür geeigneter war als das leichter ablesbare Betz-Manometer. Die Druckdifferenz betrug stets nur wenige mm Alkohol.

Bei der Auswertung der Messungen im leeren Tunnel wurde die Änderung der Querschnittsfläche und des hydraulischen Durchmessers ( $D_h = 4 \text{ Querschnittsfläche/Umfang}$ ) infolge der Verengung vom Rampenteil zum Mittelstück und Wieder-Erweiterung zum Rampenteil rechnerisch berücksichtigt. Da diese Änderungen ausreichend sanft verlaufen, treten sicher keine Ablösungsverluste (z. B. Diffusionsverluste) auf und es ist sinnvoll, gewogene Mittelwerte für die Reynoldszahl und die Widerstandszahl  $\lambda$  zu bilden. Es ergab sich für die Meßstrecke im leeren Tunnel im Mittel  $Re = 3,14 \cdot 10^6$  und  $\lambda = 0,00914$ .

Andererseits gilt nach Prandtl für hydraulisch glatte Rohre

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda_0}} = 2 \log (Re \sqrt{\lambda_0}) - 0,8.$$

Für  $Re = 3,14 \cdot 10^6$  ergibt sich daraus ein  $\lambda_0$  von 0,00965, also ein Wert, der nicht kleiner, sondern um 5 % größer ist als der gemessene  $\lambda$ -Wert. Der Grund für diese Diskrepanz ist weniger in Meßungenauigkeiten zu suchen als darin, daß sich offenbar die eigentliche, stationäre „Rohrströmung“ im Tunnel erst allmählich innerhalb der Meßstrecke ausbildete. Das erste Prandtl-Rohr stand 60 m, also etwas mehr als acht hydraulische Durchmesser, hinter dem Einblaspalt. Dort war zwar sicher der statische Druck gleichmäßig über den Tunnelquerschnitt verteilt, aber noch nicht die Geschwindigkeit. Die obige Formel bezieht sich jedoch auf Rohrmessungen nach einer so langen Anlaufstrecke, daß die Geschwindigkeitsverteilung sich nicht mehr ändert, — also für eine „ausgebildete“ Rohrströmung.

Der Druckverlust der leeren Meßstrecke war im Mittel  $\Delta p/q_R = 0,78$  mit  $q_R$ -Staudruck der Luft im Rampenquerschnitt  $= \rho U_R^2/2$  und  $\rho =$  Luftdichte. Dieser Wert wurde bei der Auswertung der Messungen mit Wagen vom gemessenen  $\Delta p/q_R$ -Wert abgezogen, um den Widerstand der Wagen selbst zu ermitteln. Es wurde also nicht versucht, die hier nur geringfügige Erhöhung der Luftreibung an den Tunnelwänden in den mit Wagen verstellten Querschnitten besonders zu berücksichtigen. Wie oben wurde dann der auf unbegrenzte Strömung reduzierte Widerstandsbeiwert  $c_{w,0}$  des Einzelwagens berechnet. Da der Widerstand außer von der Wagenart auch davon abhängt, wie dicht die Wagen hintereinander stehen, ist in Bild 8  $c_{w,0}$  über dem Verhältnis Wagenlänge  $\ell_w$  durch Wagenabstand  $\ell$  aufgetragen. Man ersieht daraus, daß die  $c_{w,0}$ -Werte für eine Einzelreihe von Wagen innerhalb der Streuung der Meßpunkte keine systematische Abweichung von denen für eine Doppelreihe erkennen lassen. Auch die Unter-

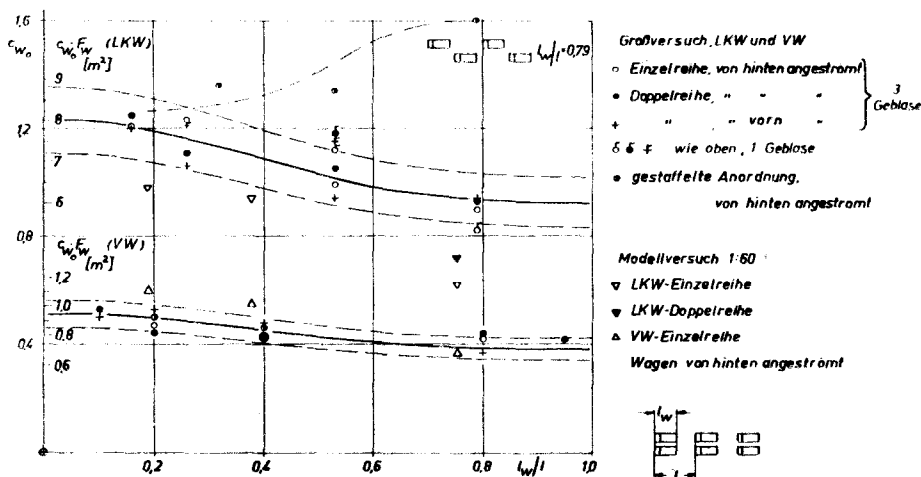


Bild 8 Reduzierter Widerstandsbeiwert des einzelnen Wagens im Tunnel abhängig vom Verhältnis Wagenlänge  $\ell_w$  / Wagenabstand  $\ell$ .



schiede im Luftwiderstand der von vorn oder von hinten angeströmten Wagen betragen nur wenige Prozente und liegen noch im Streubereich dieser Messungen. Deshalb wurden in Bild 8 für Laster und VW zwei mittlere Kurven gezeichnet; fast alle Meßpunkte liegen dann innerhalb des miteingezeichneten Streubereichs von  $\pm 10\%$ .

Bei den Messungen mit den Lastkraftwagen, die freundlicherweise von einer Bundeswehreinheit gestellt wurden, ergibt sich leider eine prinzipielle Unbestimmtheit daraus, daß die 16 Lkw nicht einheitlich waren. Es handelte sich um folgende Typen: 8 Mercedes 5-Tonner, 4 Magirus (Jupiter) 7-Tonner, 2 weitere Magirus 7-Tonner und 2 Faun 15-Tonner. Außerdem waren nicht bei allen Lkw die Planen geschlossen, sondern bei einzelnen Wagen offen, was aus Zeitmangel nicht mehr geändert werden konnte. Die (größte) Querschnittsfläche der verschiedenen Lkw lag zwischen 6,4 und 6,9 m<sup>2</sup>; als gewogenes Mittel ergab sich  $F_w = 6,5 \text{ m}^2$  und als mittlere Wagenlänge  $\ell_w = 7,9 \text{ m}$ . Die Messungen wurden so ausgewertet, als ob alle 16 Lastwagen einheitlich diese Maße gehabt hätten. Für einen solchen „mittleren Lastwagen“ ist nun bei großem Wagenabstand, der größer als 5 bis 6 Wagenlängen ist,  $c_{w0} \approx 1,23$  (bzw.  $c_{w0} F_w \approx 8 \text{ m}^2$ ), während in der dicht aufgefahrenen Kolonne  $c_{w0} \approx 0,93$  (bzw.  $c_{w0} F_w \approx 6,15 \text{ m}^2$ ) wird.

Im Modellversuch hatten die Modell-Lastwagen etwas weniger Widerstand als die wirklichen Laster, wahrscheinlich deshalb, weil diese Holzklötzchen eher völlig dicht und glatt abgeschlossenen Lastwagen entsprachen. Für Einzellastwagen im Freien gibt B. Eck [3]  $c_w$ -Werte zwischen 0,75 und 0,87 an, wobei nach der dortigen Zeichnung die Planen offenbar geschlossen sind. Für Laster mit offenen Planen zitiert S. Hoerner [5] Werte von 1,4. Die vorliegenden Meßwerte um 1,2 erscheinen demnach plausibel.

Interessant ist die starke Widerstandserhöhung, die sich bei den Lastwagen in gestaffelter Aufstellung (drei Meßpunkte, im Diagramm [Bild 8] ganz oben) ergibt. Offenbar verursacht hier die durch die davorstehenden Wagen ungleichförmig gemachte Anströmung besonders große und verlustreiche Nachläufe. Umgekehrt würde natürlich eine in solcher

Anordnung fahrende Kolonne besonders wirksam Tunnelluft mit sich schleppen; ein Ergebnis, das auch rein anschaulich zu erwarten wäre.

Bei den 20 Volkswagen handelte es sich durchweg um geschlossene Wagen (Standard oder Export) mit einer Querschnittsfläche von  $F_w = 1,85 \text{ m}^2$  und einer Länge von  $\ell_w = 4 \text{ m}$ . Bei großem Wagenabstand ergibt sich hier  $c_{w0} \approx 0,51$  (bzw.  $c_{w0} F_w \approx 0,94 \text{ m}^2$ ), in der dicht aufgefahrenen Kolonne dagegen  $c_{w0} \approx 0,39$  (bzw.  $c_{w0} F_w \approx 0,72 \text{ m}^2$ ). Der Widerstandsbeiwert des von vorn angeblasenen VW im Freien ist nach Auslaufversuchen oder Windkanalmessungen (mit rollendem Boden)  $c_w = 0,43$ . Die vorliegenden Meßwerte scheinen daher nur wenige Prozente zu hoch, was sich vielleicht daraus erklärt, daß der summarische Abzug des Druckverlustes infolge der Luftreibung an den Tunnelwänden nicht genau genug war. Im Modellversuch hatten sich noch etwas höhere  $c_{w0}$ -Werte ergeben; vermutlich waren die Holzklötzchen, die den Maßstab 1:60 Volkswagen repräsentierten, zu wenig glatt und abgerundet. Ferner war die Reynolds-Zahl im Modellversuch etwa um den Faktor 18 kleiner als im Großversuch.

Während die  $c_{w0}$ -Werte für die Lastwagen etwa das 2,4-fache ( $= 1,23/0,51$ ) derjenigen für die Volkswagen betragen, ist der Widerstand (oder die Widerstandsfläche  $c_{w0} \cdot F_w$ ) eines solchen Lastwagens etwa 8,4mal so groß wie für einen VW, da einerseits die Form weniger stromlinienförmig ist und andererseits die Widerstandsfläche 3,5mal so groß ist. Nach [5] ist übrigens die Widerstandsfläche eines stehenden, von vorn (oder hinten) angeblasenen Menschen etwa 0,8 m<sup>2</sup>, also fast so groß wie für einen Volkswagen mit  $c_{w0} F_w \approx 0,94 \text{ m}^2$ .

Wenn es auch bedauerlich ist, daß die Streuung der Meßpunkte nicht alle Einzelheiten über den Widerstand stehender Wagenkolonnen erkennen läßt, so ist es doch bemerkenswert, daß die Differenzmessungen der statischen Luftdrucke über eine Entfernung von fast einem halben Kilometer sich so weitgehend auswerten ließen.

(Vorgetragen am 27. Januar 1962)

#### Schrifttum

- [5] S. Hoerner: Fluid-Dynamic Drag, Selbstverlag New York, 1958.