

176 | November 1966

## SCHRIFTENREIHE SCHIFFBAU

K. Wieghardt

### Lüftungsversuche im Straßenbautunnel Klosterwall- Glockengießerwall

**TUHH**

*Technische Universität Hamburg-Harburg*

INSTITUT FÜR SCHIFFBAU DER UNIVERSITÄT HAMBURG

Bericht Nr. 176

Lüftungsversuche im Straßentunnel

Klosterwall-Glockengießerwall

K. Wieghardt

Hamburg, November 1966

Prof. Dr. K. Wieghardt  
Institut für Schiffbau  
Hamburg 33  
Lammersbeth 90

November 1966

Lüftungsversuche im Straßentunnel

Klosterwall - Glockengießerwall.

1. Uebersicht	S.	2
2. Geschwindigkeitsverteilung und Druckdifferenz		3
3. Wagenaufstellung		3
4. Auswertung der Messungen		
a) Allgemeines		4
b) Leerer Tunnel		6
c) Tunnel mit stehenden Wagen		7
5. Korrektur zum Gutachten vom Januar 1963		8
6. Zu den CO- und Sichttrübungs-Messungen		9
7. Schlußfolgerungen		11
7 Bilder		
1 Tabelle		

## 1. Übersicht:

Kurz vor der Eröffnung des Hamburger Straßentunnels Klosterwall-Glockengießerwall konnten am 30. September und 1. Oktober 1966 dessen Belüftungsanlage und die Einrichtungen zur CO- und Sichtmessung erprobt werden. Dazu hatte die Baubehörde dankenswerterweise 20 große Lastwagen, nämlich Müllabfuhrwagen, und 40 PKW (Standard-Volkswagen) mit Fahrern „ausgeliehen“, die sich in verschiedenen Anordnungen in einer Meßstrecke in der Weströhre des Tunnels aufstellten. Ähnlich wie bei Versuchen im Rendsburger Tunnel am 29.11.1961 sollte im Großversuch der Luftwiderstand der Wagen ermittelt werden.

Die durch die Tunnelröhre strömende Luftmenge wurde in einem Querschnitt etwa in Tunnelmitte (zwischen Block 14 und 15) gemessen mit 22 NTC-Kügelchen als Anemometer, die an einem Gerüst aus Stahlrohren (48 mm Ø) befestigt waren. (Die NTC-Kügelchen sind aus einem Material, dessen elektrischer Widerstand ansteigt, wenn es in einem Luftstrom abgekühlt wird.) In Fahrtrichtung dahinter wurden zwei Prandtl-Rohre zur Messung des statischen Drucks im Abstand von 266,5 m (bei Block 14 und 2) in Tunnelmitte und rd. 3,7 m Höhe befestigt; zwischen diesen stellten sich die Wagen auf.

Im Gegensatz zu den Rendsburger Messungen ergaben sich jedoch leider für die Wagen Widerstandszahlen, die stark streuen und deren Absolutwerte nicht genügend zuverlässig sind. Die Krümmung des Tunnels bewirkte nämlich eine asymmetrische Geschwindigkeitsverteilung, d.h. höhere Luftgeschwindigkeit an der Innenwand zwischen den Röhren als an der Außenwand; die Gebläse in den Nischen der Innenwand verstärkten diese Tendenz natürlich noch, vor allem bei den besser meßbaren hohen Geschwindigkeiten, wenn mehrere Lüfter eingeschaltet waren. Da jedoch die Strömungsverteilung nur in einem einzigen Querschnitt gemessen werden konnte, können die Meßdaten doch nur unter der Annahme weiter ausgewertet werden, daß die Strömung näherungsweise eindimensional war wie in einem geraden Rohr.

Eine weitere Komplikation entstand dadurch, daß hier die Lüfter über fast die ganze Tunnellänge verteilt sind. Die Unterbringung in Nischen erweist sich lüftungstechnisch insofern als nachteilig, als die Wirksamkeit der Lüfter um etwa 30 % verrin-

gert ist gegenüber der Anordnung im Fahrraum selbst (wie etwa im Flugplatztunnel). Der Lüfterstrahl hat am Ende einer Nische noch etwa 15 m/s Geschwindigkeit, woraus sich erhöhte Reibungsverluste an den Nischenwänden erklären, ähnlich wie in den inzwischen erschienenen Modellversuchen von J. Kempf (Schweizer. Bauzeitung 83, 1965, S. 47 bis 52).

Die CO-Messungen wurden von anderer Seite durchgeführt unter Berücksichtigung der von uns gemessenen mittleren Luftgeschwindigkeit im Tunnel. Neben der obigen Aussage über die Wirksamkeit der Lüfter in den Nischen ergab sich der Widerstandsbeiwert des leeren Tunnels; er ist höher als erwartet, nämlich  $\xi_0 = 6,5$  statt 5.

### 2. Geschwindigkeitsverteilung und Druckdifferenz:

In den Bildern 1 und 2 sind Beispiele von Geschwindigkeitsverteilungen im leeren Tunnel wiedergegeben. Der Impulsaustausch vom Lüfterstrahl in die Tunnelluft wird durch die Zentrifugalkraft in der ersten Tunnelkrümmung behindert. In der Meßstrecke, die zum Teil noch in der zweiten, schwächeren Krümmung liegt, war die Asymmetrie der Geschwindigkeitsverteilung vermutlich noch etwas stärker ausgeprägt; bei höherer Geschwindigkeit war bereits ohne Meßinstrumente ein stärkerer Luftzug nahe der Innenwand der Röhre zu bemerken als an der Außenwand.

Durch Integration über den Tunnelquerschnitt wurde die mittlere Luftgeschwindigkeit  $u_T$  bestimmt, vgl. Tabelle 1. Dort ist auch die Druckdifferenz  $\Delta p$  der beiden Prandtl-Rohre im Abstand von 266,5 m angegeben. In Fahrt- oder Belüftungsrichtung nimmt der statische Druck ab ( $\Delta p < 0$ ) wegen der Reibungsverluste der Luftströmung an den Tunnelwänden bzw. den Wagen; sind jedoch innerhalb der Meßstrecke  $n_1$  Lüfter eingeschaltet, so wird deren Strahlimpuls (in Bewegungsrichtung) bei konstant bleibender mittlerer Durchflußgeschwindigkeit durch die Tunnelröhre in einen Druckanstieg verwandelt, der manchmal die Reibungsverluste überwiegt, so daß dann  $\Delta p$  positiv wird.

### 3. Wagenaufstellung:

Die Anzahl der Wagen (LW oder PW) und ihre Aufstellung auf

beiden Spuren ist in Tabelle 1 angegeben. Es wurden stehende Kolonnen dargestellt, d.h. die in Fahrtrichtung stehenden Wagen wurden von hinten angeströmt. Es standen entweder je zwei gleiche Wagen (Wagenlänge  $l_W$ ) nebeneinander im Abstand (von Fahrer zu Fahrer)  $l_1$  zum nächsten Wagenpaar, oder zwei Wagenreihen in gestaffelter Aufstellung ( $l_2 =$  Abstand vom Fahrer zum nächsten Fahrer auf der anderen Spur), oder es wurde gemischter Verkehr (LW und PW) dargestellt (Aufstellungsnummern 11 bis 14).

#### 4. Auswertung der Messungen:

##### a) Allgemeines.

Wie schon gesagt, kann die über den Tunnelquerschnitt ungleichförmige Geschwindigkeits- und Druckverteilung, die sich infolge der Krümmungen des Tunnels einstellt und in Längsrichtung noch verändert, bei der eindimensionalen Auswertung nur summarisch berücksichtigt werden. Die mittlere Durchflußgeschwindigkeit  $u_T$  in der Röhre mit gleichbleibendem Querschnitt  $F_T$  muß aus Kontinuitätsgründen natürlich überall gleich sein, da alle Türen während der Messungen geschlossen waren. Mit den Verhältnissen in einem Rohrkrümmer verglichen ist hier das Verhältnis von hydraulischem Durchmesser ( $d_h$ ) zum jeweiligen Krümmungsradius der Röhre so klein, so daß der statische Druck im Querschnitt sicher weit gleichmäßiger verteilt war als die Geschwindigkeit. Eine genauere Auswertung müßte aber die über dem Umfang jedes Querschnitts verschiedene Verteilung der Wandschubspannungen berücksichtigen.

Rechnet man trotz dieser Vorbehalte eindimensional, so gibt der Impulssatz einerseits für die ganze Tunnelröhre und andererseits für die Meßstrecke im Tunnel:

$$n \eta \rho F_S u_S (u_S - u'_T) = (\xi_0 + \Sigma \alpha) \frac{\rho}{2} u_T^2 F_T + \frac{\rho}{2} w^2 F_T \quad (1)$$

und

$$\Delta n \cdot \eta \rho F_S u_S (u_S - u'_T) + \Delta p \cdot F_T = (\Delta \xi + \Sigma \alpha) \frac{\rho}{2} u_T^2 F_T \quad (2)$$

Dabei bedeuten:

$n =$  Anzahl aller eingeschalteten Lüfter der Röhre  
 $\Delta n =$  " der " " " innerhalb  
der Meßstrecke

$\eta$  = Wirkungsgrad eines Lüfters in der Nische = Anteil des Impulses des Lüfterstrahls, der mit der Tunnelluft ausgetauscht wird und diese antreibt.

$\rho$  = Luftdichte  $\approx 1/8 \text{ kps}^2/\text{m}^4$

$F_S$  = Querschnitt des Lüfterstrahls

$F_T$  = Tunnelquerschnitt  $\approx 45 \text{ m}^2$

$u_S$  = Antrittsgeschwindigkeit des Lüfterstrahls = 30 m/s

$F_S u_S$  = Fördermenge eines Lüfters = 8,5 m<sup>3</sup>/s

$u_T$  = mittlere Geschwindigkeit der Tunnelluft

$u'_T$  = Geschwindigkeit in der Umgebung eines Lüfters  $\approx 2,5 \text{ m/s}$

$w$  = rechnerische Geschwindigkeit zur Berücksichtigung des atmosphärischen Gegenwinds (hier  $w^2 = 6$  gesetzt, s.u.)

$\Delta p$  = statische Druckdifferenz vor und hinter der Meßstrecke

$\xi_0$  = Beiwert des Gesamtwiderstandes des leeren Tunnels

$\Delta \xi$  = Beiwert des Reibungswiderstandes der leeren Meßstrecke

$\Sigma \alpha$  = Beiwert des Widerstandes der Wagen, die alle innerhalb der Meßstrecke standen.

Mit diesen Zahlen wird aus Gl. (1) und (2) nach Division mit  $\frac{\rho}{2} F_T$ :

$$10,4 n \eta = (\xi_0 + \Sigma \alpha) u_T^2 + w^2 \quad (3)$$

$$10,4 \Delta n \cdot \eta = (\Delta \xi + \Sigma \alpha) u_T^2 - 16 \Delta p. \quad (4)$$

An beiden Tagen herrschte fast Windstille und ein Anemometer, das auf der Straße oberhalb des Tunnelportals (Deichtorplatz) in rd. 4 m Höhe angebracht und laufend beobachtet wurde, zeigte nur sehr schwachen Wind hauptsächlich aus S und SO an. Offenbar war diese Anzeige jedoch zu stark von der örtlichen Mikrogeographie (City-Hochhäuser, Straßenzüge) beeinflusst. Denn es wurde trotzdem in der nicht benutzten Oströhre des Tunnels ein stetiger Luftzug bemerkt, der während des ganzen zweiten Meßtages gemessen wurde und im Mittel rd. 1 m/s betrug (Meßwerte zwischen 0,6 und 2,1 m/s). Es muß also ein atmosphärisch bedingter Druckunterschied zwischen den Tunnelportalen (vom Deichtorplatz zur Kunsthalle hin)

geherrscht haben von der Größe:

$$\frac{\rho}{2} w^2 = \frac{\rho}{2} (1 \text{ m/s})^2 \cdot \xi_0. \quad (5)$$

Setzt man für die Oströhre  $\xi_0 \approx 6$  (für die Weströhre ergeben die Messungen  $\xi_0 = 6,5$ ), so ergibt sich für diese Korrekturgröße

$$w^2 \approx 6 \text{ m}^2/\text{s}^2, \text{ oder } w \approx 2,45 \text{ m/s}. \quad (6)$$

b) Leerer Tunnel.

Die Meßdaten für den leeren Tunnel in den neun Fällen 1 bis 6 vom 30.9.66 und 39 bis 41 vom 1.10.66 wurden zur Ermittlung von  $\eta$ ,  $\xi_0$  und  $\Delta\xi$  herangezogen mit Hilfe der Gleichungen (3) und (4) mit  $\Sigma\alpha = 0$ . Der Widerstandsbeiwert der Tunnelröhre  $\xi_0$  setzt sich zusammen aus Ein- und Austrittsverlust, wofür wie gewöhnlich 1,5 gesetzt werde, und der Wandreibung:

$$\xi_0 = 1,5 + \lambda L/d_h = 1,5 + 87,1\lambda \quad (7)$$

mit Tunnellänge  $L = 540 \text{ m}$  und  $d_h = 6,2 \text{ m} =$  hydraulischer Durchmesser der Röhre. Der Widerstand der leeren Meßstrecke (Länge  $\Delta L = 266,5 \text{ m}$ ) besteht nur aus Wandreibungsverlusten:

$$\Delta\xi = \lambda \cdot 266,5/6,2 = 43,0\lambda. \quad (8)$$

Leider streuen die Meßdaten einschließlich der  $\Delta p$ -Werte zu stark, als daß zur Bestimmung von  $\eta$  und  $\lambda$  eine Ausgleichsrechnung möglich ist, bei der ja alle Meßwerte gleiches Gewicht haben müßten. Durch systematisches Probieren wurde jedoch gefunden, daß z.B. die Schwankungen im rechnerisch bestimmten  $\eta$ -Wert von einem Mittelwert am kleinsten wurden für folgende Werte:

$$\Delta\xi = 2,5, \quad \xi_0 = 6,5 \quad \text{und} \quad \eta = 0,69. \quad (9)$$

Aus diesen Werten für  $\Delta\xi$  und  $\xi_0$  ergibt sich allerdings ein recht hoher Wert für  $\lambda$  nämlich

$$\lambda = 2,5/43,0 = 0,058_1 \quad \text{bzw.} \quad \lambda = 5/87,1 = 0,057_4. \quad (10)$$

Meistens wird für solche Tunnel ein  $\lambda$  von 0,02 bis 0,03 erwartet; im Gutachten vom Januar 1963 war schon vorsichtshalber, um die damals noch nicht bekannte Akustikdecke mitzuberechnen,

$\lambda = 0,04$  gesetzt, mit  $\xi_0 = 1,5 + 87,1 \cdot 0,04 = 5,0$ . Auch die rechnerisch vernachlässigten Lüfternischen können ein  $\lambda$  von fast 0,06 nicht erklären. Offenbar erhöht jedoch die Ungleichförmigkeit der Luftgeschwindigkeiten über den Querschnitt die Wandreibungsverluste, die proportional dem örtlichen Staudruck in Wandnähe sind. Die in der Literatur bekannten Meßwerte an Rohrkrümmern können hier wegen der kurzen Rohrlänge ( $Länge/d_h = 87$ ) nicht für den ganzen Tunnel übernommen werden; die Turbulenz war vermutlich wegen der Vermischung der Lüfterstrahlen und wegen der hohen Reynolds-Zahlen wesentlich grobballiger als in üblichen Laborversuchen.

Praktisch wichtiger ist jedoch das Ergebnis  $\eta = 0,69$ , das besagt, daß vom Impuls, den der Lüfterstrahl enthält, nur rd. 70 % zum Antrieb der Tunnelluft beitragen. Der Rest wird unnütz in Wandreibungsarbeit verloren, da der Strahl mit noch hoher Geschwindigkeit von der Wand der Nische und dann von der Tunnelwand angesaugt wird (Coanda-Effekt).

Zur Abschätzung von  $\eta$  ist in Gl.(1) für die Zuströmgeschwindigkeit  $u'_T$  in der Umgebung eines Lüfters  $u'_T = 2,5$  m/s gesetzt, da die mittlere Luftgeschwindigkeit im Tunnel bei den Messungen zwischen 2 und 3 m/s lag. Wegen der beschriebenen ungleichförmigen Geschwindigkeitsverteilung im Tunnelquerschnitt wäre zumindest bei den Lüftern hinter der ersten Tunnelkrümmung ein Wert von  $u'_T = 5$  m/s sicher zutreffender. Dann ergäbe sich für  $\eta$  natürlich ein höherer Wert  $\eta_*$ , da ja nur das Produkt  $\eta \cdot (u_S - u'_T)$  in Gl. (1) vorkommt. Mit  $u_S = 30$  m/s wäre dann  $0,69 \cdot (30 - 2,5) = \eta_* \cdot (30 - 5)$  oder  $\eta_* = 0,76$  statt 0,69.

c) Tunnel mit stehenden Wagen.

Aus den Gleichungen (3) und (4) für die ganze Tunnelröhre und für die Meßstrecke folgt durch Subtraktion eine Gleichung, die stets gelten muß unabhängig von der Wagenaufstellung, da das Glied mit  $\Sigma\alpha$  herausfällt:

$$(\xi_0 - \Delta\xi) u_T^2 = 10,4\eta(n - \Delta n) - 16\Delta p - w^2. \quad (11)$$

Aus den oben ermittelten Werten  $\eta = 0,69$  und  $w^2 = 6$  kann hieraus mit  $u_T$  aus der Mittelung der Geschwindigkeitsverteilung und den direkten Meßwerten für  $\Delta p$  die Differenz  $\xi_0 - \Delta\xi$  berechnet werden.

Sie ist in Bild 3 über der Nummer der Wagenaufstellung (vgl. Tabelle 1) aufgetragen; aus den Messungen für den leeren Tunnel war gefolgert worden  $\xi_0 = 6,5$ ,  $\Delta\xi = 2,5$  also  $\xi_0 - \Delta\xi = 4,0$  im Mittel. Die sehr starke Streuung in Bild 3 zeigt, daß eine weitere Auswertung hinsichtlich der Autowiderstände hoffnungslos ist. Rechnet man trotzdem schematisch aus Gl. (3) oder (4)  $\Sigma\alpha$  und daraus die Widerstandsfläche des einzelnen Wagens (also  $(\Sigma\alpha \cdot F_T)/\text{Wagenzahl}$ ), so erhält man meist zu große Werte; daß der Widerstand des einzelnen Wagens in dichter Kolonne kleiner ist als bei größeren Wagenabständen ist freilich auch hier noch deutlich zu erkennen.

#### 5. Korrektur zum Gutachten vom Januar 1963:

Im Gutachten war mit  $\eta = 1$  und  $\xi_0 = 5$  gerechnet worden, während jetzt nach den Messungen  $\eta = 0,69$  (mit  $u'_T = 2,5$  m/s) und  $\xi_0 = 6,5$  zu setzen ist. Dort war für die Widerstandsfläche eines PW  $1,2$  m<sup>2</sup> und für einen LW  $11$  m<sup>2</sup> angenommen, während im Schweizer Experten-Bericht (Mitteilung Nr. 10 des Instituts für Straßenbau an der ETH, Zürich, 1959) auf S. 97 für PW  $1,1$  m<sup>2</sup> und für LW  $3,3$  m<sup>2</sup> empfohlen wird. Nimmt man als Kompromiß jetzt an: für PW  $1,1$  m<sup>2</sup> und für LW  $7,5$  m<sup>2</sup>, so berechnet sich im verstopften Tunnel mit 131 PW und 33 LW (in einer Röhre stehend bei Leergas) die CO-Konzentration  $c_0$  wie folgt:

$$\Sigma\alpha = (131 \cdot 1,1 \text{ m}^2 + 33 \cdot 7,5 \text{ m}^2)/45 \text{ m}^2 = 8,7;$$

für  $n = 9$  wird nach (3)

$$u_T^2 = (10,4 \cdot 9 \cdot 0,69 - w^2)/(6,5 + 8,7),$$

und

$$10^4 c_0 = 6,36/u_T \quad (\text{vgl. S. 7 des Gutachtens vom Jan. 63}).$$

Je nach der rechnerischen Stärke  $w$  des Gegenwindes wird dann:

w	$u_T$	$10^4 \text{CO}$	$10^4 \text{CO}$
m/s	m/s		(alte Rechnung)
0	2,06	3,08	2,66
2	2,00	3,18	2,72
4	1,79	3,56	2,90
6	1,37	4,63	3,35
7	1,03	6,27	3,76
8	0,20	32	4,47

Im leeren Tunnel erzeugen die neun Lüfter, falls kein Gegenwind herrscht, nur eine mittlere Durchflußgeschwindigkeit von

$$u_T = \sqrt{10,4 \cdot 0,69 \cdot 9/6,5} = 3,15 \text{ m/s}$$

statt 4,2 m/s, wie früher geschätzt.

#### 6. Zu den CO- und Sichttrübungs-Messungen:

Die Ergebnisse der CO-Meßanlagen sind in Bild 4 aufgetragen nach Protokollen von Herrn Dipl.-Ing. S. Ruschenburg. Wenn die Lüfter eingeschaltet waren, entstand eine Luftströmung im Tunnel in Fahrtrichtung; die Luft passierte erst die Meßstelle 2, dann die Fahrzeuge, dann Meßstelle 1 und nach weiteren 50 m das Tunnelportal (Deichtorplatz), wie die eingefügte Skizze in Bild 4 zeigt.

Es sind über der Zeit aufgetragen: die CO-Konzentrationen an den Stellen 1 und 2 und die mittlere Tunnelluftgeschwindigkeit  $u_T$ ; negatives  $u_T$  bedeutet, daß der meteorologische Gegenwind eine Tunnelluftströmung entgegengesetzt der (normalen) Fahrt- und Blasrichtung bewirkte, wenn gar keine oder nur ein Lüfter eingeschaltet waren (0 L oder 1 L in Bild 4). Da  $u_T$  nicht kontinuierlich bestimmt werden konnte, hat der gezeichnete Streckenzug reale Bedeutung nur in den Eckpunkten, die den Meßpunkten entsprechen.

Das obere Diagramm zeigt, daß die Dieselmotoren der LKW in der Tat kaum merkbar CO abgeben. Solange nur ein Lüfter eingeschaltet war, wurden die Abgase ins Tunnelinnere gedrückt, an der Meßstelle 2 vorbei. Die minimale Konzentration an Stelle 1 (rd. 5 ppm) dürfte auf Restbestände von CO vom Rangieren oder vielleicht auch in der Straßenluft zurückzuführen sein. Bei

$u_T$  etwa gleich  $- 0,5$  m/s, wird  $u_T \cdot F_T = 0,5 \cdot 45 = 22,5$  m<sup>3</sup>/s Frischluft zugeführt; einer Konzentration von  $10$  ppm =  $10 \cdot 10^{-6}$  bei Stelle 2 entspricht nun eine CO-Produktion  $x$  eines der 20 LKW von  $x \leq \frac{22,5}{20} \cdot 10 \cdot 10^{-6} \approx 10^{-5}$  m<sup>3</sup>/s  $\approx 0,04$  m<sup>3</sup>/h, worauf hier natürlich nur der Größenordnung nach geschlossen werden darf. Rechnerisch setzt man  $x = 1,3$  m<sup>3</sup>/h, um den Frischluftbedarf wegen der anderen Abgase der Dieselmotoren in etwa zu berücksichtigen.

Das untere Diagramm für die PKW ist aufschlußreicher, da diese weit stärkere CO-Mengen abgeben. Etwa in der Zeit von 12<sup>20</sup> bis 12<sup>30</sup> drückte der schwache Gegenwind die Abgase ins Tunnelinnere, die Konzentration an Stelle 2 stieg stark an und fiel bei 1 vom früheren Wert ab. Nach Einschalten von 4 Lüftern wurde dieser Pfropfen verseuchter Tunnelluft wieder verdünnt und zur Stelle 1 geschoben. Danach, etwa um 12<sup>40</sup> wurde für kurze Zeit ein näherungsweise stationärer Zustand erreicht:  $u_T \approx 1,5$  m/s und  $c_0 \approx 70 \cdot 10^{-6}$  bei Stelle 1. Daraus folgt für die CO-Abgabe eines der 40 Volkswagen:  $x = \frac{1,5 \cdot 45}{40} \cdot 70 \cdot 10^{-6} = 1,2 \cdot 10^{-4}$  m<sup>3</sup>/s =  $0,43$  m<sup>3</sup>/h. Nach den Angaben des Schweizer Expertenberichts wurde im Gutachten vom Januar 1963 für einen durchschnittlichen PKW  $x = 0,46$  m<sup>3</sup>/h angenommen. Da jedoch bei unseren Messungen zu dieser Zeit des Versuchs (um 12<sup>40</sup>) die Fahrer mehrere Minuten hindurch Vollgas im Leerlauf gaben, ist diese Zahl  $0,46$  m<sup>3</sup>/h sicher wesentlich zu hoch und die darauf beruhenden Berechnungen zu vorsichtig. Dies wird auch von den langjährigen Erfahrungen von Herrn Ruschenburg durchaus bestätigt.

Das darauf folgende Abschalten der Lüfter bewirkte wiederum ein starkes Ansteigen der CO-Konzentration bei Stelle 1, da die dicht stehenden Volkswagen einen Pfropfen mit örtlich starker Luftverseuchung erzeugten, sowie die Tunnelgeschwindigkeit klein wurde. Die schließlich wieder eingeschalteten acht Lüfter verdünnten den CO-Gehalt der Tunnelluft dann rasch.

Die Ergebnisse der Sichttrübungs-Messung sind von Herrn Dipl.-Ing. Herzke zusammengefaßt worden und hier in Bild 5 wiedergegeben. Danach erzeugten die 20 dicht aufgefahrenen Müllwagen bei verstärktem Leerlauf und praktischer Windstille etwa dieselbe Trübung wie 40 Volkswagen mit Vollgas im Leerlauf, wobei hier aber drei Lüfter liefen. Beidemal wurde eine Extinktion von rd.  $0,15$  erreicht. Diese Zahl wird veranschaulicht durch die Photographien, Bild 6 und 7. Man sieht, daß selbst bei diesem extremen Versuch keine Fahrtbehinderung durch Sichtverschlechterung fest-

zustellen war, obwohl Atem- und Geruchsorgane durchaus gereizt wurden. Andererseits hat im Fall der LKWs die Sichtmeßanlage die Abgase durchaus bemerkt, während die CO-Meßanlage sozusagen stumm blieb.

Wenn auch eine solche Anhäufung von Dieselmotoren im Stadtverkehr recht unwahrscheinlich ist, könnte man sich die Regelung der Lüfter etwa folgendermaßen vorstellen. Wenn entweder die CO-Konzentration 150 (oder 200) ppm oder die Extinktion 0,07 (oder 0,1) überschreitet, werden drei Lüfter eingeschaltet. Wenn nach zwei Minuten diese Grenzwerte unterschritten sind, werden die Lüfter wieder abgeschaltet, im andern Fall alle neun Lüfter eingeschaltet. Nach weiteren zwei Minuten werden entweder alle Lüfter ausgeschaltet oder Alarm gegeben und der Tunnel durch Ampeln gesperrt.

#### 7. Schlußfolgerungen:

Die in diesem Tunnel aus Platzgründen notwendige Unterbringung der Längslüfter in Nischen bringt eine Verschlechterung des Wirkungsgrades (hier um rd. 30 %) mit sich. Sie könnte durch eine Haube oder Schaufel am Lüfter verringert werden, die den Strahl etwa um  $10^\circ$  in den Tunnel hinein richtet (vgl. J. Kempf, Schweiz. Bauzeitung 83, 1965, S. 47).

Im einem gekrümmten Tunnel ist die Reibungszahl  $\lambda$  höher anzusetzen als aus der Literatur über Rohrkrümmer (bei ausgebildeter Strömung und kleinerer Reynoldszahl) zu erwarten ist. Ferner kann dieser Tunnel - wegen der Ungleichförmigkeit der Geschwindigkeitsverteilung nicht als Windkanal benutzt werden, um Wagenwiderstände zuverlässig zu messen; der gerade Rendsburger Tunnel ist ihm in dieser Hinsicht überlegen.

Trotz dieses Schönheitsfehlers treten keine größeren Wirbel oder gar Rückströmungen auf. Auch Brandversuche am 22.11.1966 zeigten, daß ein Rauchpilz nahezu als geschlossener Pfropfen durch den Tunnel geführt wird; durch Umschalten der Blasrichtung der Lüfter konnte er sogar wieder zurückbewegt werden. Aufschlußreich und für einen Brandfall vielleicht wesentlich - war es, daß die Luftsäule im Tunnel dann erst nach etwa zwei Minuten zum Stillstand kam und die Richtung umkehrte.

Die Messungen im fertigen Tunnel zeigen, daß das Gutachten vom Januar 1963 etwas zu optimistisch war; die erreichbaren Luftgeschwindigkeiten sind etwas kleiner als erwartet. Trotzdem ist die Anlage ausreichend selbst für den mit stehenden Wagen verstopften Tunnel, solange der atmosphärisch bedingte Gegendruck nicht zu groß wird, d.h. solange die rechnerische Geschwindigkeit  $w < 6 \text{ m/s}$  bleibt.

Bild 6. Tunnel ohne Abgase (Zeit 8<sup>55</sup>)

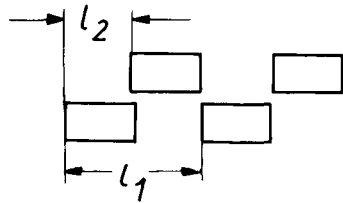
Bild 7. Starke Sichttrübung durch Dieselabgase,  
Extinktion rd. 0,15, ohne Belüftung (Zeit 8<sup>46</sup>)

Tabelle 1

Versuch Nr.	n	$\Delta n$	$u_T$ m/s	$\Delta p$ mmWS	Wagen- aufst.	LW/PW	$L_1$ m	$L_2$ m
30.9.1966								
1	9	5	2.82	-	} Leerer Tunnel			
2	8	5	2.79	-				
3	4	2	2.03	-0.52				
4	6	5	2.48	-0.87				
5	8	5	2.79	-0.95				
6	9	5	2.92	-1.05				
1.10.1966								
3	5	2	1.48	+0.22	2	20/0	9	0
4	8	5	2.11	+0.11	2	20/0	9	0
5	8	5	1.97	-0.03	3	20/0	11.25	0
6	8	5	1.92	+0.31	4	20/0	18	0
7	8	5	2.03	+0.50	5	20/0	18	9
8	8	5	1.97	-0.15	6	17/0	27	13.5
9	8	5	2.23	-0.12	7	10/0	45	0
10	8	5	2.44	-0.28	8	10/0	45	22.5
11	8	5	-*	-0.35	9	6/0	94.5	0
12	8	5	-	-0.57	10	4/0	99	49.5
13	8	5	2.21	-0.11	11	10/40	-	-
14	8	5	2.46	-0.26	12	6/26	-	-
15	8	5	2.53	-0.28	13	4/16	-	-
16	8	5	2.73	-0.47	14	2/7	-	-
17	8	5	2.44	-0.67	15	0/40	4.5	0
18	4	2	1.94	-0.26	15	0/40	4.5	0
19	4	2	1.89	-0.28	15	0/40	4.5	0
20	4	2	1.83	-0.39	16	0/40	6.75	0
21	8	5	2.55	-0.57	16	0/40	6.75	0
22	8	5	2.62	-0.66	17	0/40	6.75	2.25
23	4	2	1.90	-0.30	17	0/40	6.75	2.25
24	8	5	2.50	-0.65	18	0/40	9	0
25	4	2	2.00	-0.20	18	0/40	9	0
26	3	0	1.51	+0.50	18	0/40	9	0
27	3	0	1.37	+0.52	18	0/40	9	0
28	-	-	-	-	-			
29	8	5	2.22	-0.31	19	0/40	9	4.5
30	4	2	1.50	-0.36	19	0/40	9	4.5
31	4	2	1.56	-0.44	20	0/20	22.5	0
32	8	5	2.47	-0.92	20	0/20	22.5	0
33	8	5	2.49	-0.85	21	0/20	22.5	11.25

\* Oszillograph ausgefallen

Versuch Nr.	n	n	$u_T$ m/s	$\Delta\rho$ mmWS	Wagen- aufst.	LW/PW	$L_1$ m	$L_2$ m
34	4	2	1.46	-0.46	21	0/20	22.5	11.25
35	4	2	1.70	-0.53	22	0/10	49.5	0
36	8	5	2.59	-0.94	22	0/10	49.5	0
37	8	5	2.74	-0.93	23	0/ 9	49.5	24.75
38	4	2	1.57	-0.40	23	0/ 9	49.5	24.75
39	4	4	1.83	-0.93	-	} Leerer Tunnel		
40	3	0	1.67	+0.16	-			
41	8	5	2.68	-1.13	-			



# Strassentunnel Klosterwall - Glockengießerwall

## Gerüst für Lüftungsmessungen

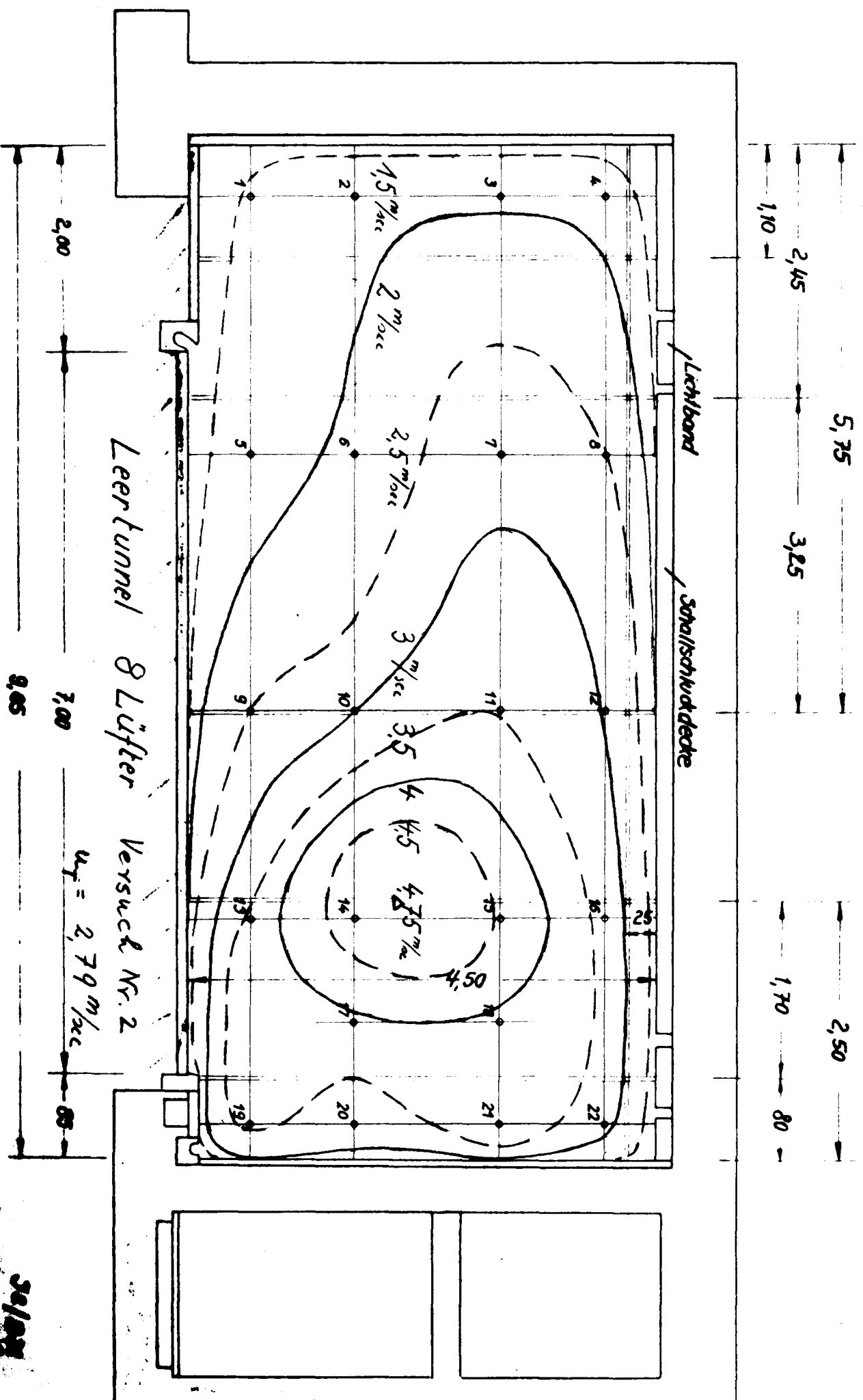


Bild 1.

30/107

# Strassentunnel Klosterwall - Glockengießerwall

## Gerüst für Lüftungsmessungen

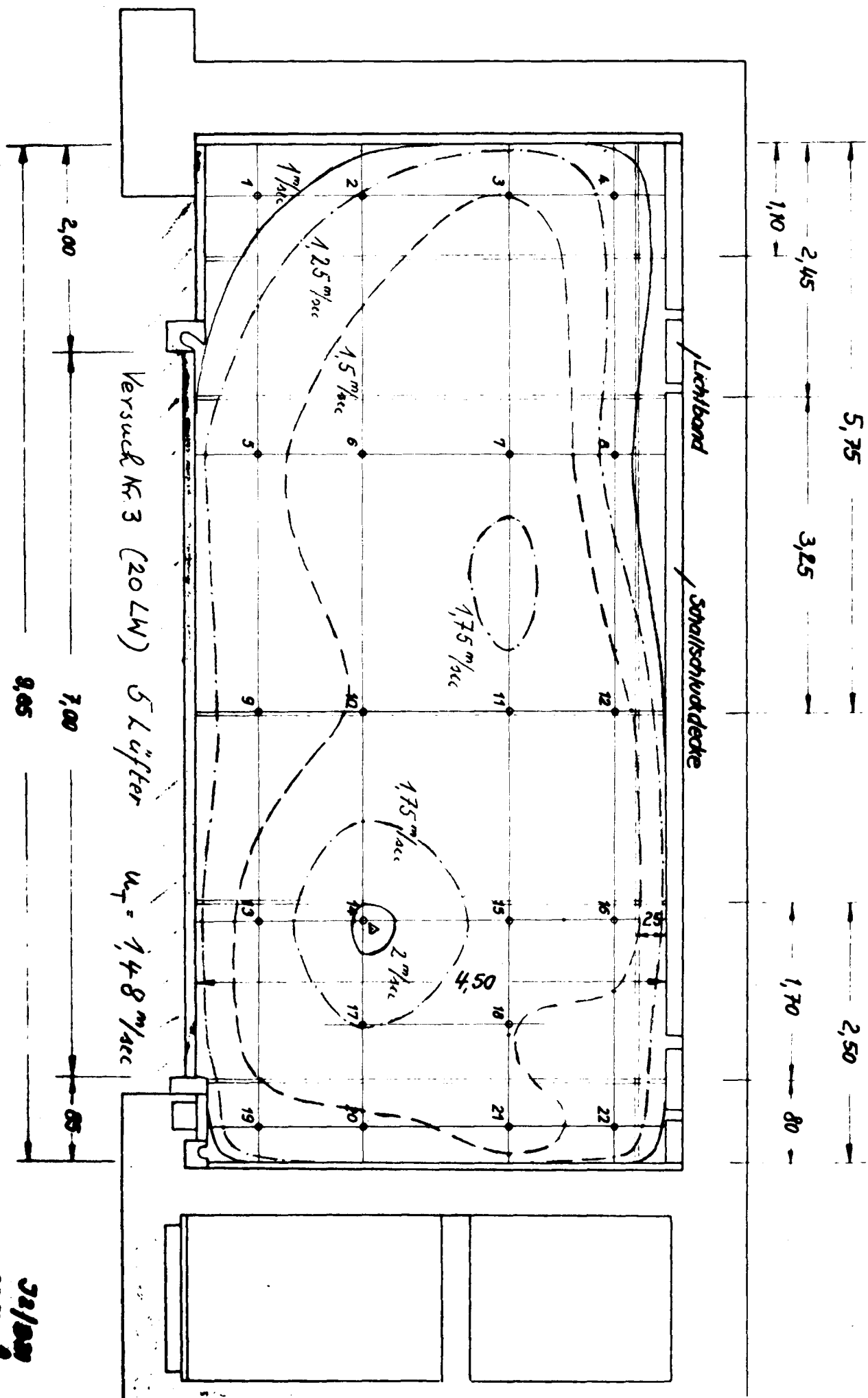
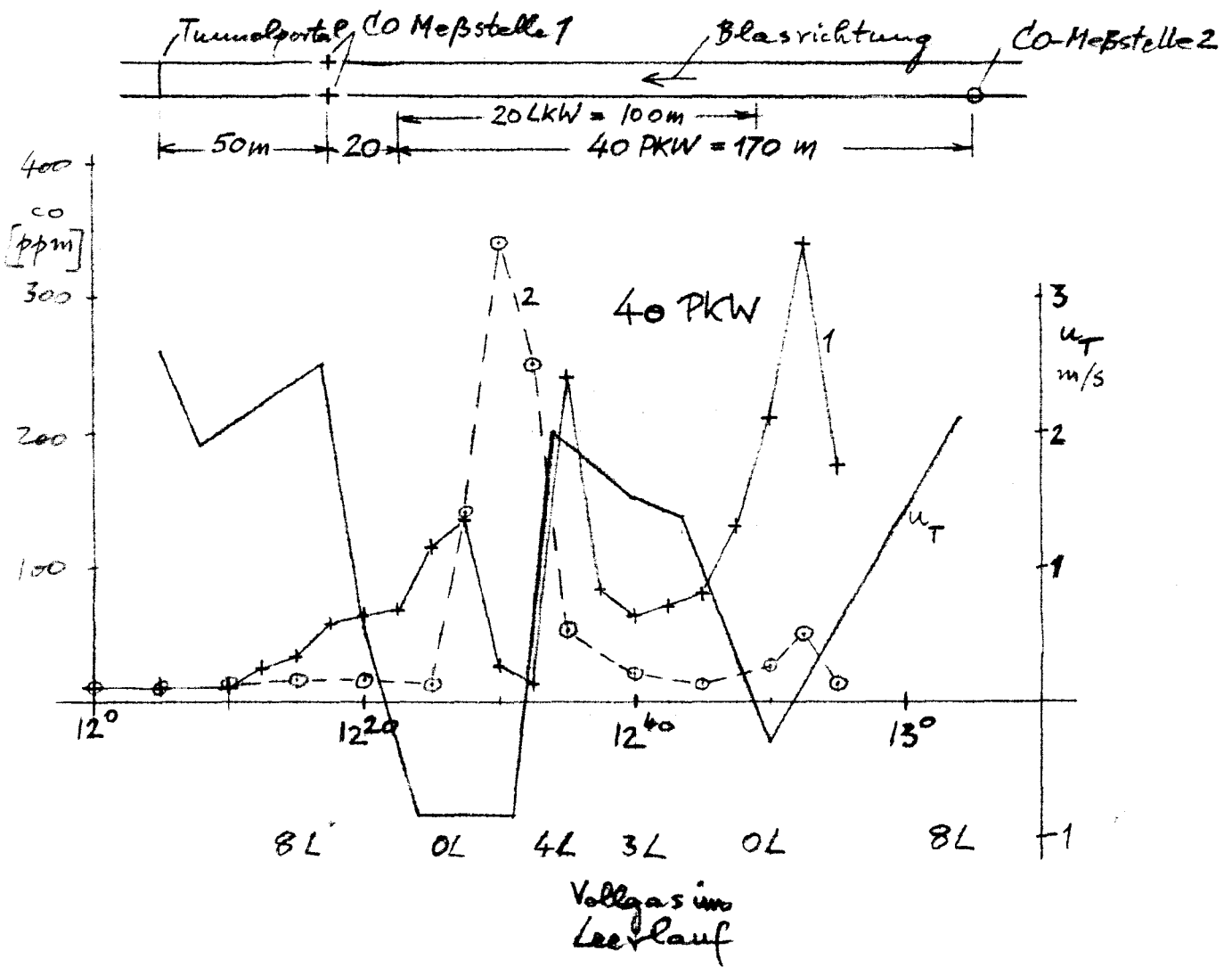
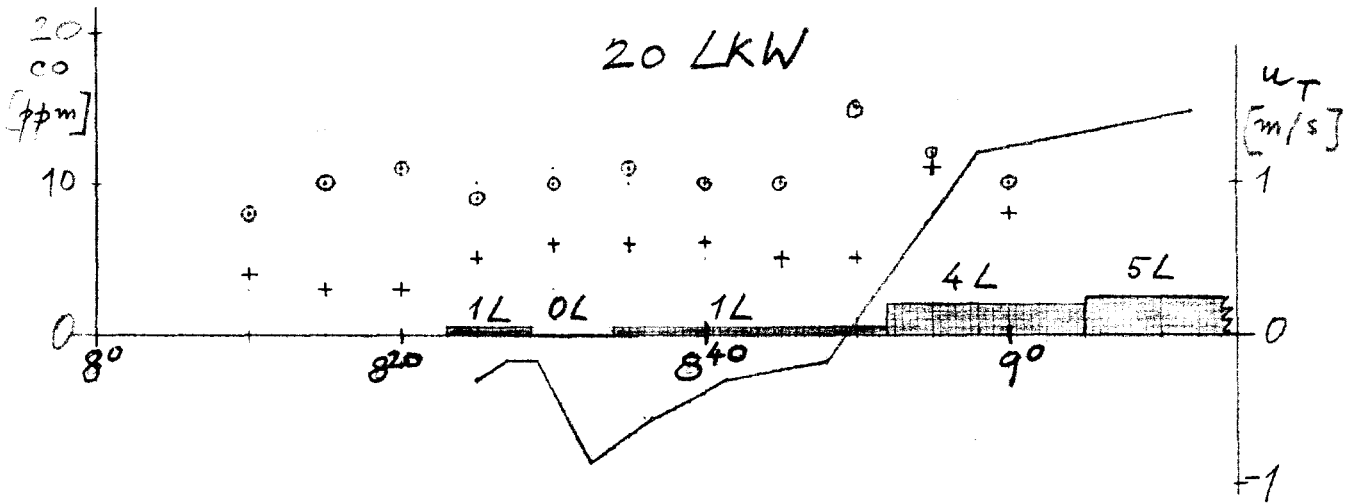


Bild 2.

32/100  
m 1



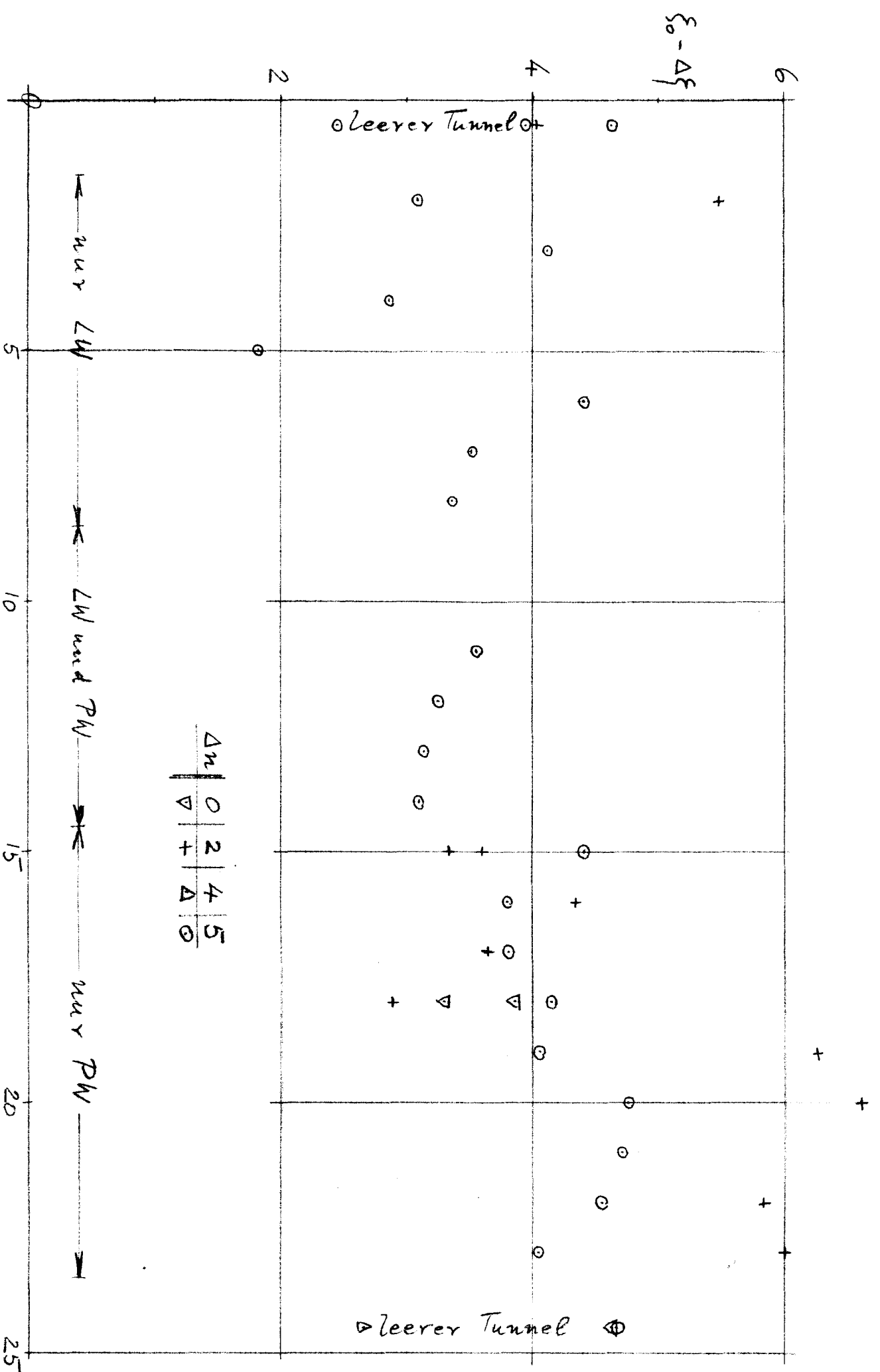
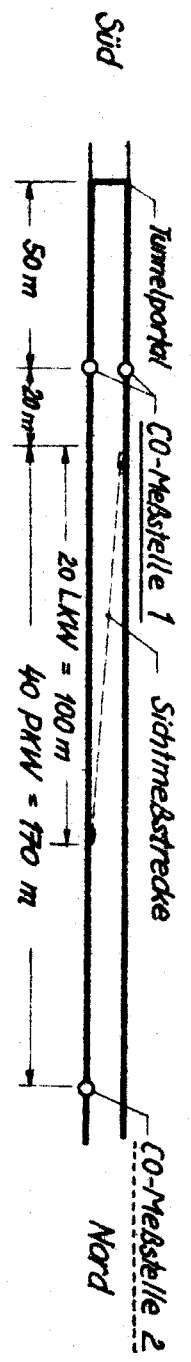
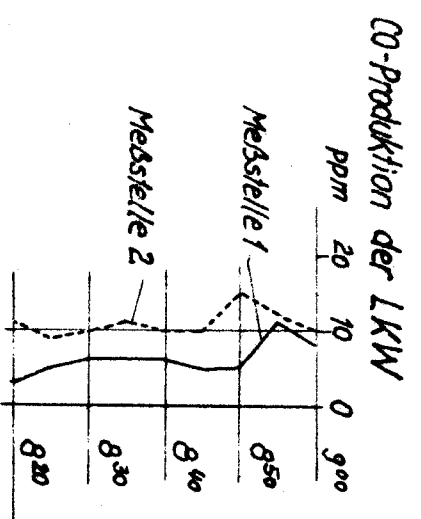
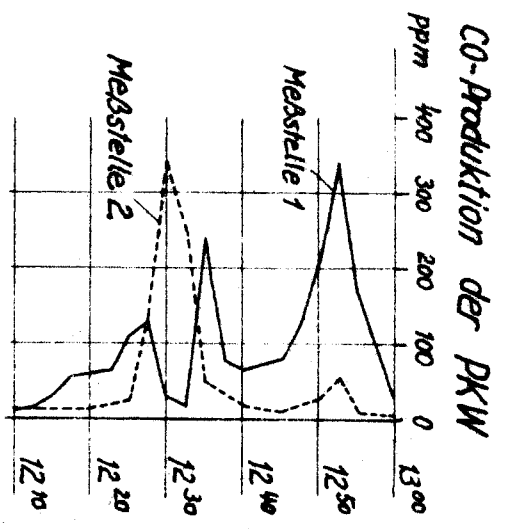


Bild 3. Differenz der Widerstandsbeiwerte für den ganzen Tunnel und die Meßstrecke.

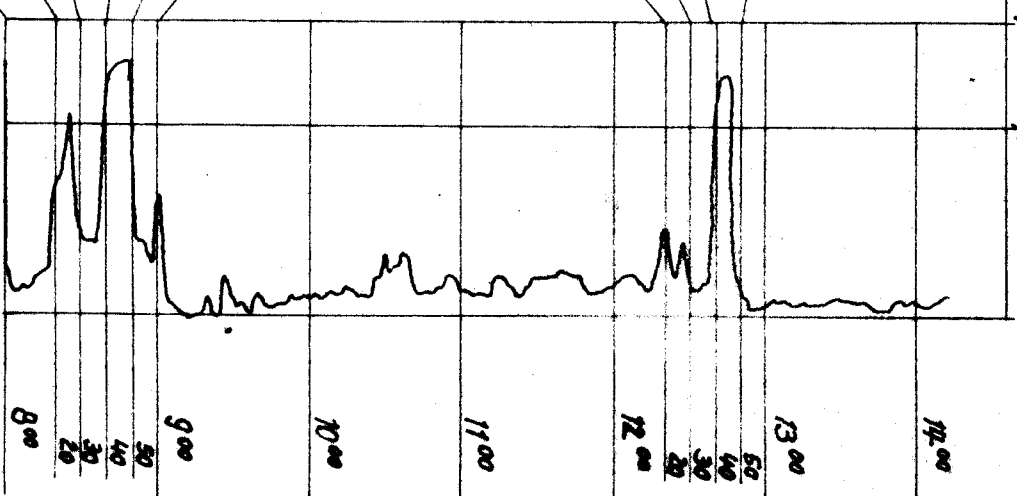
Nr. der Wagenaufstellung



Lage der Messskala während der Messungen  
 Extinktion Q3 Q2 Q1  
 Richtige Lage der Messskala  
 Extinktion Q2 Q1  
 0 Korrekturwert  
 2 cm



Geförderete Luftmenge + Nord → Süd - Süd → Nord	Befreie Strahlene-tilatoren Nr.	Motorbetrieb	Uhrzeit		Bild Nr.
			von	bis	
~ + 70 m <sup>3</sup> /s	6, 7, 8	40 PKW	12:38	12:50	
~ + 90 "	2, 4, 6, 8	Leerlauf	12:30	12:38	
~ - 20 "	—	Leerlauf	12:20	12:30	
~ + 90 m <sup>3</sup> /s	2, 4, 6, 8	20 LKW	8:50	9:00	22
~ - 15 "	7	Verstärkter Leerlauf	8:40	8:50	11, 13, 15
~ - 40 "	—	Leerlauf	8:30	8:40	—
~ - 15 "	7	Leerlauf	8:20	8:30	6



CO-Messungen  
 Bild 5.

Lüftungsmessungen  
 Wallingtunnel 1.10.1966

Dr. Ing. h. c. F. W. Müller  
 Institut für Luft- und Ingenieurwissenschaften  
 18.10.1966, Witten

Sichttrübungs-Messung