



# EXPERIMENTELLE STRÖMUNGSUNTERSUCHUNG

ZUR BE- UND ENTLÜFTUNG EINER ÖFFENTLICHEN TIEFGARAGE ANHAND  
EINES MODELLS  
STRÖMUNGSVERSUCH UND PLANUNG DER LUFTTECHNISCHEN ANLAGEN

Dipl.-Ing. G. Huber – Dipl.-Ing. H. Käufer  
Käufer + Passer  
Planungsbüro  
Emslanderstr. 2  
8130 Starnberg

Wissenschaftliche Mitarbeit,  
Strömungsversuch und Gutachten  
Prof. Dr. Ing. D. Liepsch  
Fachhochschule München  
Lothstr. 34  
8000 München 2

Architektur – Bauplanung  
R. Fahr  
Arch.-Büro PFP  
Heilmannstr. 8  
8000 München 71

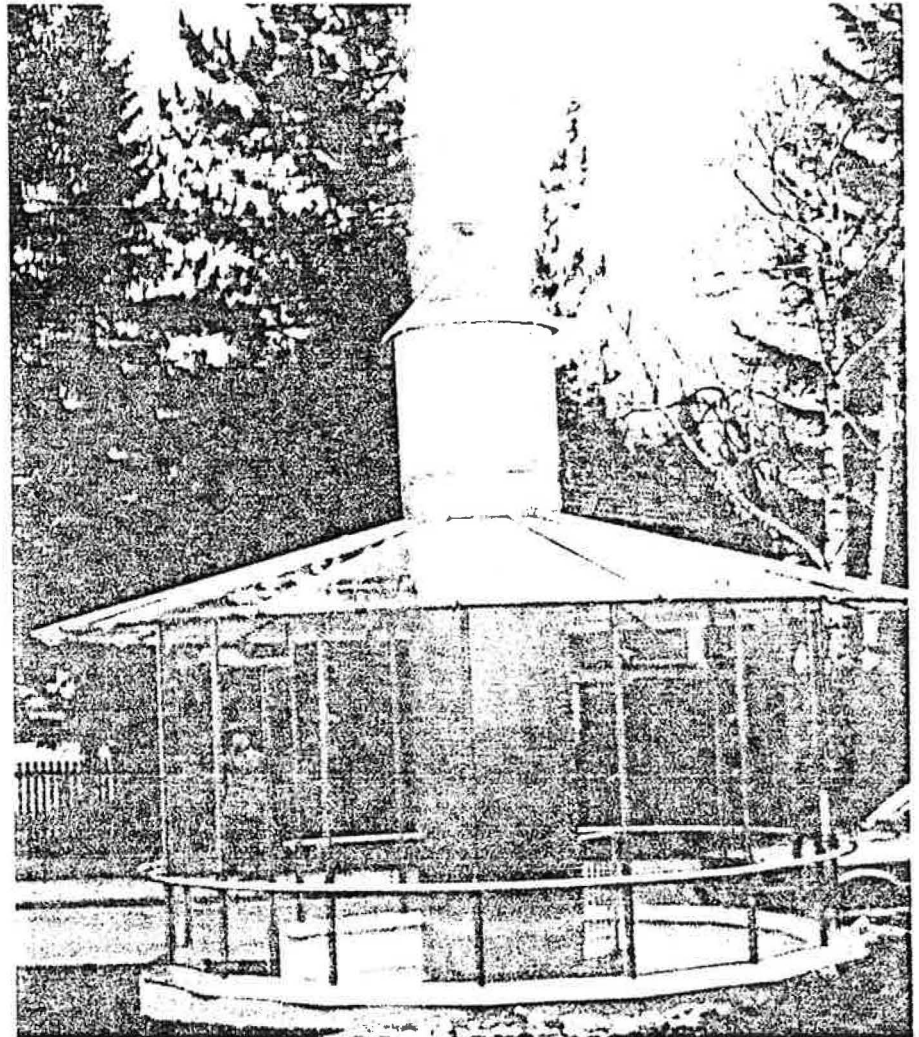


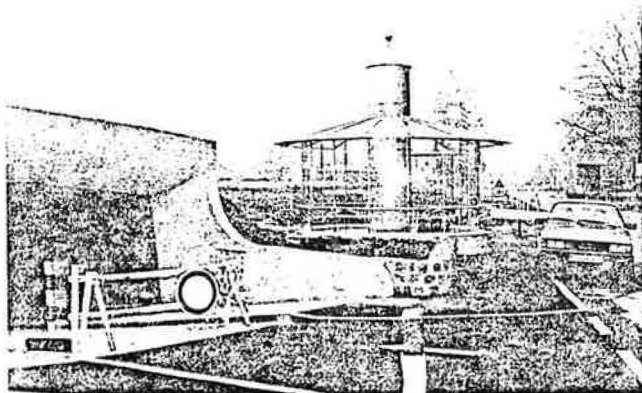
Bild 1: Entlüftung  
der Tiefgarage mittels  
Rauchversuch

## Aufgabenstellung

Die Gemeinde Pullach im Isartal beauftragte die Planung einer öffentlichen Tiefgarage neben dem S-Bahnhof, mit mindestens 127 Stellplätzen. Die Tiefgarage sollte als Abstellfläche für PKW der S-Bahn-Nutzer und der Veranstaltungsbesucher des Kulturzentrums dienen. Die Parkplatzsituation des in unmittelbarer Nähe befindlichen Ortszentrums sollte verbessert werden.

Als Baugelände diente eine Grünfläche, die auch nach Einbau der eingeschossigen Garage als Freifläche oder späterer Wohnbebauung dienen muß.

Bild 1 a: Einfahrt  
(Zuluft) und Treppenhauseingang mit Entlüftung im Treppenaug, ausgeführt als Edelstahlrohr mit innenliegendem Axialventilator





Das mit der Planung beauftragte Architekturbüro stellte an die Fachgenieure die Forderung, eine ausreichende, den Vorschriften entsprechende Be- und Entlüftung ohne die üblichen Luftkanalsysteme und kostspieligen Technikräume zu konzipieren.

Die Idee bestand darin, mit in den drei Ausgangsbereichen installierten Axialventilatoren für Fortluft sowie die Tiefgaragenein- und -ausfahrt als einzige Nachströmfläche für Außenluft, eine funktionsgerechte Durchströmung und Be- und Entlüftung der Garage sicherzustellen. Die Lage der Ausgänge und somit Placierung der Fortluftventilatoren konnten nach den Strömungsverhältnissen mit bestimmt werden.

Die nachfolgend beschriebene Versuchs- und Planungsdurchführung zeigt, daß in enger Zusammenarbeit aller Planungsbeteiligten, des Bauherrn und der für die Genehmigung zuständigen Behörden durchaus auch unkonventionelle Anlagenkonzeptionen zum Erfolg führen.

## Einleitung

Es galt, den optimalen Aufstellungsort der drei Fortluft-Axialventilatoren zu bestimmen. Die Durchströmungen und der Spülgrad dieser wurde in experimenteller Untersuchung mittels eines Acrylmodells untersucht.

Ausschlaggebend für den Spülgrad ist der Zeitraum, der zur Entfernung der Schadstoffpartikel benötigt wird.

Anhand des Modelles wurden die Strömungen mittels Partikel sichtbar gemacht und so die optimale Anbringung der Axialventilatoren bestimmt, wobei auf die baulichen Voraussetzungen eingegangen wurde.

In Tiefgaragen ist es erforderlich, die entstehenden Abgase wie die der Verbrennungsmotoren, insbesondere Kohlenmonoxyd, einwandfrei zu entfernen. Dazu werden in der Regel raumlufttechnische Anlagen eingesetzt. Dies wird in der Garagenverordnung § 14 Abs. 1 festgelegt, wo für geschlossene Mittel- und Großgaragen mechanische Abluftanlagen vorgeschrieben werden. In dieser Vorschrift heißt es: »Die Abluftanlage ist so zu bemessen und einzurichten, daß der Volumengehalt an Kohlenmonoxyd in der Luft, gemessen in einer Höhe von 1,5 m über dem Fußboden, über einen zusammenhängenden Zeitraum von einer Stunde, unter Berücksichtigung der regelmäßig zu erwartenden Verkehrsspitze im Mittel nicht mehr als 100 ppm (= 100 cm<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>) beträgt.

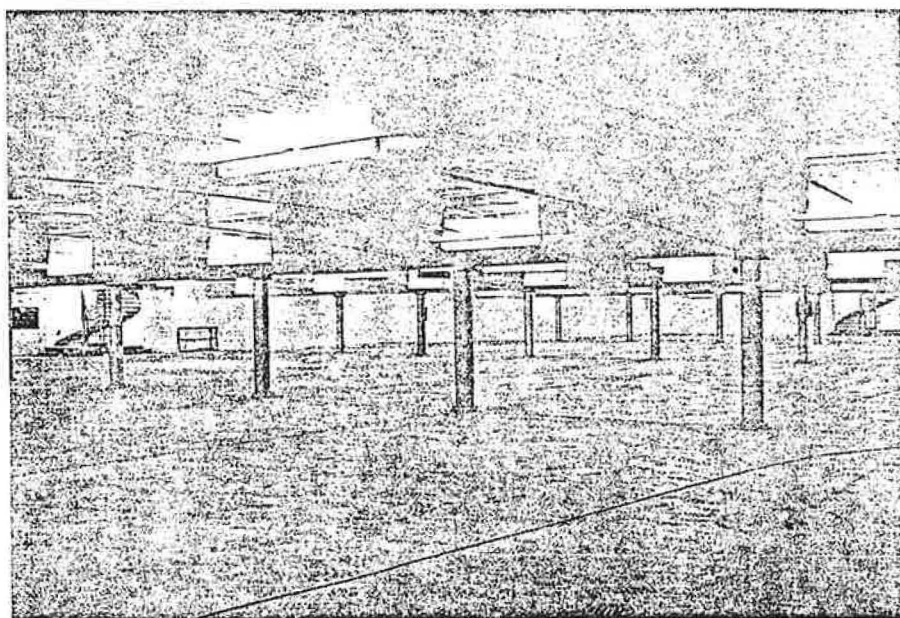


Bild 2: Innenansicht der Tiefgarage mit hinten sichtbaren Treppenaufgängen mit Absaugung

Das bedeutet, daß bei öffentlichen Tiefgaragen mindestens 12 m<sup>3</sup> Abluft in der Stunde je m<sup>2</sup> Garagennutzfläche abzuführen sind. Die Fortluftöffnungen sind dabei so hoch zu legen, daß die Abluft in den freien Windstrom geführt wird. Im konkreten Fall wurde eine maximale Luftmenge von 17 m<sup>3</sup>/h Abluft je m<sup>2</sup> zugrunde gelegt, da durch S-Bahnanschluß und dem Veranstaltungszentrum ein kurzfristig starker Zu- und Abgangsverkehr gegeben ist. Wegen der Überschreitung der maximalen zulässigen Brandabschnittfläche von 2 500 m<sup>2</sup> bestand die Auflage, die Fortluftventilatoren für den Brandfall zudem als Entrauchungsventilatoren für den Betrieb von 90 Minuten bei 300°C und einen 10fachen Mindestluftwechsel auszulegen.

## Experimentelle Modelluntersuchungen

Um die Strömungsverhältnisse in der Tiefgarage zu simulieren, wurde ein Modell M = 1 : 100 der geplanten Tiefgarage angefertigt. Die geometrische und strömungstechnische Ähnlichkeit im Modell muß gewährleistet sein. Die geometrische Ähnlichkeit resultiert aus der proportionalen Verringerung der tatsächlichen Abmessung des Originales. Die für die Strömung kennzeichnenden Ähnlichkeitszahlen müssen für das Versuchsfeld wie für das Originalfluid die gleichen Werte aufweisen, d. h. die Reynolds- bzw. Froude-Zahl im Modell, als auch in der tatsächlichen Ausführung, müssen gleich sein.

Für die folgende Versuchsreihe ist die Bedeutung der Froude-Zahl zu vernachlässigen, da das Fluid nur in sehr geringem Maße von der Schwerkraft beeinflusst wird.

Für die Modelluntersuchungen wurden die Messungen mit Wasser ausgeführt, da dadurch die gleichen Reynoldszahlen gewährt werden können.

Es gilt die Beziehung Reynolds-Modell = Reynolds-Normalausführung.

Die Reynoldszahl ist definiert:  $RE = w \cdot d / \nu$ , wobei  $w$  die Geschwindigkeit in m/s,  $d$  der hydraulischen Durchmesser in m und  $\nu$  die kinematische Viskosität in m<sup>2</sup>/s bedeutet.

In dem Wassermodell kann man von einer isothermen Strömung ausgehen, eine Temperaturschichtung findet nicht statt, d. h. es kann auf die Prandtl-Zahl in der Berechnung verzichtet werden. Für die Berechnung der Fluideschwindigkeit im Modell gilt somit:

$$w_M = w_N \cdot d_N / d_M \cdot \nu_M / \nu_N$$

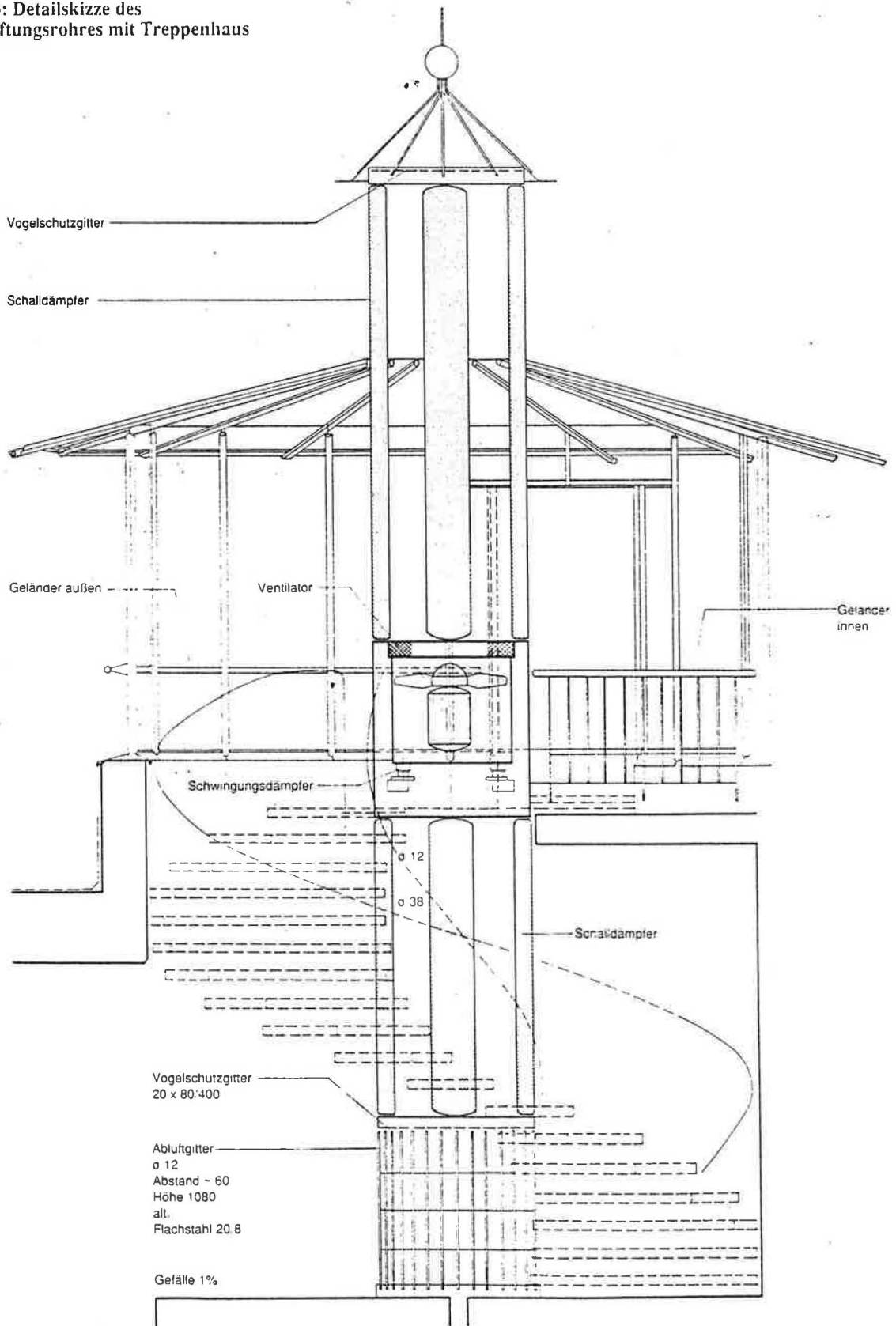
Wie bereits erwähnt, soll das Modell im Verhältnis 1 : 100 angefertigt werden. Der gesamte Luftvolumenstrom soll 54 000 m<sup>3</sup>/h betragen. Hieraus ergibt sich eine Luftgeschwindigkeit in der Nachströmöffnung von  $w_N = 0,83$  m/s. Für Luft beträgt die kinematische Viskosität

$$\nu_N = 15,13 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

für Wasser gilt

$$\nu_M = 1,004 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

Bild 3: Detailskizze des  
Entlüftungsrohres mit Treppenhaus





Daraus ergibt sich eine Geschwindigkeit des Wassers im Modell mit

$$w_M = 0,83 \text{ m/s} \cdot 100/1 \cdot 1,004/15,13$$

$$w_M = 5,5 \text{ m/s}$$

Das bedeutet, daß die Wassergeschwindigkeit am Eintritt des Modelles 5,5 m/s betragen muß, um die gleichen Verhältnisse wie im Original mit einer Luftgeschwindigkeit von 0,83 m/s zu erhalten. Aus der Berechnung für das Modell resultiert ein Volumenstrom von 9,9 l/s. Die Versuche werden jedoch aus konstruktiven Gründen nur mit einem maximalen Volumenstrom von 5,4 l/s gefahren.

Ergeben sich bereits bei einem Durchsatz von 5,4 l/s gute Ergebnisse, so sind bei vollem Volumenstrom noch günstigere Werte zu erwarten.

### Ermittlung des Spülgrades im Modell

Der Spülgrad  $t_M$  ist eine Funktion des durchströmten Raumes in Abhängigkeit des Fluides. Es ergibt sich für den Spülgrad des Modelles  $t_M = V_M / \dot{V}_M$  wobei mit

$t_M$  der Spülgrad des Modelles in Sekunden;

$V_M$  das Volumen des Modelles in  $\text{m}^3$ ;

$\dot{V}_M$  der Volumenstrom des Versuchsfluides in  $\text{m}^3/\text{s}$  angegeben ist.

Der Spülgrad errechnet sich dann:

$$t_M = 0,0078 \text{ m}^3 / 0,0054 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$t_M = 1,44 \text{ sec}$$

Errechnet man die erforderliche Zeit im Modell, bei einem geforderten Luftwechsel von  $n=6$ , so ergibt sich eine Zeit  $t$  von

$$t = n \cdot t_M = 6 \cdot 1,44 \text{ s.}$$

dies entspricht 8,67 s.

Das heißt, daß für einen geforderten Luftwechsel von 6 l/h in der Tiefgarage im Modell 8,67 s für eine vollkommene Entmischung erforderlich sind.

Der Spülgrad  $t_M$  gibt die Zeitspanne an, die benötigt wird, um das Raumvolumen einmal ganz auszutauschen. Hier ist die Bezugsgröße das Raumvolumen, währenddessen für die Luftwechselzahl  $LW$  die Zeitdauer  $t$  als Maßstab dient.

Um eine rasche Übertragung des Spülgrades  $t_M$  auf die Luftwechselzahl  $LW$  zu ermöglichen, wird folgende Gleichung abgeleitet:

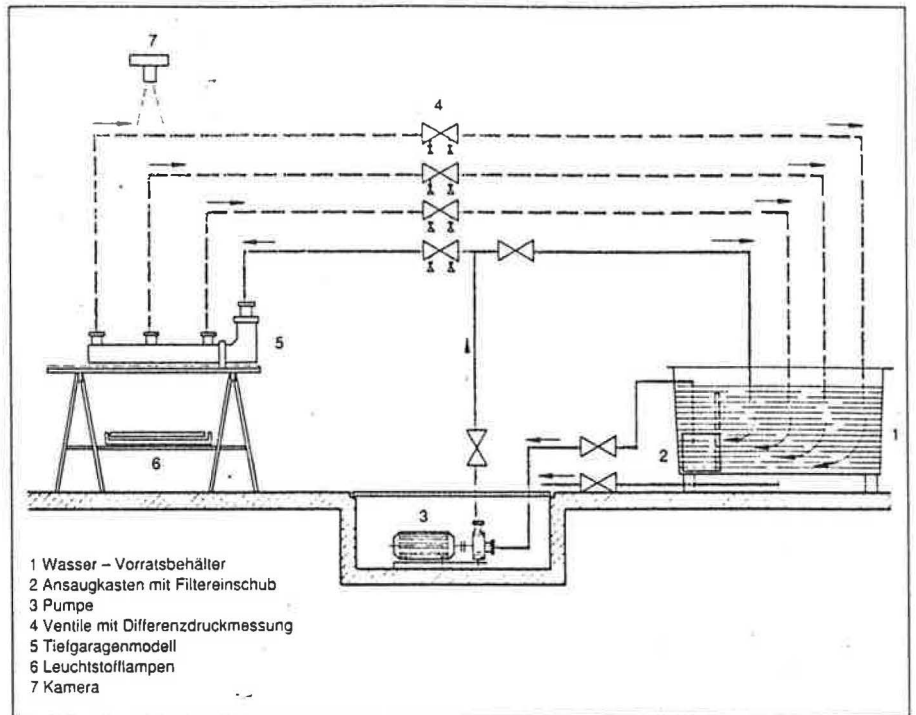


Bild 4: Prinzipschema des Versuchsaufbaues

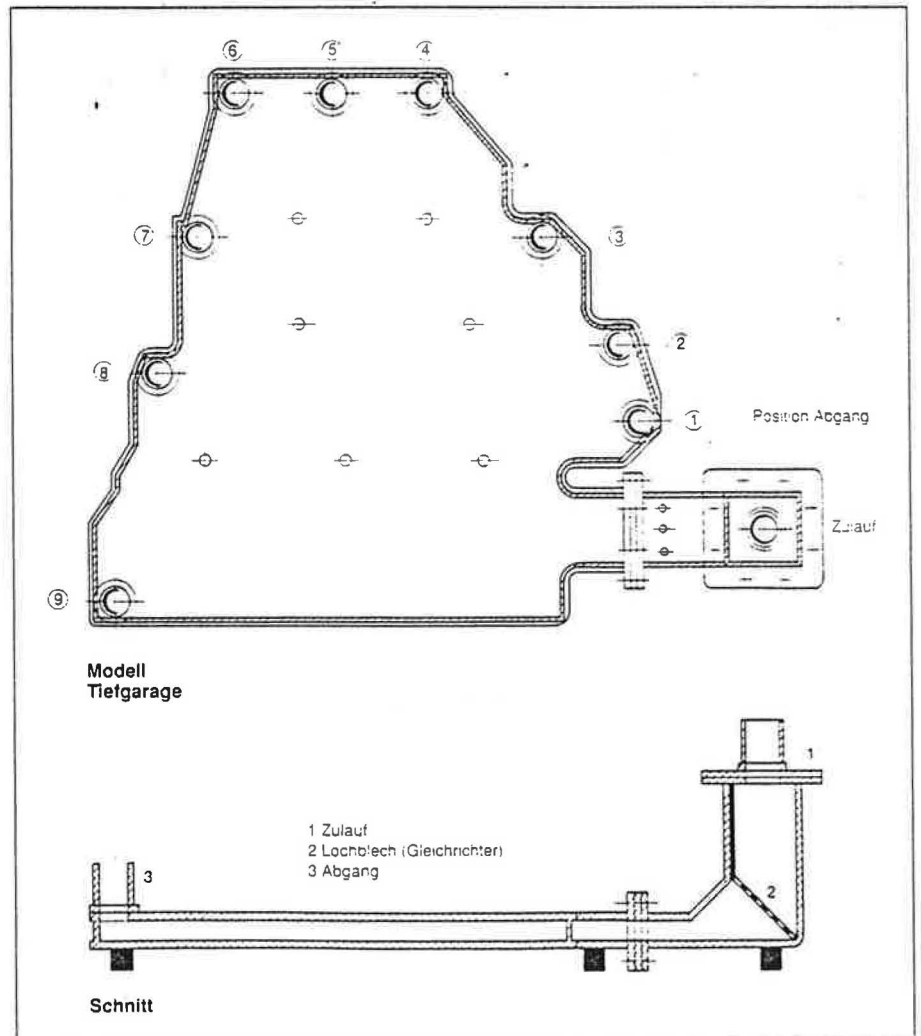


Bild 5: Modell der Tiefgarage, Draufsicht und Seitenansicht



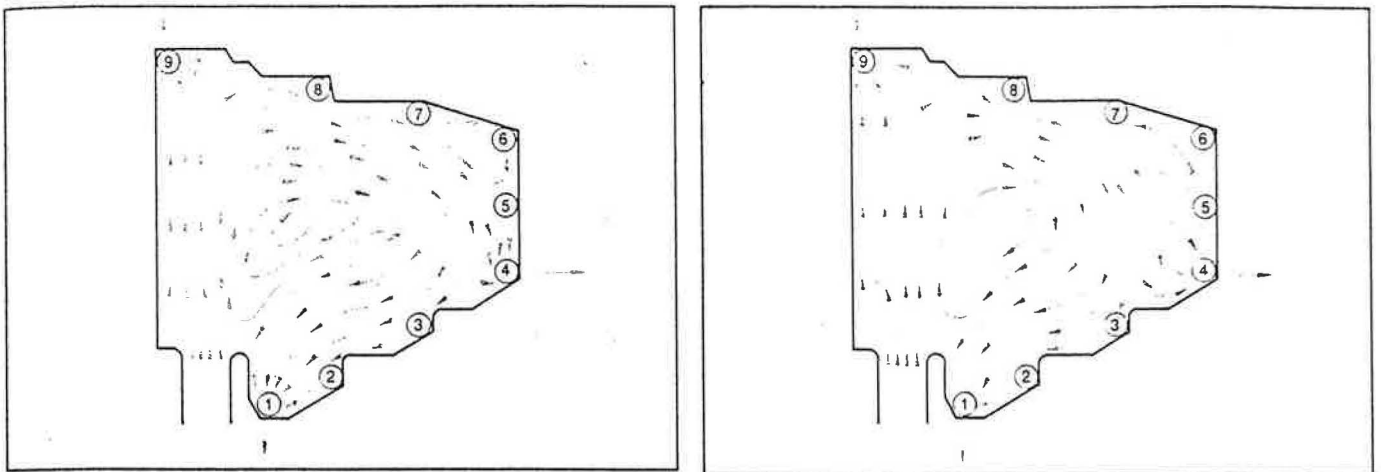


Bild 6: Schematische Darstellung, Anordnung der Auslässe 1 - 4 - 9, gleichmäßige (l.) und reduzierte (r.) Beaufschlagung

$$LW = 3600 \text{ s/h} / (t_M \cdot d_N / d_M)$$

wobei  $LW$  die Luftwechselzahl,  $t_M$  der Spülgrad.

$d_N$  der gleichwertige Originaldurchmesser in m bedeutet und

$d_M$  der gleichwertige Modelldurchmesser in m ist.

### Versuchsaufbau und -durchführung

Im Bild 4 wird das Prinzipschema des Versuchsaufbaues wiedergegeben.

Aus einem Vorratsbehälter mit 400 l Wasserinhalt wird Wasser über einen Einströmbehälter von der Förderpumpe angesaugt. Dieser Behälter ist so konstruiert, daß mittels eines einschiebbaren Siebeinsatzes die Partikelzufuhr gestoppt werden kann (2).

Mit Hilfe eines Bypasses läßt sich ein genaues Einregulieren der Volumenströme durch das Modell erzielen.

Zur Messung der Volumenströme in Vor- und Rücklauf werden jeweils Differenzdruckaufnehmer (TA Valve-Division) eingebaut (4).

Für gleichmäßig diffuses Licht sorgen vier Leuchtstoffröhren, die durch ein Transparentpapier vom Modell getrennt sind (6).

Das Modell war auf einer 10 mm starken Verbundglasscheibe aufgebaut. Dadurch erzielte man eine gute Transparenz für die Beleuchtung und die Tragfähigkeit des mit Wasser gefüllten Modelles.

Um verschiedene Absaug Situationen simulieren zu können, sind auf dem Modell neun verschiedene Anschlußstutzen angebracht. Drei Stutzen müssen laut Vorgabe im Verbund angeschlossen sein.

Bild 5 zeigt das Modell der Tiefgarage als Draufsicht und Seitenansicht mit den möglichen Positionen der Abgänge, durchnummeriert von 1 bis 9.

Zur gestellten Problemlösung stehen die drei verschiedenen Abgangskombinationen in den Versuchsreihen zur Verfügung mit den Abgängen 1 - 4 - 9, 1 - 6 - 9 und 1 - 5 - 8.

Zur Sichtbarmachung der Strömung wurden Polystyrol-Teile (BASF) mit der Nr. 168 N und einer Dichte von 1 060 bis 1 080  $\text{kg/m}^3$  verwendet.

Es handelt sich dabei um ein Granulat mit rechteckigem Querschnitt von 1,5 x 1,0 mm, was der Strömung nahezu schlupffrei folgen kann.

Die beschriebenen Strömungsbahnen der Partikel wurden mittels Fotografien festgehalten.

Zunächst wurden Versuchsserien bei gleichmäßiger Beaufschlagung der drei Abgänge durchgeführt, wobei in jedem Auslaß der Volumenstrom 1,7 bis 1,8  $\text{l/s}$  beträgt.

Weiterreichende Versuche beinhalten die Reduzierung des Volumenstromes eines der drei Abhänge auf die Hälfte.

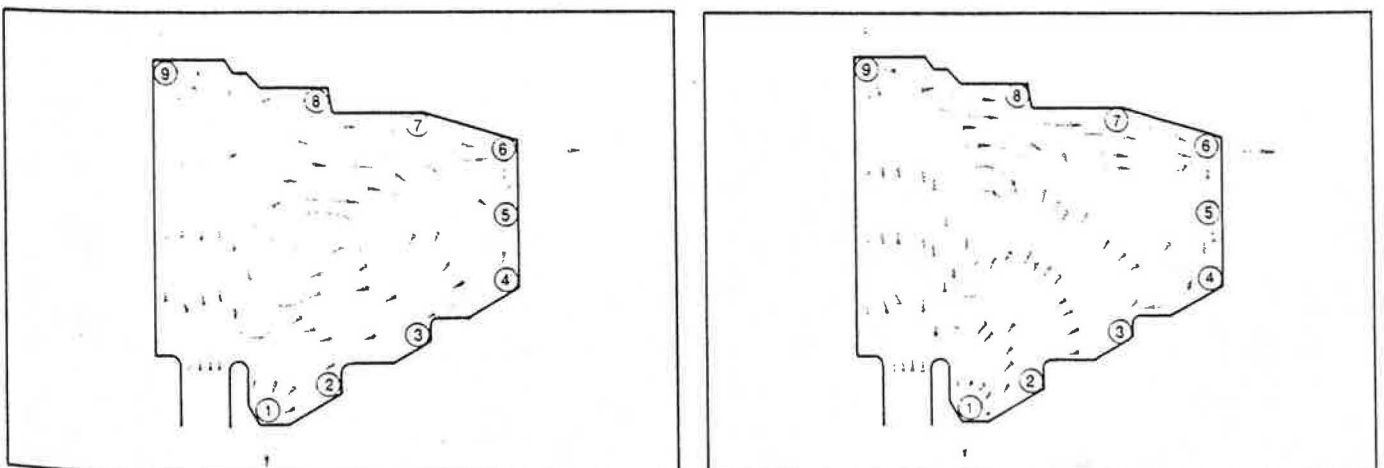
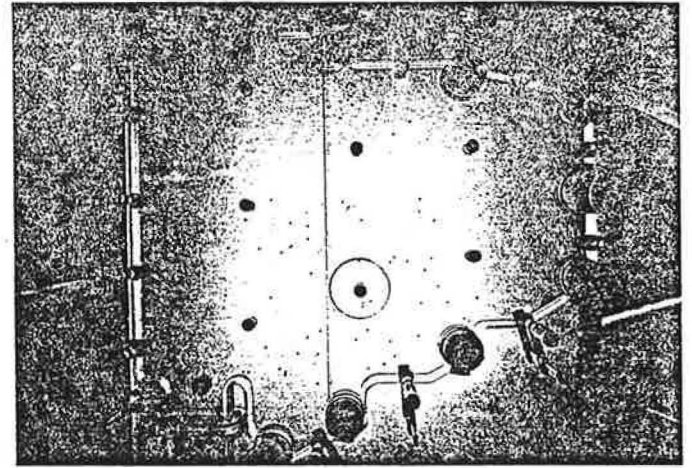
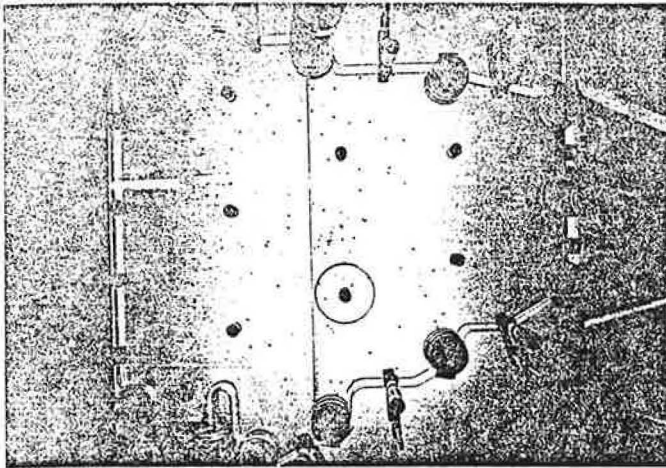
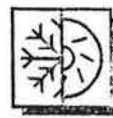


Bild 7: Schematische Darstellung, Anordnung der Auslässe 1 - 6 - 9 gleichmäßige (l.) und reduzierte (r.) Beaufschlagung



**Bild 11: Darstellung der Entmischung mittels Teilchen im Modell**  
 11a ... zum Beginn - 148 Teilchen ...      11b ... nach 2 sec. - 99 Teilchen ...

zweite, kleinere Totwasserzone an der Position 9 gegenüber der Nachströmöffnung resultiert aus den geometrischen Gegebenheiten der Tiefgarage. Hier kommt es zu einer leichten kleineren Totwasserzone, die aber durch die Absaugöffnung 8 auf ein Maß reduziert wird, daß sie vernachlässigt werden kann.

Bild 9 zeigt die Sichtbarmachung der Strömung im Modell mittels Polystyrol-Teilchen bei einem Zeitraum von 5,4 l/s, wobei die Abgänge 1, 5 und 8 jeweils gleichmäßig beaufschlagt sind, d. h. es strömen 1,8 l/s aus den drei Abgängen. Es bilden sich kaum Totwassergebiete aus.

Bild 10 zeigt das mit dem Laserschnittverfahren aufgenommene Strömungsbild, das sehr gut die Stromfäden erkennen läßt. Hier kommt es lediglich in der Mitte zu leichten Verwirbelungen.

Die Schadstoffentmischung mit Hilfe des Modelles wurde durch Einsetzen einer Filterplatte untersucht, wodurch das Eindringen der Partikel in das Modell

verhindert wird. Mit Hilfe dieser Methode kann man das Durchspülen bzw. das Entfernen der Partikel durch zeitlich aufeinander folgende Aufnahmen feststellen. Es wurde jede Sekunde ein Bild aufgenommen, bis nahezu alle Teilchen aus dem Modell entfernt waren. Die Teilchen wurden pro Aufnahme gezählt und über der Zeit in einem Diagramm aufgetragen.

Um die unterschiedlichen Einstellungen vergleichen zu können ist es erforderlich, mit einer annähernd konstanten Anzahl von Schwebeteilchen die Versuche auszuführen. Da die exakt gleiche Teilchenzahl nicht zu erreichen ist, wurde eine prozentuale Umrechnung aller Versuche durchgeführt; d. h., es befinden sich zum Zeitpunkt  $t = 0$  100% Teilchen im Modell.

Bild 12 zeigt das Entmischungsdiagramm für die verschiedenen Anordnungen der Ventilatoren.

In der Serie 1 war die Position 1-4-9 voll beaufschlagt, in Serie 2 die Posi-

tion 1-6-9 und bei der Serie 3 die Position 1-5-8. Die Serie 4 zeigt die Position 1-5-8 bei halber Beaufschlagung im Abgang 8.

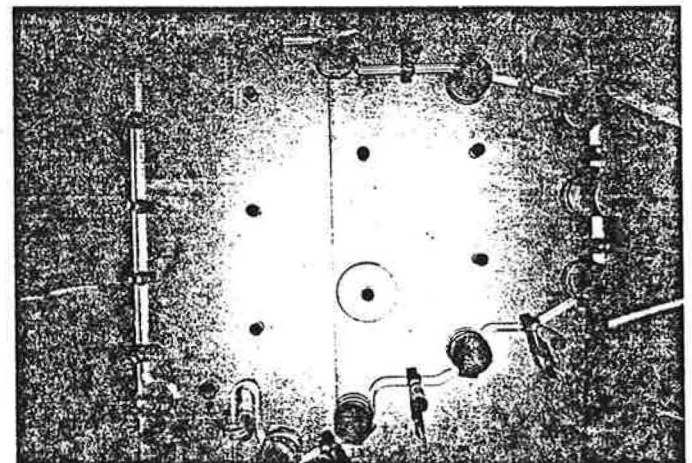
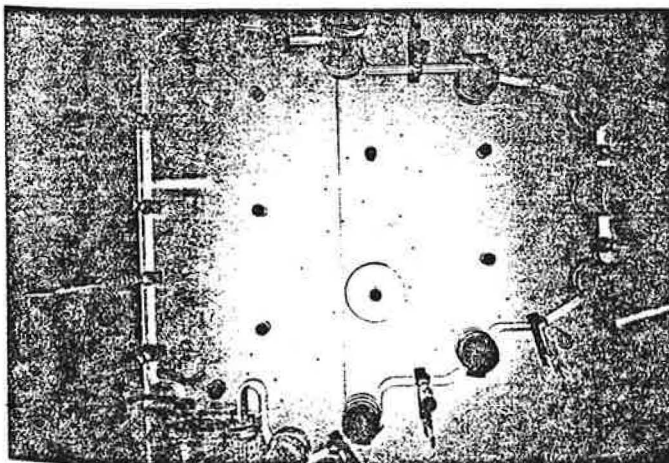
Deutlich erkennt man, daß die Serie 4, die der Großausführung mit den Ausgängen in Position 1-5-8 entspricht, am günstigsten ist.

Anhand der ausgeführten Beobachtungen kann gefolgert werden, daß die Durchströmung der Tiefgarage in der geplanten Ausführung mit den drei Axialventilatoren gewährleistet ist.

Die Anordnung der Abluftventilatoren in den Positionen 1-5-8 kann als nahezu optimal angesehen werden.

Eine Verbesserung der Durchströmung kann lediglich durch eine unterschiedliche Beaufschlagung der Einzelgebläse erfolgen, wobei eine Reduzierung des Volumenstromes im Ausgang 8 um die Hälfte optimal erscheint.

Man kann aus dem Diagramm deutlich erkennen, daß nach fünf bis sechs Sekunden eine totale Entmischung er-



11c ... nach 4 sec. - 34 Teilchen ...

11d ... nach 6 sec. - 6 Teilchen ...