<u>Strömungstechnische Untersuchungen</u> <u>für das Bauvorhaben</u>

Neue Messe Leipzig

Diplomarbeit von Dietrich Lampe

Fachhochschule Aachen Luft-und Raumfahrttechnik

Aachen, Juli 1993

Vorwort

Ich danke Herrn Prof. H.J.Gerhardt, M.Sc. für die Betreuung meiner Diplomarbeit. Desweiteren gilt mein Dank den Studenten und Mitarbeitern des Strömungslaboratoriums sowie des Instituts für Industrieaerodynamik Aachen, die am Bau des Modells und an den Messungen beteiligt waren. Besonders dankbar bin ich Herrn Dipl.-Ing. F.Janser, der mich während der Untersuchungen im Windkanal bestens unterstützte.

Ich habe diese Diplomarbeit selbständig und nur unter Zuhilfenahme der im Literaturverzeichnis angegebenen Quellen erstellt.

Dietrich Lampe

Aachen, Juli 1993

Inhaltsverzeichnis

		Seite
1.	Zur Geschichte der Leipziger Messe und zur Bedeutung des Bauvorhabens	6
2.	Problem- und Aufgabenstellung	7
3.	Physikalische Natur des bodennahen Windfeldes	8
4.	Mathematische Charakterisierung des bodennahen Windfeldes	9
	4.1. Beschreibung des Geschwindigkeitsprofiles4.2. Beschreibung der Turbulenz	9 11
5.	Ähnlichkeitskriterien für die Untersuchung am Modell	13
	5.1. Reynoldsche Ähnlichkeit5.2. Böenspektrum5.3. Profilexponent	13 16 17
6.	Versuchsaufbau	18
	 6.1. Grenzschichtwindkanal 6.2. Modellaufbau 6.3. Einbau der Meßwerterfassungssysteme 6.3.1. Außendruckmessung 6.3.2. Innendruckmessung 6.3.3. Luftwechselratenbestimmung 6.3.4. Entrauchungswirksamkeit 	18 20 26 26 31 32 33
7.	Versuchsdurchführung	35
	7.1. Vorversuch7.2. Messungen zur Dachlastermittlung7.3. Luftwechselratenbestimmung7.4. Entrauchungswirksamkeit	35 35 36 37

8.	Auswertung	38
	8.1. Erklärung der aerodynamischen Kenngrößen	38
	8.1.1. Formbeiwert C _p	38
	8.1.2. C _{p-RMS} -Wert	39
	8.1.3. Luftwechselrate	40
	8.2. Auswertung des Vorversuches	41
	8.3. Bewertung der gemessenen Drücke	45
	8.3.1. Druckverteilung an den Außenflächen der	
	Eingangshalle West	45
	8.3.2. Halleninnendruck	46
	8.4. Resultierende Druckbeiwerte	46
	8.4.1 Quasistatische Methode	46
	8.4.2. Spitzenfaktormethode	50
	8.4.3. Ermittlung der resultierenden Druckbeiwerte 51	
	8.4.4. Bewertung der C _p -Spitzenwerte-Isobaren-	
	verläufe für die Tragstruktur	52
	8.4.5. Bewertung der C _p -Spitzenwerte-Isobaren-	
	verläufe für Panele und Panelhalterungen	58
	8.5. Berechnung des Bemessungsstaudruckes	63
	8.6. Berechnung der Luftwechselraten	64
	8.7. Beurteilung der Entrauchungswirksamkeit	68
	8.7.1 Anströmung senkrecht zur Hallenachse68	
	8.7.2. Anströmung parallel zur Hallenachse	70
	8.7.3. Vergleich zwischen Anströmung parallel	
	und senkrecht Hallenachse	75
9.	Schlußfolgerungen	76
	9.1. Windlastannahmen	76
	9.1.1. Tragstruktur	76
	9.1.2. Panele und Panelhalterungen	78
	9.2. Lüftungswirksamkeit	79
	9.3. Entrauchungswirksamkeit	79
10.	Literaturverzeichnis	80

5

<u>1. Zur Geschichte der Leipziger Messe und zur Bedeutung des</u> <u>**Bauvorhabens:**</u>

Die Leipziger Messe spielt schon seit dem Mittelalter eine wichtige Rolle für die Handelsmetropole Leipzig. Die ersten Messen datiert man heute auf den Zeitraum um 1165. Damals verlieh der Markgraf Otto von Meißen Leipzig das Stadt-und Marktrecht. Sie ist damit die älteste Messe der Welt.

Der Charakter der Messe war im Laufe der Jahrhunderte starken Wandlungen unterworfen.Während bis zum Jahre 1895 alle gehandelten Waren eigens nach Leipzig geschafft wurden, brachten die Kaufleute fortan nur noch Muster ihrer Waren nach Leipzig. Der im Jahre 1497 von Maximilian I. zum Reichsmesseplatz erhobene Leipziger Jahrmarkt hatte sich zur 'Mustermesse' gewandelt.

Ein weiterer wichtiger Meilenstein der Leipziger Messe war die Gründung des Börsenverein der Deutschen Buchhändler zu Leipzig im Jahre 1825. Die Leipziger Buchmesse erlangte Weltgeltung, bis sie ihre hervorragende Stellung durch sozialistische Restriktionen an die Frankfurter Buchmesse verlor.

In der jüngeren Zeit ist vor allem ihre Bedeutung als technische Messe hervorzuheben.

In den Jahren von 1947-1989 war sie vor allem berühmt für ihre Rolle als Ost-West-Handelsplatz. So konnten hier viele friedliche Geschäfte zwischen den 'Feinden' in Ost und West gedeihen.

Mit der Vereinigung Deutschlands entfiel ihre Bedeutung als Bestandteil der östlichen Hemisphäre. Die Organisatoren unternahmen seither große Anstrengungen, um den neuen Anforderungen gerecht zu werden. So werden heute anstatt der einen Leipziger Messe viele Fachmessen veranstaltet.

Ein weiteres Problem der Veranstalter ist die dezentrale Lage der einzelnen Messehäuser und die veraltete Infrastruktur. Somit gewinnt gerade der Neubau eines zentralen moderenen Messegeländes an Wichtigkeit.

Das Bauvorhaben 'Neue Messe Leipzig' ist somit von immenser Bedeutung für den Fortbestand der Leipziger Messe. Desweiteren spiegelt auch gerade der Umfang der in Angriff genommenen Investitionen das Vertrauen in den Handelsstandort und die gesamte sächsische Industrieregion im Raum Leipzig-Dresden-Chemnitz wider und gibt Zuversicht, daß dieses Gebiet zu seiner alten Bedeutung als wichtige Industrieregion Deutschlands zurückfinden wird.

2. Problem-und Aufgabenstellung

Die Leipziger Messe GmbH plant die Erstellung des Ausstellungsgeländes 'Neue Messe Leipzig' im Norden der Stadt Leipzig entsprechend dem Entwurf der Architekten von Gerkan Marg + Partner (gmp), Aachen. Die Planung sieht auf der Ost/West-verlaufenden Hauptachse des Geländes die Erstellung der Eingangshallen Ost und West vor. Beidseits der Eingangshallen, und von diesen erreichbar, sind die vier Ausstellungshallen und eine Hochhalle angeordnet. Die Eingangshallen haben die Form von Zylindersegmenten. Sie Stahl-Glas-Konstruktion ausgeführt sollen als werden. die wobei Glashaltekonstruktion außen liegt. Die Glashaut soll eine ebene Fläche bilden. Sämtliche Hallen sind als Kalthallen mit natürlicher Be-und Entlüfung geplant. Die Entrauchung soll ebenfalls auf natürlichem Wege erfolgen.

Durch die besondere Zylindersegmentform der Eingangshallen mit außenliegender Tragstruktur macht es sich erforderlich, diese gesonderten Untersuchungen zu unterziehen. Derartige Konstruktionen sind noch nicht durch die Normung erfaßt und außerdem ist durch die Re-zahlempfindlichkeit runder Körper und die hier vorhandene besondere Oberfläche keine sichere Vorhersage des Strömungsfeldes der Halle möglich.

Im einzelnen waren folgende Untersuchungen durchzuführen.

1. Für die Eingangshallen war ein Windlastkonzept zu erstellen. Dazu war es notwendig, geeignete Modelle anzufertigen, und an diesen, im geeigneten Windkanal, die Außendruckverteilung sowie den Innendruck für die Hauptwindrichtungen und die geforderten Konfigurationen zu bestimmen.

Die Lüftungswirksamkeit der natürlichen Be-und Entlüftung 2. der Eingangshallen sollte ermittelt werden. Zu diesem Zwecke die war Luftwechselrate im Inneren der Eingangshallen wiederum für die Hauptwindrichtungen und für vier unterschiedliche Verhältnisse von Zuluft-zu Abluftflächen zu messen. Dafür war das Modell in geeigneter Weise umzubauen.

3. Die Entrauchungswirksamkeit der Zuluft-und Abluftflächen sollte durch Strömungssichtbarmachung mittels Rauch nachgewiesen werden. Dabei war die Effektivität der Größe und Anordnung der Öffnungen zu überprüfen.

3. Physikalische Natur des bodennahen Windfeldes

Auf der Erde auftretende Winde lassen sich auf die Energie der zurückführen. Diese Sonneneinstrahlung ist Sonneneinstrahlung in Äquatornähe wesentlich intensiver als an den Polen. Somit wird eine unterschiedliche Aufheizung der Erdoberfläche erzeugt, die wiederum Ursache für Entstehung von Druckunterschieden in der Atmosphäre ist. Weitere Ursachen sind die unterschiedliche Wärmerückstrahlung, sowie das differenzierte Wärmespeicherungsvermögen der verschiedenen Vegetationsformen und Bebauungsarten. Diese Unterschiede rufen einen Luftmassenaustausch hervor, den man als Wind bezeichnet.

In Höhen oberhalb von ca. 300-500m, also außerhalb des Einflusses von Reibungskräften in Erdnähe, wird die Windgeschwindigkeit und -richtung nur durch den Druckgradienten und durch Corioliskräfte beeinflußt. Dabei steht der Gradient immer senkrecht auf den Linien gleichen Druckes (Isobaren) und ist umso größer, je dichter diese Isobaren beieinander liegen. Da die Windstärke nur von der Größe des Druckgradienten abhängt, spricht man in diesen Höhen vom 'Gradientwind'.

In Erdnähe wird die Luftströmung durch Reibung an der Oberfläche abgebremst. Diese Abbremsung pflanzt sich nach oben hin infolge des Energieaustausches zwischen den Schichten fort. Für diesen Energieaustausch ist wiederum die Trägheit und Zähigkeit des Mediums Luft verantwortlich. Im Gegensatz zur laminaren Energieübertragung, für die nur die aus der Zähigkeit Schubspannungen verantwortlich resultierenden sind. findet der Energieaustausch in der hier vorhandenen turbulenten Grenzschicht extra noch über den vertikalen Austausch bewegter Luftmassen statt. Diese Turbulenz kurzzeitigen Änderung spiegelt sich in der Natur in der der Windgeschwindigkeit, d.h., der Böigkeit wider.

Je rauher sich jetzt die Erdoberfläche gestaltet, desto größer sind die Reibkräfte. Mit wachsenden Reibkräften steigt die Turbulenzintensität, die Windgeschwindigkeit in Bodennähe sinkt, und die Höhe zum Erreichen der Gradientwindgeschwindigkeit wächst.

Man kann somit als wesentliche den Wind in Bodennähe bestimmende Faktoren die **Geschwindigkeit des Gradientwindes** und die **Rauhigkeit und Topographie der Erdoberfläche** herausstellen.

Als entscheidende Größen zur Charakterisierung des bodennahen Windfeldes ergeben sich daraus das **Profil der mittleren Windgeschwindigkeit über der Höhe**, sowie die **Frequenz und Stärke der Turbulenz**.

4. Mathematische Charakterisierung des bodennahen Windfeldes

4.1. Beschreibung des Geschwindigkeitsprofils

In der einschlägigen Literatur findet man die folgenden zwei Gleichungen zur Beschreibung der atmosphärischen Grenzschicht:

logarithmische Formel	Exponentialformel
$\overline{U}(z) = \frac{\overline{U}_t}{k} \cdot \ln(\frac{z - d_0}{z_0})$	$\overline{U}(z) = \overline{U}_G \left(\frac{z - d_0}{z_G - d_0}\right)^{\mathbf{a}_p}$
oder	oder
$\overline{U}(z) = \overline{U}_{10m} \cdot \frac{\ln z - \ln z_0}{\ln 10 - \ln z_0}$	$\overline{\mathbf{U}}(\mathbf{z}) = \overline{\mathbf{U}}_{10m} \left(\frac{z}{10}\right)^{\mathbf{a}_p}$
mit:	mit:
$\overline{\mathrm{U}}(\mathrm{z})$ - mittl.Geschw.in Höhe z	$\overline{\mathrm{U}}(\mathrm{z})$ - mittl.Geschw.in Höhe z
$\overline{\mathrm{U}}_{_{10\mathrm{m}}}$ - mittl.Geschw.in 10m Höhe	$\overline{\mathrm{U}}_{_{10\mathrm{m}}}$ - mittl.Geschw.in 10m Höhe
k - Karmankonstante ($\approx 0,4$)	$\overline{\mathrm{U}}_{\mathrm{G}}$ - mittl.Gradientwindgeschw.
$\overline{\mathrm{U}}_{t}$ - Schubspannungsgeschw.mit:	$z_{_{\rm G}}$ - Gradientwindhöhe
	$\boldsymbol{a}_{_{\mathrm{p}}}$ - rauhigkeitsabhängiger Exponent
$\overline{\mathbf{U}}_{t} = \sqrt{\frac{\boldsymbol{t}_{0}}{\boldsymbol{r}}}$; (\boldsymbol{t}_{o} - Schubspannung,	d ₀ - Verdrängungsdicke
r - Luftdichte)	
z_0 - Rauhigkeitshöhe	
d_0 - Verdrängungsdicke	

Dabei stellen die oberen beiden die exakten, und die unteren beiden die in der Praxis verwendeten Formeln dar. Die Nichtberücksichtigung von d_0 ist zulässig, da die Verdrängungsdicke im Verhälnis zu den anderen Höhen gering ist. Unter Verdrängungsdicke versteht man hierbei die Schichtdicke, um welche die reibungslose Strömung infolge Geschwindigkeitsverminderung in der Grenzschicht nach außen abgedrängt wird.

Da die logarithmische Formel nur das Profil mittlerer Windgeschwindigkeiten bis zu einer Höhe von 100 m in zufriedenstellender Weise beschreibt, kommt bei gebäudeaerodynamischen Untersuchungen meist die Exponentialformel zur Anwendung.

Aufgrund des gemeinsamen physikalischen Hintergrundes läßt sich eine eindeutige Zuordnung zwischen den Parametern beider Formeln entsprechend Bild 1 angeben.



Bild 1: Zuordnung Rauhigkeitshöhe - a_p -Gradientwindhöhe [1]

In den Kurven kommt zum Ausdruck, daß mit wachsender Rauhigkeit der Wert für a_p steigt und der Bodeneinfluß bis in größere Höhen reicht. Somit wächst auch die Gradientwindhöhe, d.h., die Höhe, in der die Windgeschwindigkeit in die ungestörte Gradientwindgeschwindigkeit übergeht, mit zunehmender Bodenrauhigkeit.

Bild 2 zeigt typische Geschwindigkeitsprofile für unterschiedliche Bodenrauhigkeiten. 4. Mathematische Charakterisierung des bodennahen Windfeldes.



Bild 2: Windprofile für die mittlere Windgeschwindigkeit bei unterschiedlich rauhem Gelände [2]

4.2. Beschreibung der Turbulenz

Zur Beschreibung der Turbulenz wurde eine sogenanntes Turbulenzspektrum ermittelt. Der komplizierte Charakter und die Zufälligkeit der Geschwindigkeitsänderungen sind der Grund dafür, daß die Winduntersuchungen hauptsächlich auf der Durchführung und Sammlung einer großen Anzahl von Geschwindigkeitsmessungen beruhen. Dabei erhielt man Kurven, die den zeitlichen Verlauf der Windgeschwindigkeit zeigen. Um die Schwankungsenergie in Abhängigkeit von der Schwankungsfrequenz zu erhalten, zerlegte man die Windgeschwindigkeitskurven in Zeitabschnitte, die der jeweils untersuchten Frequenz ($T = \frac{1}{f}$) entsprechen. Innerhalb jedes Zeitabschnittes ermittelte man dann die mittlere Windgeschwindigkeit U_m . Damit wurde dann die Schwankungsenergie jedes Zeitintervalls und für jede Frequenz berechnet.

$$E_{Schwankung}(Zeitintervall, Frequenz) = \frac{E_{kinetisch, Schwankung}}{Luftmasse} = \frac{1}{T} \int_{0}^{T} (U_m - U(t))^2 dt$$

Die mittlere Schwankungsenergie jeder Frequenz erhielt man, indem der Mittelwert über alle Zeitintervalle für jede Frequenz gebildet wurde.

$$\overline{E}_{Schwankung}(Frequenz) = \frac{1}{\text{Anzahl Zeitintervalle}} \cdot \sum_{alleZeitintervalle} E_{Schwankung}(Zeitintervall, Frequenz)$$

Van der Hoven ermittelte dieses Energiespektrum für den waagerechten Wind in einer Höhe von 100m. Es ist in Bild 3 dargestellt.



Bild 3: Spektrum der waagerechten Geschwindigkeitsenergie des Windes[2]

Im Diagramm sind vier Gipfel zu erkennen. Der erste, im Bereich der hohen Frequenz, befindet sich zwischen den Perioden 1 und 2 min. Dieser Frequenzbereich entspricht böigen Winden, und stellt das eigentliche Böenspektrum dar. Im Gebiet der Periodendauern von 5 min bis 4 oder 5 h zeigt das Spektrum eine sehr kleine Schwankungsenergie. Deshalb wird die für Windlasten interessante mittlere Windgeschwindigkeit über die Durchschnittswerte dieser Perioden gemittelt. Der kleinere Gipfel für die Periode 12 h entspricht den Stillen, die gewöhnlich bei Sonnenauf-und untergang eintreten. Das bei der Periode von 4 Tagen auftretende Maximum entspricht den Änderungen einer allgemeinen atmosphärischen Zirkulation. Der Jahreszeitenrhytmus kommt in Ausdruck. Maximum bei der Periode 1 Jahr zum Fiir dem die Windlastermittlung an Bauwerken kommt es darauf an, das Böenspektrum für Perioden kleiner als 5 min korrekt nachzubilden, da dies in den Windstößen am Bauwerk zum Ausdruck kommt. Die Schwankungsenergiemaxima bei den größeren Perioden spiegeln sich in der Festlegung der Bemessungswindgeschwindigkeit wider, die sich ja an den zu erwartenden

4. Mathematische Charakterisierung des bodennahen Windfeldes.

größten Windgeschwindigkeiten innerhalb der Lebensdauer des Gebäudes orientiert.

5. Ähnlichkeitskriterien für die Untersuchung am Modell



5.1. Reynoldsche Ähnlichkeit

Die Beachtung der reynoldschen Ähnlichkeit ist hier besonders wichtig, da es darum geht, das richtige Ablöseverhalten der Strömung an einem konvexen Baukörper mit großem Krümmungsradius nachzubilden. Bei scharfkantigen Körpern kann auf die Einhaltung der richtigen Reynoldszahl verzichtet werden, da der Ablösepunkt der Strömung durch die scharfen Kanten des Körpers vorgegeben ist.

Der Ablösepunkt bei zylinderförmigen Körpern hängt vom Strömungszustand der Anströmung und der Rauhigkeit des Zylinders ab.

Man unterscheidet wie in Bild 4 sichtbar drei prinzipielle Strömungszustände.



Bild 4: Strömungszustände am Kreiszylinder [3]

I.; Geringe Anströmgeschwindigkeit ,Re<30 :

Hier überwiegen noch die Schubspannungen und bringen die noch geringen Druckschwankungen zum Abklingen.Dadurch kommt es zu keiner Ablösung.

II; Laminare Grenzschicht Re<100000 (unterkritischer Bereich):

Hier reichen die Schubspannungen nicht mehr aus, um die größer gewordenen zufälligen Druckschwankungen auszugleichen. Es kommt zur Ablösung und Einrollung der Strömung.

III; Turbulente Grenzschicht Re>1000000 (überkritischer Bereich):

Auch hier sind die Schubspannungen nicht groß genug, um eine Ablösung zu verhindern. Da jedoch die Anströmgeschwindigkeit wesentlich größer ist als im laminaren Fall, besitzen auch die Luftmassen in Zylindernähe mehr Energie und es bildet sich eine turbulente Grenzschicht aus. Das kenn-zeichnende Merkmal dieser turbulenten Grenzschicht ist, daß die Geschwindigkeit quadratisch mit dem Abstand von der Wand zunimmt, und nicht nur linear, wie bei der laminaren Grenzschicht. Dadurch besitzt die Strömung in unmittelbarer Wandnähe mehr Energie als im laminaren Fall, und kann damit die Druckschwankungen auf einer größeren Länge ausgleichen. Somit wird der Ablösepunkt weiter nach hinten verschoben.

Die richtige Simulation dieser Grenzschichtablösung ist von immenser Bedeutung, da durch sie der Luftdruck auf die Zylinderoberfläche, und in unserem Fall auf die Dachfläche der Eingangshalle, entscheidend beeinflußt wird.

Die sich an der Zylinderwand einstellenden Drücke sind im Bild 18 S.43 gezeigt.

5.1.1. Mathematische Erfassung der reynoldschen Ähnlichkeit

Reynolds fand heraus, daß die folgende nach ihm benannte Re-zahl den Strömungszustand, und damit das Verhältnis zwischen Reibungskräften und Druckkräften, richtig charakterisiert.

$$\operatorname{Re} = \frac{v \cdot l}{n}$$

mit:

v - Geschwindigkeit

- charakteristische Länge des untersuchten Körpers
- **n** kinematische Viskosität

des Strömungsmediums

$$n=\frac{h}{r}$$

h-Zähigkeit

r - Dichte

An dieser dimensionslosen Kennzahl kann man erkennen, daß es darauf ankommt, das Produkt aus Windgeschwindigkeit charakterund istischer Länge (hier doppelter Radius zylindersegmentförmigen der Eingangshalle) im gleichen Bereich zu halten, wie in der Natur. Die kinematische Viskosität kann man in unserem Windkanal nicht beeinflussen. Es herrschen aber fast gleiche Bedingungen bezüglich Umgebungsdruck, Temperatur und Luftfeuchte wie in der Natur.

Da es darauf ankommt, das richtige Ablöseverhalten und somit die richtige Druckverteilung am Zylinder zu simulieren, bietet sich als weitere Beeinflussungsmöglichkeit die **Rauhigkeit der Zylinderoberfläche** an. Diese kommt als Beeinflussungsgröße in Betracht, da sie ja großen Einfluß auf die Ausbildung des Geschwindigkeitsprofiles hat. Praktisch bietet dies die Möglichkeit, doch noch ein überkritisches Ablöseverhalten mit Hilfe einer größeren Oberflächenrauhigkeit zu simulieren, auch wenn im Modellversuch nicht so hohe Reynoldszahlen erreicht werden, wie in der Natur.

Aufgrund der ungewöhnlichen Struktur und Geometrie der Oberfläche der Eingangshalle macht es sich auf alle Fälle erforderlich, das richtige Ablöseverhalten in einem Versuch nachzuweisen.

5.2. Böenspektrum

Wie man im Energiespektrum nach *Van der Hoven* (**7** Bild 3) erkennen kann, unterliegen die Energie der Windströmung, und somit auch die Windgeschwindigkeit, und der Staudruck großen zeitlichen Schwankungen. Um nun die zeitlichen Änderungen am Modell richtig nachbilden zu können, war es notwendig, auch dafür einen Übertragungsmaßstab zu finden. Die richtige Nachbildung der Druckschwankungen ist notwendig, da gerade die dabei ent stehenden Druckspitzen große Lasten an den Gebäuden verursachen. Weiterhin erhalten dadurch auch die Turbulenzballen die richtige Größe, was zur Messung richtiger Druckverteilungen unbedingt notwendig ist.

Zur Übertragung zeitlicher Abläufe dient die Strouhalzahl. Ähnlichkeit ist dabei dann gegeben, wenn das Verhältnis zwischen zeitlicher und örtlicher Änderung des Luftmassenstromes bei Modell und Original gleich sind.

Strouhalzahl

$$S = \frac{1 \cdot f}{u}$$

mit:

l - charakteristische Länge

f - Frequenz des aerodynamischen Vorganges

u - Geschwindigkeit der Anströmung

Für den Modellversuch ist es jetzt vor allem von Bedeutung, das Maximum der Schwankungsenergie des mikrometeorologischen Bereiches(**7**Bild 3) bei der richtigen Frequenz zu modellieren. Für die Beziehung zwischen dem Modellmaßstab und dieser Frequenz ergibt sich folgende Gleichung.

$$\left(\frac{\mathbf{f} \cdot \mathbf{l}}{\mathbf{u}}\right)_{Modell} = \left(\frac{\mathbf{f} \cdot \mathbf{l}}{\mathbf{u}}\right)_{Natur}$$
$$\frac{\mathbf{l}_{N}}{\mathbf{l}_{M}} = \text{Modellmaßstab} \ \mathbf{M} = \mathbf{f}_{M} \cdot \left(\frac{\mathbf{u}_{N}}{\mathbf{u}_{M} \cdot \mathbf{f}_{N}}\right)$$

Dabei sind folgende Größen vorgegeben :

 $\boldsymbol{u}_{\scriptscriptstyle N}$ - Bemessungswindgeschwindigkeit

- $\boldsymbol{u}_{_{M}}$ maximale Geschwindigkeit im Windkanal
- $\mathbf{f}_{_{\mathrm{N}}}$ Frequenz der maximalen Schwankungsenergie aus dem

Van der Hoven - Spektrum

Da in unserem Fall durch den gegebenen Windkanal auch das f_{Modell} vorgegeben ist, kam bei es diesem Versuch nur darauf an, den Modellmaßstab richtig festzulegen.

In vorangegangenen Versuchen konnte gezeigt werden, daß für Modellmaßstäbe zwischen 1:250 und 1:500, richtige Meßergebnisse zu erwarten sind.

5.3. Profilexponent

Jensen fand im Jahre 1954 heraus, daß bei Modellversuchen die Rauhigkeitshöhe im gleichen Verhältnis zur Modellhöhe stehen muß, wie im Original. Er definierte die *Jensenzahl* als entscheidendes Ähnlichkeitskriterium.

$$Je = \frac{H}{Z_0}$$
 mit: H - Gebäudehöhe ; Z_0 - Rauhigkeitshöhe

Nachdem der Versuch, Windkanalergebnisse aus Experimenten mit konstantem Geschwindigkeitsprofil auf richtige Geschwindigkeitsprofile umzurechnen, gescheitert war, setzte es sich in der Gebäudeaerodynamik allgemein durch, die Geschwindigkeitsprofile exakt nachzubilden.

Die Jensenzahl bezieht sich dabei auf die Geschwindigkeitsprofilbeschreibung nach der logarithmischen Formel. Dabei ist es aber kompliziert, die Rauhigkeitshöhe im Windkanal exakt zu bestimmen. Auch dies ist ein Grund dafür, daß in der Gebäudeaerodynamik meist mit der Exponentialformel (auch Powerlaw genannt) gearbeitet wird.

Übertragen auf die Beschreibung mit Hilfe der Exponentialformel bedeutet die Jensensche Ähnlichkeitsbedingung, daß der rauhigkeitsabhängige Exponent a_p mit dem Original übereinstimmen muß.

6. Versuchsaufbau

6.1. Grenzschichtwindkanal

Sämtliche Untersuchungen wurden im Grenzschichtwindkanal der FH Aachen durchgeführt. Dieser Windkanal ist für derartige Untersuchungen geeignet, da man in ihm das erforderliche Geschwindigkeitsprofil erzeugen kann, die erzielbaren Windgeschwindigkeiten ausreichend sind, und da auch die Querschnittsgröße ausreichend ist.

Der Windkanal ist nach dem Eiffelprinzip aufgebaut. Die Luft wird von einem Radialgebläse aus der Umgebung angesaugt und in den Windkanal eingeblasen. Sie tritt dann am Ende des Nachlaufes ins Freie aus. Es entsteht also kein Energierückgewinn wie beim Göttinger Windkanal, bei dem die Luft in einem geschlossen Kreislauf geführt wird und ständig nur zum Teil neu beschleunigt werden muß. Das Göttinger Prinzip ist trotz des besseren Wirkungsgrades für gebäudeaerodynamische Untersuchungen nicht geeignet, da durch die ständige Ringströmung eine Drehbewegung des Luftpaketes in der Meßstrecke entsteht, die man nicht vollständig entdrallen kann.

Im Windkanal finden prinzipiell zwei Vorgänge statt. Zuerst kommt es darauf an, eine gleichmäßige Luftströmung zu erzeugen, und danach muß noch das gewünschte Geschwindigkeitsprofil mit entsprechender Turbulenz geschaffen werden.

Zur Erzeugung einer gleichmäßigen Luftströmung wird die angesaugte Luft in einem Radialgebläse beschleunigt, und danach in einem System von Gleichrichtern und Sieben homogenisiert.

Hinter diesen Sieben und Gleichrichtern trifft die Luft zuerst auf einen Turbulenzwall, dessen Größe entscheidend ist für die Größe der Turbulenzballen. Anschließend muß noch das Geschwindigkeitsprofil eingestellt werden. Dies geschieht, indem die Luft in der Anlaufstrecke über bestimmte Bodenrauhigkeiten, wie z.B. Teppiche oder Klötze, geleitet wird. Dieser Turbulenzwall und die Bodenrauhigkeitsfelder sind je nach einzustellendem Windgeschwindigkeitsprofil auswechselbar.

Die Meßstrecke des Windkanales hat einen Querschnit von 1,75 m Breite x 0,9 m Höhe. In dieser Meßstrecke befindet sich ein Drehteller mit einem Durchmesser von 1,5 m. Auf diesem Drehteller mußte dann das Modell aufgebaut werden.

Am Ende der Anlaufstrecke und vor der Meßstrecke befindet sich noch ein höhenverstellbares Prandtlrohr, mit dem der statische und der Gesamtdruck gemessen werden können.



Bild 5: Aufbau und technische Daten des Grenzschichtwindkanales der FH Aachen

6.2. Modellaufbau

Bei der Messung der Druckverteilung an den Eingangshallen kam es darauf an, eine möglichst hohe Re-zahl zu erreichen. Aus diesem Grunde wurde das Modell möglichst groß gebaut. Da im Windkanal die natürliche Turbulenz bis zu einem maximalem Modellmaßstab von 1:250 richtig nachgebildet wird, wurde auch dieser Modellmaßstab gewählt.

Die Größe des nachzubildenden Areales ergab sich aus den Abmessungen der Windkanalmeßstrecke und des Drehtisches. Das Modell wurde auf eine Drehplatte montiert. Der Modellausschnitt entspricht im Original einer Kreisfläche von 375 m Durchmesser. Bild 6 zeigt die Lage des Untersuchungsbereiches innerhalb des Messeareales.

Zur richtigen Umströmung der Eingangshalle war es notwendig, die außen liegende Tragstruktur der Dachfläche modellgetreu nachzubilden.

Um den Modellaufbau so einfach wie möglich zu halten, wurde die Eingangshalle West in zwei Teile geteilt und die Messungen wurden nur an der westlichen Seite vorgenommen. Dies war möglich, da auf dieser Seite die größeren Lasten zu erwarten waren. Dem liegt die Überlegung zu Grunde, daß die Bebauung in Nord-Süd-Richtung für den Ost- und Westteil der Eingangshalle West ähnlich sind, und daß der Frontseite der westlichen Hälfte keine Bebauung vorgelagert ist, während die Frontseite der östlichen Hälfte im Windschatten der Eingangshalle Ost liegt.

In der praktischen Ausführung wurde die Tragstruktur einteilig und durchgehend ausgeführt, während die Glaspanelen+Frontseiten in zwei Hälften gebaut wurden. Die eine Hälfte wurde mit den Einrichtungen zur Messung des Außendruckes ausgerüstet. Mit der anderen Hälfte sollten die Innendrücke sowie die Lüftungs-und Entrauchungswirksamkeit bestimmt werden. Da die Drücke jeweils auf der westlichen Seite gemessen werden sollten, war es erforderlich, die komplette Halle um 180° innerhalb des Bebauungsumfeldes drehen zu können. Die Möglichkeit dazu ergab sich aus der Ost-West-Symmetrie der Halle.

Bei der Hälfte zur Messung der Außendrücke konnte man darauf verzichten, die Lüftungsöffnungen der Hallen nachzubilden, da diese nur einen unwesentlichen Einfluß auf die äußere Umströmung der Hallen haben. Dieser Modellteil war so zu bauen, daß er die notwendigen Einbauten zur Außendruckmessung aufnehmen kann.

Die andere Hallenhälfte wurde in zwei Varianten gefertigt. Die Variante zur Innendruckmessung und zur Bestimmung der Entlüftungswirksamkeit besteht aus Blech, während die Variante zur Bestimmung der Entrauchungswirksamkeit aus durchsichtigem Plexiglas ist. Für die Ermittlung der Innendrücke sowie der Lüftungs-und Entrauchungswirksamkeit war es von großer Bedeutung, die Zu- und Abluftöffnungen richtig auszubilden.



Bild 6: Lage des Modellausschnittes im Messeareal

Nach den Vorgaben der Architekten *gmp* und *Ian Ritchie* soll die Zuluftströmung im Original durch Lüftungsklappen geregelt werden, welche an beiden Längsseiten der Halle im Bodenbereich vorgesehen sind. Eine typische Anordnung zeigt Bild 7.



Bild 7:Jalousieanordnung mit 3 Klappen.

Da noch nicht ganz feststand, ob an der Eingangshalle 3 oder 5 Jalousien eingebaut werden, wurden im Modell zwei scharfkantige Langlöcher auf jeder Längsseite vorgesehen. Im Laufe der Arbeiten am Modell kam die Nachricht, daß 5 Jalousien vorgesehen sind, so daß bei den Messungen dann beide Langlöcher verwendet wurden. Bei der Breite der Schlitze war zu berücksichtigen, daß die wirksame offene Fläche der Jalousien kleiner ist als die Jalousiefläche, und daß für Modell und Original unterschiedliche Kontraktionsziffern gelten. Die Kontraktionsziffern resultieren aus der Ein-schnürung des Luftstromes an den unterschiedlichen Öffnungskanten. Für die Originaljalousien gilt eine Kontraktionsziffer von μ = 0,8, während für scharfkantige Öffnungen, wie sie im Modell vorgesehen sind, mit einem Wert von μ = 0,6 gerechnet werden muß. Somit ergibt sich eine wirksame Öffnungsbreite pro Jalousiereihe von:

 $\mathbf{b}_{\text{wirksam Reihe Original}} = \mathbf{b} \cdot \mathbf{m} = 0,4 \, \mathbf{m} \cdot \mathbf{0},8 = 0,32 \, \mathbf{m}$

b-lichte Jalousieöffnungsbreite

Mit dem Modellmaßstab 1:250 berechnet sich die zu verwirklichende Öffnungsbreite pro Jalousiereihe für das Modell zu:

$$\mathbf{b}_{\text{Reihe Modell}} = \frac{\mathbf{b}_{\text{wiksam Reihe Original}}}{\mathbf{M} \cdot \mathbf{m}_{\text{Modell}}} = \frac{0,32 \text{ m}}{250 \cdot 0,6} = 2,1 \text{ mm}$$

Damit ergibt sich für die Breite des unteren Schlitzes, welcher 3 Reihen umfassen soll:

$$b_{\text{Schlitz unten}} = 3 \cdot 2,1 \text{mm} = 6,3 \text{mm}$$

Für den oberen, 2 Reihen umfassenden Schlitz ergibt sich:

$$b_{\text{Schlitz oben}} = 2 \cdot 2, 1 \text{mm} = 4, 2 \text{mm}$$

Als Abluftfläche war die in Bild 8 dargestellte Firstkonstruktion vorgesehen. Sie verlief ebenfalls über die gesamte Hallenlänge. Die Nachbildung am Modell erfolgte maßstäblich, da die Kontraktionziffer beim Modell aufgrund der gleichartigen Gestaltung mit der Kontraktionsziffer des Originales übereinstimmt. Die Regelklappen wurden nicht nachgebildet, da sie ja beim Original zur Verbesserung der Lüftung jederzeit geöffnet werden können.



Bild 8: Firstkonstruktion mit Abluftöffnungen

Die Ausstellungshallen wurden ebenfalls im Modell nachgebildet. Um eine realistische Umströmung der Ausstellungshallen, und somit insbesondere eine realistische Modellierung des Nachlaufs der Ausstellungshallen zu ermöglichen, wurden für die Simulation östlicher und westlicher Winde die Breite der Ausstellungshallen in Nord-Süd-Richtung um ein Viertel reduziert. Hierdurch konnten auch die nördlichen und südlichen Seiten der Ausstellungshallen umströmt werden, die sonst unmittelbar an die Wände des Windkanales angrenzen würden. Die Einbausituation ist in Bild 9 gut zu erkennen.



Bild 9: Blick auf Modell aus Ostrichtung bei Anströmrichtung 270° (West)



Bild 10: Blick auf Eingangshalle West aus westlicher Richtung



Bild 11: Blick auf Modell aus Südrichtung bei Anströmung aus 0°(Nord)

In den Bildern 9 - 11 sind die Hallenhälfte zur Innendruck- und Lüftungswirksamkeitsbestimmung (rote Farbe), sowie die Hallenhälfte für die Überprüfung der Entrauchungswirksamkeit zu sehen. Bei den Messungen des Außendruckes wurde die entsprechende Hallenhälfte anstelle der durchsichtigen Hallenhälfte aus Plexiglas eingebaut.

Gut sichtbar sind in den Bildern 9 und 11 die in die Anlaufstrecke einge-bauten Klötze zur Erzeugung des gewünschten Geschwindigkeitsprofiles. Weiterhin kann man in Bild 9 oben in der Mitte das eingebaute höhenverstellbare Prandtlrohr erkennen. Im Zentrum von Bild 11 sind die Lüftungsschlitze zu sehen.

6.3. Einbau der Meßwerterfassungssysteme

6.3.1. Außendruckmessung

Zur Erfassung der Außendruckverteilung ist es erforderlich, den statischen Druck an einer Vielzahl von Meßstellen auf der Dachfläche und an der Stirnseite zu messen. Aufgrund der turbulenten Struktur der Anströmung ist es besonders wichtig, ein Meßsystem einzusetzen, das die zeitlichen Schwankungen erfassen kann. Weiterhin darf die Umströmung durch das Meßsystem nicht beeinflußt werden.

Für die Messung der statischen Oberflächendrücke wurden durch das Zinkblech der entsprechenden Hallenhälfte eine Anzahl Messingröhrchen (Länge ≈ 15 mm, Außendurchmesser = 1,5 mm , Innendurchmesser = 0,7 mm) gelötet, die außen exakt mit der Oberfläche abschlossen. Dabei wurde besonderer Wert darauf gelegt, daß sich kein Grat an den Öffnungen befindet. Aufgrund des geringen Öffnungsdurchmessers konnte davon ausgegangen werden, daß keine Beeinflussung des Strömungsverlaufes stattfindet. Auf der Innenseite wurde ein Silikonschlauch aufgesteckt, der dann zum Scannivalve führte. Die Anzahl der Druckmeßöffnungen belief sich auf der Dachfläche auf 76 und betrug auf der Stirnfläche 11. Bei der Anordnung der Öffnungen lag die Überlegung zugrunde, daß die Dichte der Meßöffnungen dort am größten sein soll, wo entweder mit den größten Änderungen des statischen Druckes gerechnet werden muß (Dachkante am Überhang) oder wo es darauf ankommt, erkennen zu können, ob der Strömungsverlauf über- oder unterkritisch ist (Äquator). Bild 11 zeigt die Lage und Numerierung der Druckmeßbohrungen auf der abgewickelten Dachfläche und auf der Stirnfläche.



Bild 11: Lage der Druckmeßbohrungen

Sämtliche Druckschläuche wurden an zwei Meßstellenumschaltern (Scannivalves) angeschlossen. Diese Scannivalves haben die Aufgabe, die Drücke zur messen, sie in ein elektrische Größe umzuwandeln und an den Rechner weiterzuleiten. Weiterhin besitzt jeder Scannivalve einen Druckaufnehmer, der in der Lage ist, innerhalb von 5 Sekunden 2500 Druckwerte zu messen. Dies ist besonders wichtig für die Erfassung der Turbulenz. Da ein derartiger Druckaufnehmer sehr teuer ist, verwendet man einen Meßstellenumschalter, der nacheinander jede Meßstelle rechnergesteuert auf eben diesen einen Druckaufnehmer schaltet. Ein derartiger Druckaufnehmer ist nur in der Lage, Druckdifferenzen zu messen. Als Gegendruck wird der mit dem Prandtlrohr erfaßte statische Druck der Anströmung verwendet. Da es ebenfalls notwendig ist, den Staudruck der Anströmung zu messen, werden also zwei Druckschläuche (P_{statisch} und P_{gesamt}) vom Prandtlrohr zu den Scannivalves geführt. Diese beiden Schläuche haben einen Außendurchmesser von 5 mm, einen Innendurchmesser von 3,5 mm und eine Länge von ca.2 m. Durch die Trägheit der in diesen Schläuchen stehenden Luftsäule, erreicht man die gewünschte Mittelung für den statischen und den Gesamtdruck. Diese Mittelung ist notwendig, damit man ausschließlich die Druckschwankungen an der Hallenoberfläche erfaßt und keine Verfälschung durch die Druckschwankungen der freien Anströmung entsteht.

Die Meßkette, Druckbohrung, Meßschlauch, Meßstellenumschalter, Druckwandler ist ein schwingungsfähiges System. Da die Winddrücke zeitlich veränderlich sind, mußte das Frequenzverhalten der Meßkette entsprechend abgestimmt sein, damit die zeitlich veränderlichen Drücke amplitudengetreu widergegeben werden. Das Frequenzverhalten der Meßkette wurde nach Angaben von *Holmes and Lewis* [4] und *Knoch*[5] durch Wahl der Meßschlauchlänge optimiert. Für die gewählte Meßschlauchlänge von ca. 200 mm findet man in der Literatur für eine Druckschwankungsfrequenz von

f ≥ 100 Hz ein Amplitudenverhältnis von $A_{MeB} / A_{tatsächlich} \le 1+0,18$. Aus früheren Messungen [6] ist bekannt, daß für den gewählten Modellmaßstab und die Luftgeschwindigkeit im Windkanal energiereiche Druckschwankungen nur bei Frequenzen f < 100 Hz auftreten. Das gewählte Meßsystem erfüllt also die Anforderungen für eine realistische Erfassung der Druckschwankungen.

Bild 12 zeigt einen Scannivalve mit Druckaufnehmer und mit einem beispielhaften Druckschlauchanschluß.

In Bild 13 kann man die prinzipielle Anordnung der Scannivalves und der Druckröhrchen mit angedeuteden Druckschläuchen innerhalb der zu untersuchenden Hallenhälfte sehen. Gut erkennbar ist in diesem Bild auch die Verwirklichung der Druckmessung am Überhang. Diese war besonders wichtig, da am Überhang besonders große Lasten zu erwarten waren.



Bild 12: Aufbau eines Scannivalves mit beispielhafter Druckleitung

Bild 14 zeigt eine Zusammenschaltung des gesamten Meßsystems. Die beiden Signalconditioner waren unter dem Drehteller montiert. Sie dienten neben der Signalumwandlung auch zum Nullabgleich und zur Skalierung der Druckaufnehmer. Die Ausgabe der Daten erfolgte in Dateien durch den Computer. 6. Versuchsaufbau



Bild 13: Einbauanordnung der Scannivalves und der Druckmeßröhrchen.



Bild 14: Gesamtsystem Druckmeßtechnik

6.3.2. Innendruckmessung

Die Innendruckmessung erfolgte in der Hallenhälfte, in der sich die Lüftungsöffnungen befinden. Da das Volumen, der im Halleninneren befindlichen Luft sehr groß ist im Verhältnis zum Lüftungöffnungsquerschnitt und auch in der Halle ein ungehinderter Druckausgleich stattfinden kann, war es ausreichend, nur die 10 im Bild 15 gezeigten Meßröhrchen einzubauen.



Bild 15: Einbauanordnung der Meßröhrchen für Innendruckmessung

Die Meßstellen wurden im Halleninneren gleichmäßig verteilt, um auch eventuell doch auftretende Druckunregelmäßigkeiten ausmachen zu können. Der erforderliche Scannivalve und der Signalconditioner wurden unter dem Drehteller montiert. Zur Druckerfassung- und auswertung kam das gleiche Meßsystem zur Anwendung, wie für die Außendruckmessung. Bezüglich Schlauchlänge und Schwingungsübertragung gelten ebenfalls die für die Außendruckmessung getroffenen Feststellungen.

6.3.3. Luftwechselratenbestimmung

Zur Bestimmung der Luftwechselrate war die Hallenhälfte mit den Lüftungsschlitzen zu verwenden. Für die Messung der Luftwechselrate mußte man zuerst im Halleninneren eine bestimmte Propankonzentration erzeugen und dann wurde das Abklingen der Propankonzentration bei einer bestimmten Anströmwindgeschwindigkeit aufgezeichnet.

Dazu war es erforderlich, Propan in das Halleninnere einzuleiten und auch dann einen kleinen Volumenstrom aus dem Halleninneren ableiten zu können, um darin die Propankonzentration zu messen.

Der abgesaugte Volumenstrom mußte aus dem Grunde klein sein, damit die durch ihn verursachte Nachsaugung von Frischluft möglichst gering ist.

Die Anordnung der erforderlichen Röhrchen zur Propaneinleitung und zur Volumenabsaugung zeigt Bild 16. Bei der Propaneinleitung mußte eine gleichmäßige Füllung des Halleninneren gewährleistet sein, und die Volumenabsaugung erfolgte einmal in der Mitte der Halle und einmal in der Nähe der Lüftungsöffnungen.

Die Bestimmung der Propankonzentration erfolgte mit einem Flammionisationsdetektor (FID). Das Meßprinzip dieses FID ist folgendermaßen. In diesem FID brennt ständig eine kleine Flamme. Diese Flamme befindet sich zwischen zwei unter elektrischer Spannung stehenden Platten. Das angesaugte Volumen wird ständig in diesen Brennraum eingeleitet. Enthält das angesaugte Volumen jetzt eine große Propankonzentration, so entsteht bei der Verbrennung im Brennraum eine große Menge freier elektrischer Ladungsträger. Dadurch fließt zwischen den elektrisch vorgespannten Platten ein größerer Strom. Dieser Strom ist ein direktes Maß für die Propan-konzentration und wird über verschiedene elektrische Verstärker zur Anzeige gebracht.

Um den zeitlichen Verlauf der Propankonzentration aufzeichnen zu können, war desweiteren ein X-Y-Schreiber erforderlich. Dieser war mit dem FID gekoppelt und brachte den zeitlichen Verlauf der Propankonzentration zu Papier.



Bild 16: Anordnung der Meßröhrchen für die Luftwechselratenbestimmung

6.3.4. Entrauchungswirksamkeit

Bei der Bestimmung der Entrauchungswirksamkeit war es notwendig, in die Halle Rauch einzuleiten und außerdem mußte es möglich sein, das Entweichen und die Verteilung des Rauches im Halleninneren beobachten zu können.

Zur Raucherzeugung kam ein Gerät zur Anwendung, in welchem Petroleum über eine Heizpatrone geleitet wurde. Dies erzeugte einen gut sichbaren Rauch.

Zur Rauchbeobachtung wurde die Hallenhälfte mit den Lüftungschlitzen aus durchsichtigem Plexiglas gefertigt.

Für eine realistische Simulation der Originalsituation, wurden noch die Halleneinbauten, wie Verkaufscontainer und Fußgängerüberführungen nachgebaut. Die Füllung des Halleninneren mit dem Rauch erfolgte durch die Lüftungsschlitze.

7. Versuchsdurchführung

7.1. Vorversuch

Der Vorversuch hatte die Aufgabe, nachzuweisen, daß die Umströmung der Eingangshalle wie im Original überkritisch erfolgt.

Dazu wurde die Windkanalanlaufstrecke mit den Bodenrauhigkeiten entsprechend einem $a_p = 0,3$ ausgerüstet. Dieser Wert entspricht den für den interessierenden Bereich anzunehmenden Windverhältnissen (Vorstadtbebauung).

Das Prandtlrohr wurde auf eine Höhe von 450mm gestellt. Der Windkanal lief auf voller Leistung, um eine maximale Strömungsgeschwindigkeit zu erreichen. Dies war nötig, da aus vorherigen Überschlagsrechnungen bekannt war, daß die erreichbare Re-zahl möglicherweise zu klein ist.

Die Messungen selbst wurden bei Anströmrichtung 0° (Anströmung von Nord d.h. Quer zur Hallenachse) einmal mit kompletter, einmal nur mit Vor-lauf- und einmal ohne Bebauung durchgeführt.

Der Rechner zeichnete die statischen Drücke, deren RMS-Werte sowie die c_p -und c_p -RMS-Werte für jede Meßstelle des Daches auf.(Erläuterungen zu den aufgezeichneten Daten **7** Kapitel 8).

7.2. Messungen für die Dachlastermittlung

Für die Dachlastermittlung waren sowohl die Innendrücke als auch die Außendrücke an Dach und Fassade zu messen. Der Windkanal wurde wieder auf voller Geschwindigkeit gefahren, nachdem der Vorversuch gezeigt hatte, daß mit dieser Geschwindigkeit die Umströmung richtig simuliert wurde.

Der Rechner zeichnete wieder die selben Meßgrößen auf, wie beim Vorversuch. Auch die Bodenrauhigkeit der Anlaufstrecke war gleich.

Sämtliche Daten wurden jeweils für die Anströmrichtungen 0°, 30°, 90°, 270°, 300° und 330° gemessen. Die Winkelbezeichnung verlief dabei, beginnend von der Nordrichtung, im Uhrzeigersinn. Es wurden also Anström-richtungen aus der nördlichen Hälfte betrachtet. Diese Wahl liegt darin begründet, daß das Messeareal der NML im Norden der Stadt Leipzig liegt. Da somit von südlicher Richtung ein größerer a_n -Wert gilt (städtische Bebauung), wächst auch die Windgeschwindigkeit langsamer mit der Höhe, als bei Anströmung Norden. Daraus ergeben sich durchschnittlich geringere von Anströmgeschwindigkeiten in Gebäudehöhe aus südlichen Richtungen, und somit sind auch die resultierenden Dachlasten geringer, als bei nördlicher Anströmung. Da nun die Tragstruktur nach den maximal auftretenden Lasten zu dimensionieren ist, reichte es aus, die nördlichen Anströmrichtungen zu analysieren.

Bei den Außendruckmessungen wurden die Druckwerte für Dach und für die Fassade aufgezeichnet.

Die Innendruckmessungen wurden für sämtliche Windrichtungen zweimal vorgenommen. Einmal waren sämtliche Zu- und Abluftöffnungen geöffnet und bei der anderen Meßreihe waren nur die Lüftungsflächen der nördlichen Hälfte geöffnet. Dabei stellt der vollständig geöffnete Fall den Normalfall und der nur nördlich geöffnete Fall den schlechtest möglichen Fall dar. Die ausschließliche Öffnung der nördlichen Lüftungen ist deshalb für die Tragstruktur so kritisch, da der auftreffende Wind praktisch in der Halle gestaut würde und der Halleninnendruck wahrscheinlich erheblich größer ist, als bei vollständiger Öffnung der Lüftungen. Dieser innere Überdruck muß nämlich zu dem zu erwartenden äußeren Unterdruck hinzuaddiert werden und erzeugt so größere Druckkräfte auf die Stäbe der Tragstruktur.

7.3. Luftwechselratenbestimmung

Die Luftwechselratenbestimmung erfolgte für die Windrichtungen des 4. Quadranten (270°, 300°, 330°, 360° entsprechend West bis Nord). Dieser Auswahl lag die Überlegung zu Grunde, daß die Ergebnisse auch auf Anströmrichtungen von 0° bis 90° übertragen werden können, da bei den geringen verwendeten Windgeschwindigkeiten nur die nähere angrenzende Bebauung, welche symmetrisch ist, ausschlaggebend ist.

Die Rauhigkeitshöhe der Winkanalanlaufstrecke wurde wieder entsprechend einem $a_p = 0.3$ gewählt.

Zur Untersuchung des Einflusses der Größe der Zuluft-und Abluftflächen wurden sukzessive die Zuluft-und Abluftflächen jeweils gleichmäßig teilweise verschlossen. Folgende Lüftungssituationen wurden untersucht.:

-Zuluft- und Abluftflächen (entsprechend 5 Jalousiereihen) vollständig geöffnet -Zuluft- und Abluftflächen 50% geöffnet

-Zuluft- und Abluftflächen 25% geöffnet

-Zu- und Abluftflächen entsprechend einer lichten Breite von 3 Jalousiereihen vollständig geöffnet

Die Variation der Lüftungsflächen wurde im Versuch durch Abkleben mit Tesaband verwirklicht.

Die Windgeschwindigkeit wurde entsprechend einer in Leipzig vorhandenen mittleren jährlichen Windgeschwindigkeit in Firsthöhe von $U_{first} = 3,5$ m/s
eingestellt. Dementsprechend mußte der im folgenden berechnete Staudruck am Prandtlrohr in 450 mm Höhe herrschen.

$$\frac{U_{450mm}}{U_{First}} = \left(\frac{h_{Prandtl}}{h_{First}}\right)^{a_{p}} \implies U_{450mm} = 3,5\frac{m}{s} \cdot \left(\frac{450}{95}\right)^{0.3} = 5,63\frac{m}{s}$$
$$\implies \text{Staudruck } q_{Prandtl} = \frac{\mathbf{r}}{2} \cdot v^{2} = \frac{1,225}{2} \cdot (5,63)^{2} Pa = 19,4Pa = \underline{1,9mmWS}$$

Dieser Geschwindigkeitswahl lag das Ziel zu Grunde, Luftwechselraten zu bestimmen, die selbst ohne Thermikeinwirkung an mehr als 50 % des Jahreszeitraumes durch natürliche Ventilation erreicht werden. Desweiteren wurde die Originalwindgeschwindigkeit direkt auf das Modell übertragen, da sich dadurch die Auswertung vereinfacht (**7**Kapitel 8.6. S.65).

Die eingestellte Vorschubgeschwindigkeit des X-Y-Schreibers betrug 20 mm/s. Als Ausgangskonzentration des Tracergases wurde $C_0 = 10^5$ ppm gewählt. Die Aufzeichnungen erfolgten jeweils für beide Meßstellen getrennt.

7.4. Entrauchungswirksamkeit

Die Untersuchungen zur Entrauchungswirksamkeit fanden für die Anströmrichtungen 0°, 90° und 270° statt. Die Windgeschwindigkeit wurde wie bei der Bestimmung der Luftwechselraten gewählt.

Der Ablauf war folgendermaßen. Nach vollständiger Verrauchung des Innenraumes wurde der Windkanal in Gang gesetzt und das Entweichen des Rauches auf Fotos, die mit einer Sequenz von t = 0,5 s geschossen wurden, festgehalten.

Es kam das aus durchsichtigem Plexiglas gefertigte Modell mit vollständig geöffneten Lüftungsflächen zum Einsatz.

8. Auswertung

8.1. Erkärung der verwendeten aerodynamischen Kenngrößen

8.1.1. Formbeiwert cp

Die auf den Baukörper wirkenden Kräfte werden durch die Energie der Anströmung verursacht. Da der Luftströmung auf der Strecke zwischen freier Anströmung und dem Auftreffen auf den Baukörper keine Energie zugeführt wird und auch die Reibung vernachlässigt werden kann, gilt der Energieerhaltungssatz. In der Aerodynamik kommt er meist in Form der Bernoulligleichung zur Anwendung.

Bernoulligleichung:
$$p_{statisch} + \frac{\mathbf{r}}{2} \cdot v^2 + \mathbf{r} \cdot g \cdot h = const.$$

Die Änderung der potentiellen Energie ist im Verhältnis zu den Änderungen der kinetischen und der inneren Energie vernachlässigbar gering, so daß gilt:

$$p_{\infty} + \frac{\mathbf{r}}{2} \cdot v_{\infty}^2 = p_{statisch} + \frac{\mathbf{r}}{2} \cdot v_1^2$$

mit: p_{∞} - statischer Druck der freien Anströmung

r - Luftdichte

 v_{∞} - Geschwindigkeit der freien Anströmung

 $p_{statisch}$ - statischer Druck an der Meßstelle

 v_1 - Windgeschwindigkeit an der Meßstelle

Die an einer Fläche wirkenden Druckkräfte resultieren aus der Druckdifferenz zwischen dem statischen Druck der Umgebung und dem statischen Druck an der Fläche. Diese Druckdifferenz ist abhängig von der Form des umströmten Körpers und der Position der untersuchten Meßstelle. Durch die geometrische Form des Körpers wird an diesem eine örtlich verschiedene Änderung der Strömungsgeschwindigkeit hervorgerufen, wodurch wiederum eine Änderung der statischen Drücke verursacht wird. Unter Einhaltung bestimmter Ähnlichkeitsbedingungen (7Kapitel 5) ist dieser Formeinfluß für unterschiedliche Anströmgeschwindigkeiten und für unterschiedliche Objektgrößen, unter Beachtung der geometrischen Ähnlichkeit, direkt übertragbar. Der Formeinfluß wird durch den wie folgt zu berechnenden Formbeiwert ausgedrückt.

$$\Delta p = p_{statisch} - p_{\infty} = \frac{\mathbf{r}}{2} \cdot (v_{\infty}^2 - v_1^2) = \frac{\mathbf{r}}{2} \cdot v_{\infty}^2 \cdot (1 - \frac{v_1^2}{v_{\infty}^2})$$
$$\Rightarrow \Delta p = \frac{\mathbf{r}}{2} \cdot v_{\infty}^2 \cdot c_p = q \cdot c_p$$
$$(q - \text{Staudruck})$$
$$\Rightarrow \text{Formbeiwert } c_p = \frac{p_{statisch} - p_{\infty}}{\frac{\mathbf{r}}{2} \cdot v_{\infty}^2}$$

Dieser Formbeiwert ist zeitabhängig, da die Anströmbedingungen durch die starke Turbulenz unterschiedlich stark schwanken. Die Zeitabhängigkeit der C_p-s wird dabei durch den wechselnden Anströmwinkel, bedingt durch die Wirbelbildung, verursacht.

8.1.2. Cp-RMS-Wert

Da die C_p-Werte zeitabhängig sind und die zeitlichen Schwankungen für die Ermittlung der resultierenden Dachlasten wichtig sind, kam es darauf an ,die Schwankungen der C_p-Werte zu quantifizieren. Zu diesem Zweck wurden die C_p-RMS wie folgt berechnet:

$$C_{p-RMS} = \frac{1}{T} \cdot \int_{0}^{T} (C_{p}(t) - C_{p\text{ mittel}})^{2} dt \quad \text{mit} \ C_{p\text{ mittel}} = \frac{1}{T} \cdot \int_{0}^{T} C_{p}(t) dt$$

Bei einer diskreten Ermittlung von einer Anzahl N C_p-Werten innerhalb einer Zeitspanne T ergibt sich:

$$C_{p-RMS} = \frac{1}{N} \cdot \sum_{n=1}^{N} (C_p(n) - C_{p \text{ mittel}})^2 \text{ mit } C_{p \text{ mittel}} = \frac{1}{N} \cdot \sum_{n=1}^{N} C_p(n)$$

Dabei müssen die Zeitabstände zwischen den C_p(n) äquidistant sein.



Bild 17 : prinzipieller zeitlicher Verlauf der Cp-Werte

8.1.3. Luftwechselrate

Das entscheidende Maß zur Beurteilung der Lüftungswirksamkeit ist die Luftwechselrate L. Sie gibt an, wie oft in einer Zeiteinheit das Gasvolumen in einem definierten umschlossenen Raum ausgetauscht wird. Sie wird mit Hilfe der Tracergas-Methode bestimmt. Die Tracergaskonzentration C(t) unterliegt dabei folgendem Gesetz:

$$C(t) = C_0 \cdot e^{-Lt}$$

mit: C_0 – Anfangskonzentration des Tracergases
 $C(t)$ – momentane Tracergaskonzentration
 L – Luftwechselrate = $\frac{\dot{V}}{V}$
 \dot{V} – Lüftungsvolumenstrom
 V – Hallenvolumen

Unter der Konzentration des Tracergases versteht man dabei folgende Größe:

Konzentration des Tracergases: $C = \frac{Anzahl Tracergasmoleküle pro Volumen}{Gesamtanzahl Gasmoleküle pro Volumen}$

Die Angabe erfolgt in: $[ppm](parts per million) = 10^{-6}$

8.2. Auswertung des Vorversuches

Für eine Bemessungswindgeschwindigkeit von 26,4 m/s (**7**Kapitel 8.3 S.63) in Firsthöhe ergibt sich für das Original die Reynoldszahl zu:

$$\operatorname{Re}_{\operatorname{Original}} = \frac{v_{m,23} \cdot D_{Zylindersegment}}{n} = \frac{26,4 \frac{m}{s} \cdot 86m}{1,5 \cdot 10^{-5} \frac{m^2}{s}} = 151 \cdot 10^6$$

Dieser Wert zeigt, daß die Umströmung der Eingangshallen bei Bemessungswindgeschwindigkeit überkritisch erfolgt.

Mit dem Windkanal ist ein maximaler Staudruck in 450mm Höhe von $q \approx 200$ Pa erreichbar. Damit errechnet sich die Reynoldszahl des Modelles folgendermaßen:

$$q_{450} = \frac{\mathbf{r}}{2} \cdot v_{450}^2 \Longrightarrow v_{450} = \sqrt{\frac{q_{450} \cdot 2}{\mathbf{r}}} = \sqrt{\frac{200 \frac{N}{m^2} \cdot 2}{1,225 \frac{kg}{m^3}}} = 18,1\frac{m}{s}$$

entsprechend dem Exponentialgesetz ist die

erreichbare Geschwindigkeit in Firsthöhe :

$$v_{95} = v_{450} \cdot \left(\frac{h_{First}}{h_{Prandtl}}\right)^{a_{p}} = 18,1\frac{m}{s} \cdot \left(\frac{95}{450}\right)^{0.3} = 11,4\frac{m}{s}$$
$$\Rightarrow \operatorname{Re}_{Modell} = \frac{v_{95} \cdot D_{Zylinder}}{n} = \frac{11,4\frac{m}{s} \cdot 0,34m}{1,5 \cdot 10^{-5}\frac{m^{2}}{s}}$$
$$\underline{\operatorname{Re}_{Modell}} = 2,6 \cdot 10^{5}$$

An diesem Wert kann man erkennen, daß im Modellversuch nur eine Re-zahl erreichbar ist, die knapp unter der kritischen Re-zahl von Re = $4 \cdot 10^5$ liegt. Deshalb kam es im Versuch darauf an, nachzuweisen, daß der Einfluß der Zy-linderrauhigkeit (Dachgitter) ausreicht, um trotzdem einen überkritischen Druckverlauf zu erzeugen.

Es wurden die Messungen entsprechend Kapitel 7.1 S.36 durchgeführt. Dabei rechnete der Computer den Staudruck in Prandtlrohrhöhe selbständig entsprechend dem Exponentialgesetz in den Staudruck der Firsthöhe um. Mit diesem Wert wurden die C_{p-mittel}- und die C_{p-RMS}-Werte ermittelt. Die Zuordnung der Dateinamen geschah folgendermaßen (Dateien **7** Anhang S.4-9):

-Außendruckmessung Dach; ohne Bebauung: DESO-000.DAT -Außendruckmessung Dach; nur mit Vorlaufbebauung:DESV-000.DAT -Außendruckmessung Dach; mit kompletter Bebauung:DEST-000.DAT Mit Hilfe eines am Institut für Industrieaerodynamik (I.F.I.) vorhandenen Auswertungsprogrammes wurden danach die C_{p-mittel}-Werte den entsprechenden Orten der Meßstellen zugeordnet.(\neg Anhang S.10-12).

Um Vergleiche mit den Druckverteilungen an einem frei umströmten Kreiszylinder anstellen zu können, sind die Ergebnisse für den Meßschnitt der Bohrungen 25 - 37 (Lage **7**Bild 11 S.27) zusammen mit den C_p-Werten des Kreiszylinders in Bild 18 aufgetragen. Es wurde der Meßschnitt der Bohrungen 25 - 37 gewählt, da in diesem Bereich der Einfluß der Kantenumströmung vernachlässigbar ist.

In diesem Diagramm kann man erkennen, daß:

- der Druck im Nachlauf, d.h. an der leeseitigen Fläche des Modells, mit guter Näherung dem Heckdruck eines überkritisch umströmten Zylinders entspricht.
- der Aufstaueffekt auf der Luvseite, insbesondere bei Berücksichtigung der vorgelagerten Hallen vergleichsweise klein ist.
- der Unterdruck im Bereich des Äquators erheblich niedriger ist als f
 ür den frei umstr
 ömten Zylinder.
- der Übergang vom luvseitigen Aufstaugebiet mit Überdruck zum stromabwärtigen Unterdruckbereich für die Modellhalle bei größeren Winkeln erfolgt.
- durch die vorgelagerten Ausstellungshallen im Fußpunktbereich der Eingangshalle ein geringer Unterdruck erzeugt wird.

Der geringe Unterdruck im Fußpunktbereich ist durch die Abschattungswirkung und die dadurch bedingte Verringerung der örtlichen Anströmgeschwindigkeit der vorgelagerten Ausstellungshallen zu erklären. Bild 19 macht diesen Sachverhalt anschaulich deutlich.

Der vergleichsweise geringe Unterdruck für den größten Bereich der umströmten Hallenkontur ist durch die nur geringe Verdrängung der Luftströmung durch die Halle bedingt. Ein Maß für die Verdrängungswirkung ist das Verhältnis von Hallenhöhe zu Hallentiefe h/t = 23/80 = 0,29.

Newberry and Eaton [8] veröffentlichten 1974 Untersuchungen, in denen der Fall eines Verhältnisses y/d = 0,2 vorkommt. Sie untersuchten die Baukörper ebenfalls bei leicht unterkritischer Anströmung und mit großer Oberflächenrauhigkeit.

Die für y/d = 0,2 angegebenen Werte (\neg Bild 20) stimmen recht gut mit den im Vorversuch gewonnenen Werten überein. Die vergleichsweise größeren C_p-Werte in Äquatornähe des Vorversuches, sind durch die von der sehr großen Rauhigkeit der Eingangshalle (Dachgitter!) verursachte extrem große Strömungsabbremsung in Oberflächennähe zu erklären. Die im Heckbereich ähnlichen C_p-Werte bestätigen die Richtigkeit der Messung.



45

Bild 19: Einfluß einer Vorlaufbebauung auf das Geschwindigkeitsprofil [7]

Bild 20: C_p-Werte für verschiedene Dachformen [8]

Aufgrund der Übereinstimmung der Heck- C_p -Werte des Vorversuches mit den Heck- C_p -Werten des überkritisch umströmten Zylinders kann mit Sicherheit gesagt werden, daß die große Oberflächenrauhigkeit ausreichte, um doch noch eine überkritische Umströmung der Eingangshalle wie im Original zu erreichen.

Somit sind die $C_{p-mittel}$ -Werte des Modellversuches auf die Originalversion übertragbar.

8.3. Bewertung der gemessenen Drücke

Die gemessenen Drücke für die in Kapitel 7.2. beschriebenen Meßanordnungen wurden in den Dateien DEST-000.DAT bis IN-B-330.DAT abgespeichert und sind im Anhang auf den Seiten 15 - 34 ausgedruckt.

8.3.1.Außendruckverteilung der Eingangshalle West

Auf den Seiten 12 und 13 des Anhanges kann man die Verteilung der C_{p mit-tel}-Werte und der C_{p-RMS}-Werte für den westlichen Teil der Eingangshalle West bei Anströmung aus Nord (0°) sehen. Zeitlich gemittelte Überdrücke ergeben sich lediglich in einem relativ kleinen luvseitigen Bereich bis zu einem Polarkoordinatenwinkels-bezogen auf die Horizontale- von 60°. Größere lokale Druckbeiwerte (C_{p mittel} $\ge 0,7$) sind nur auf einem sehr kleinen Teilbereich der Dachfläche zu beobachten. Für den größten Teil des Überdruckbereiches ist C_{p mittel}. $\le 0,4$. Im mittleren Bereich der Eingangs-halle tritt der Übergang vom Überdruck- zum Unterdruckgebiet bei einem Polarkoordinatenwinkel von $\approx 50^{\circ}$ auf . Für den Winkelbereich $\ge 60^{\circ}$ ergibt sich ein zeitlich gemittelter Winddruck entsprechend C_{p mittel} = -0,3 bis -0,2. Infolge der durch die Kantenumströmung verursachten Beschleunigung er-geben sich im westlichen Fußpunktbereich der Dachfläche deutlich aus-geprägte Unterdruck-zonen (C_{p mittel} $\approx -0,2$).

Auf weiten Teilen der Dachfläche betragen die Druckschwankungsbeiwerte $C_{p \ RMS} \approx 0,1$. Deutlich energiereichere Druckschwankungen traten im Bereich der größten $C_{pmittel}$ -Werte (ca.40°) auf ($C_{p \ RMS} \approx 0,25$). Insgesamt sind die Druckschwankungsbeiwerte etwa um den Faktor 2 kleiner als die $C_{p \ mittel}$ -Werte. Sie besitzen also die gleiche Größenordnung.

Die C_{p mittel}-und die C_{p RMS} für die Fassadenfläche bei einem Anströmwinkel von 270° (d.h. frontal auf Fassadenfläche aus Westrichtung) sind im Anhang auf Seite 14 eingetragen. Die C_p-Werte der gesamten Stirnfläche liegen in folgendem Bereich: $0,57 \le C_p$ mittel $\le 0,8$. Für die Druck-

schwankungsbeiwerte ergab sich ein Betrag von $C_{p \text{ RMS}} \approx 0.3$. Die größten Drücke traten erwartungsgemäß in dem an das überkragende Dach angrenzenden Bereich auf.

8.3.2 Halleninnendruck

Bei den Halleninnendrücken traten wesentlich geringere Schwankungen, d.h. kleinere C_{pRMS}-Werte auf, als bei den Außendrücken. Dies ist durch, die im Verhältnis zum Hallenvolumen, kleine Lüftungsfläche zu erklären. Aus diesem Grunde ist es zulässig, bei der Ermittlung der aus den Innen-und Außendrücken resultierenden C_{pRMS}-Werte nur die Schwankungswerte der Außendrücke zu verwenden.

Aufgrund der geringen Unterschiede der Meßwerte für die Meßstellen 1-10 wurde es möglich, bei der Ermittlung der resultierenden Dachlasten für die gesamte Außenfläche der Halle mit einem charkteristischen $C_{p \text{ mittel}}$ -Wert für jede Windrichtung und Lüftungsvariante zu arbeiten.

Die Ergebnisse sind in Bild 21 dargestellt. Dabei wurden die Innendruckbeiwerte $C_{p \text{ mittel}}$ über dem Anströmwinkel aufgetragen

In diesem Diagramm kann man erkennen, daß sich für vollständig geöffnete Lüftungsflächen bei allen Windrichtungen im Halleninneren ein Unterdruck einstellt. Dieser führt in den Bereichen äußeren Unterdruckes zu einer Reduzierung der Bemessungswindlasten und in Bereichen äußeren Aufstaus zu einer Erhöhung der resultierenden Windbelastung.

Sind dagegen die Lüftungsöffnungen nur auf der Luvseite geöffnet, so stellt sich im Halleninneren ein wesentlich größerer Druck ein. Dies reduziert die resultierenden Lasten in Gebieten äußeren Überdruckes, führt jedoch zur Erhöhung der resultierenden Windlasten im Bereich äußeren Unterdruckes.

8.4. Resultierende Druckbeiwerte

8.4.1. Quasistatisches Methode

In der Literatur findet man zwei Konzepte zu Ermittlung der resultierenden Druckbeiwerte.

Der quasistatischen Methode liegt die einfache Annahme zugrunde, daß das Bauwerk auf die Änderungen der atmosphärischen Windströmung so reagiert, als ob diese Änderungen nur durch die Änderungen der Windgeschwindigkeit und/oder der Windrichtung hervorgerufen würden. Diese Annahme wäre dann richtig, wenn die Turbulenzballen der atmosphärischen Windströmung relativ zu den Bauwerksabmessungen sehr groß wären, sich also innerhalb der Wirkdauer einer Böe ein stationäres Strömungsfeld um das Bauwerk ausbilden würde.

Bild 21: Innendruckbeiwerte über Anströmrichtung

Änderungen des Druckfeldes wären dabei direkt mit den Änderungen der Anströmung korreliert. Die höchste im Bemessungszeitraum zu erwartende Windlast ergibt sich dann durch Multiplikation des zeitlich gemittelten , d.h. von der Zeit unabhängigen Formbeiwertes $C_{p \text{ mittel}}$ mit dem maximal in einer Böe zu erwartenden Windstaudruck:

$$W = C_{\text{p mittel}} \cdot q_{\text{Böe}}$$

Da bei der Größe der Eingangshalle der Neuen Messe Leipzig nicht zu erwarten ist, daß das Bauwerk von den einzelnen Turbulenzballen vollständig umschlossen wird, kann nicht davon ausgegangen werden, daß sich um die Halle ein stationäres Strömungsfeld ausbildet.

Aus diesem Grunde kommt dieses Windlastkonzept hier nicht zur Anwendung.

8.4.2. Spitzenfaktormethode

Die Ermittlung der Windlasten mit der Spitzenfaktormethode entspricht wesentlich besser der Realität, da auch kurzzeitige Schwankungen der Anströmung berücksichtigt werden. Bei diesem Konzept werden auch die Böen, die das Gebäude nicht vollständig umschließen und daher dieses nur lokal mit Lasten beaufschlagen, bei der Lastermittlung berücksichtigt.

Die Windlast errechnet sich dabei nach Davenport [9] folgendermaßen:

$$W = (C_{\text{p mittel}} \pm \mathbf{k} \cdot C_{\text{p RMS}}) \cdot \frac{\mathbf{r}}{2} \cdot v_{10\text{Minuten}}^2$$

mit:

k = Spitzenfaktor

 $v_{10min} = 10 - Minuten - Mittelwert der Windgeschwindigkeit$

Die Bemessungslasten (maximal bzw. minimal auftretende Lasten) werden dabei wie folgt bestimmt:

$$W_{\max} = \widehat{W} = \widehat{C}_{p} \cdot q_{Bemessung} \quad \text{und} \quad W_{\min} = \widetilde{W} = \widetilde{C}_{p} \cdot q_{Bemessung}$$

mit:
$$\widehat{C}_{p} = Max_{allerWindrichtungen}(C_{p \text{ resultierend mittel}}) + k \cdot Max_{alleWindrichtungen}(C_{pRMS}) = C_{p \max}$$

$$\widetilde{C}_{p} = Min_{allerWindrichtungen}(C_{p \text{ resultierend mittel}}) - k \cdot Max_{alleWindrichtungen}(C_{pRMS}) = C_{p \min}$$

für die Eingangshalle NML gilt :
$$C_{p \text{ resultierend mittel}} = C_{p \text{ uußen mittel}} - C_{p \text{ innen mittel}}$$

$$C_{pRMS} = C_{pRMSaußen}$$

(Begründung siehe Kapitel 8.3.2.)

Dabei lag die Vereinbarung zu Grunde, daß Lasten, die das Dach nach unten drücken als Druck und daß Lasten, die das Dach nach oben drücken bzw. ziehen als Sog bezeichnet werden.

Somit ergibt sich folgende Zuordnung:

 C_{pmax} - Spitzendruckbeiwert C_{pmin} - Spitzensogbeiwert

Als Spitzenfaktor k für Gebäude wurden ursprünglich von *Davenport* Werte im Bereich 3 bis 5 angegeben. Aus zahlreichen Windkanaluntersuchungen ist bekannt, daß örtlich begrenzt an Gebäudeaußenflächen, insbesondere an windparallelen Fassaden, erheblich größere Spitzenfaktoren auftreten können. Werte bis k ≈ 10 wurden bereits nachgewiesen. Diese hohen Spitzenfaktoren betreffen jedoch nur kleinflächige Bereiche. Sie sind also für die Dimensionierung der Tragstruktur vernachlässigbar. Es ist daher sinnvoll, bei der geplanten Eingangshalle West, für die Standsicherheit der Tragstruktur mit anderen Spitzenfaktoren zu rechnen, als für die Standsicherheit der Glaspanelen. Nach den in der Literatur vorliegenden Informationen (**7**[9]) ist folgende Wahl sinnvoll:

Dimensionierung der Tragstruktur	<u>k_T= 3</u>
Dimensionierung von Bauteilen	<u>k_F= 6</u>

8.4.3. Ermittlung der resultierenden Druckbeiwerte

Zuerst wurden Dateien für C_{presultierendmittel} entsprechend der Gleichung in Kapitel 8.4.2 erstellt. Dazu wurden den Druckmeßstellen der Außendruckmessung die charakteristischen Innendrücke der betreffenden Windrichtung zugeordnet. Dabei wurde darauf geachtet, daß am Überhang nicht die Innendrücke angreifen, sondern die Außendrücke der Fassaden-fläche. Mit den so erstellten Innendruckdateien und den entsprechenden Außendruckdateien ermittelte der Computer die C_{pmax} -, die C_{pmin} -und die C_{pRMSmax}-Werte aller Anströmrichtungen für die beiden Varianten: Lüftungen vollständig geöffnet und Lüftungsvarianten die C_p-Spitzenmaximal- und minimalwerte mit den Spitzenfaktoren 3 und 6 berechnet. Sämtliche Werte wurden sofort den Orten der Druckmeßstellen zugeordnet und auch in dieser Form ausgegeben. Sie sind im Anhang auf den Seiten 51-64 ausgedruckt.

Anhand der zugeordneten C_p-Spitzenmaximal- und Minimalwerte konnten die Isobarenverläufe gezeichnet werden.

8.4.4. Bewertung der C_p-Spitzenwerte-Isobarenverläufe für die Tragstruktur

Die Isobarenverläufe, Bilder 22 und 23, zeigen die einhüllenden Spitzendruck-, und Spitzensogbeiwerte für vollständig geöffnete Lüftungen und in den Bildern 24 und 25 sind diese Kurven für nur im Luv geöffnete Lüftungen zu sehen. Für die Spitzendruckbeiwerte verlaufen die Isobaren näherungsweise parallel zur Hallenachse und für die Spitzensogbeiwerte annähernd senkrecht zur Hallenachse. Die größten Druckbelastungen der Dachfläche ergeben sich also bei Anströmung senkrecht zur Hallenachse und die größten Sogbelastungen bei Anströmung parallel zur Hallenachse. Die besonders großen resultierenden Sogbelastungen entlang der westlichen Hallenkante sind durch den Aufstau bei Anströmung aus westlichen Richtungen unterhalb des überkragenden Daches bedingt. Die größte Druckbelastung ergibt sich bei vollständig geöffneten Lüftungsflächen. Sowohl die Zonen maximaler Druckbelastung als auch die Spitzendruckbeiwerte selbst sind hier deutlich größer, als für die Lüftungssituation, bei der lediglich die luvseitigen Lüftungsflächen geöffnet sind. Demgegenüber ergeben sich bei der resultierenden Sogbelastung nur relativ geringe Unterschiede für die beiden untersuchten Lüftungssituationen.

Wie man in den Abbildungen aus den Seiten 68/69 und 75/76 des Anhanges sehen kann, sind die resultierenden Drücke für die Fassadenflaechen recht gleichmäßig verteilt. Aus diesem Grunde kann daher für die gesamte Fläche mit folgenden Werten gerechnet werden.:

> Spitzendruckbeiwert $C_{pmax} = 1,80$ Spitzensogbeiwert $C_{pmin} = -0,7$

Für die Dimensionierung der die Eigangshalle überspannenden Bögen ist unter Umständen die Lastverteilung bei Anströmung senkrecht zur Hallenachse(0°) ausschlaggebend. Deshalb wurde die Verteilung der Spitzendruckbeiwerte für den Aufstaubereich und der Spitzensogbeiwerte in Kurven für vollständig geöffnete Lüftungen und nur luvseitig geöffnete Lüftungen im Bild 26 zusammengefaßt. Für den Normalfall der vollständig geöffneten Lüftungen ergibt sich Spitzensogbeiwert Teil für den größten des Hallendaches ein $C_{pmin} \approx -0.75$ bis -0.6 . Für den Aufstaubereich ergibt sich ein maximaler Spitzendruckbeiwert $C_{pmax} = 1,38$.

Bild 22: Spitzendruckbeiwerte für die Tragstruktur (Lüftungen vollständig geöffnet, k=3)

Bild 23: Spitzensogbeiwerte für die Tragstruktur (Lüftungen vollständig geöffnet, k=3)

Bild 24: Spitzendruckbeiwerte für die Tragstruktur (Lüftungen nur luvseitig geöffnet, k=3)

Bild 25: Spitzensogbeiwerte für die Tragstruktur (Lüftungen nur luvseitig geöffnet, k=3)

Bild 26: Spitzendruck-bzw.Spitzensogbeiwertverteilung bei Anströmrichtung 0°

8.4.5. Bewertung der C_p-Spitzenwerte-Isobarenverläufe für Panele und Panelehalterungen-

Die Spitzendruckverteilung für die Glaspanelen und ihre Halterungen sind in den Bildern 27-30 analog zu den Isobarenverläufen (Bilder 22-25) für die Tragstruktur dargestellt. Es wurden wiederum die Lüftungssituationen betrachtet, bei denen alle Zuluft- und Abluftflächen geöffnet sind bzw. lediglich die nördlichen Zuluftflächen geöffnet sind. Die Spitzendruckverteilungen (Bilder 27 und 29) zeigen wiederum deutlich den Aufstaueffekt auf der Luvseite. Infolge der großen Druckschwankungen treten jedoch auch auf der Restfläche kurzzeitig deutliche Überdrücke auf.

Die größten Sogbelastungen (vereinbarungsgemäß nach oben gerichtete Belastungen) traten erwartungsgemäß im Bereich des Dachüberstandes auf (7Bilder 28 und 31). Hier ergaben sich lokale Belastungen entsprechend einem Spitzensogbeiwert C_{pmin} = -4,13 . Auch der an diesen Dachüberstandbereich angrenzende Dachstreifen ist relativ stark durch Sog belastet. Der größte Teil der Dachfläche erfuhr die größten nach außen gerichteten Belastungen bei nur luvseitig geöffneten Lüftungen(7Bild 30).

Für die Fassadenflächen ergaben sich, ähnlich wie bei der Betrachtung der Windlasten für die Tragstruktur (**7**Kapitel 8.4.4.), relativ konstante Spitzendruck- und Spitzensogbelastungen. Aus den Abbildungen auf den Seiten 70/71 und 77/78 des Anhanges wurden folgende Spitzenwerte für die gesamte Fassadenfläche entnommen:

> Spitzendruckbeiwert $C_{pmax} = 2.8$ Spitzensogbeiwert $C_{pmin} = -1.2$

Bild 27: Spitzendruckbeiwerte für die Panele (Lüftungen vollständig geöffnet, k=6)

Bild 28: Spitzensogbeiwerte für die Panele (Lüftungen vollständig geöffnet, k=6)

Bild 29: Spitzendruckbeiwerte für die Panele (Lüftungen nur luvseitig geöffnet, k=6)

Bild 30: Spitzensogbeiwerte für die Panele (Lüftungen nur luvseitig geöffnet, k=6)

8.5. Berechnung des Bemessungsstaudruckes

Um letztendlich aus den C_p-Spitzenwerten des Modelles die tatsächlich zu erwartenden Belastungen am Originalbauwerk entsprechend den Gleichungen im Kapitel 8.4.2. ermitteln zu können, mußte noch die Bemessungswindgeschwindigkeit, aus welcher der Bemessungsstaudruck resultiert, berechnet werden. Der Entwurf zum Eurocode 1, Part 6 schreibt folgende Berechnung vor:

$$v_m(z) = C_r(z) \cdot C_{tr}(z) \cdot v_{ref}$$

mit:

 v_{ref} = Bezugsgeschwindigkeit = 50 – Jahres, 10 – min – Mittelwert in 10m Höhe

 $C_r(z) = Rauhigkeitsbeiwert$ $C_r(z) = Übergangsbeiwert$

Im vorliegenden Fall ist $C_{tr}=1$ und C_r war wie folgt zu berechnen:

$$C_r(z) = K \cdot \ln(\frac{z}{z_0})$$

mit den Werten entsprechend Rauhigkeitskategorie 3 (Vorstadtbebauung)

$$K = 0,22$$

$$z_0 = 0,3m$$

und einer Firsthöhe

$$z = 23m$$

$$\downarrow$$

$$C_{r,23} = 0,22 \cdot \ln(\frac{23m}{0,3m}) = 0,95$$

Da Leipzig in der Windzone II liegt, war mit $v_{ref} = 27,6m/s$ zu rechnen. Damit ergab sich für die Bemessungswindgeschwindigkeit:

$$v_{m,23} = 0.95 \cdot 1 \cdot 27.6 \text{ m/s} = 26.4 \text{ m/s}$$

Dies entspricht einem Bemessungsstaudruck von:

$$q_{Bemessung 23m} = \frac{\mathbf{r}}{2} \cdot v_{m23}^{2} = \frac{1,225 \frac{kg}{m^{3}}}{2} \cdot (26,4\frac{m}{s})^{2} = 0,42 \frac{kN}{m^{2}}$$

8.6. Berechnung der Luftwechselraten

Aus den Untersuchungen, entsprechend Kapitel 7.3. wurden die Abklingkurven der Konzentration des Tracergases (**7**Anhang S.80 - 93)gewonnen. Aus diesen wurden dann die Luftwechselraten nach folgendem Verfahren berechnet.

Die Konzentration eines Tracergases unterliegt folgendem Gesetz:

$$C(t) = C_0 \cdot e^{-L \cdot t}$$

Daraus folgt mit:

$$C_{1}(t_{1}) = C_{0} \cdot e^{-L_{Modell} \cdot t_{1}} \quad \text{und} \quad C_{2}(t_{2}) = C_{0} \cdot e^{-L_{Modell} \cdot t_{2}}$$

$$\frac{C_{1}(t_{1})}{C_{2}(t_{2})} = \frac{C_{0} \cdot e^{-L_{Modell} \cdot t_{1}}}{C_{0} \cdot e^{-L_{Modell} \cdot t_{2}}} = e^{-L_{Modell} \cdot (t_{2} - t_{1})} \Rightarrow \ln \frac{C_{1}}{C_{2}} = -L_{Modell} \cdot (t_{2} - t_{1})$$

$$\Rightarrow L_{Modell} = \frac{\ln C_{2} - \ln C_{1}}{t_{2} - t_{1}}$$

Die Wertepaare (C_{1} , t_{1}) und (C_{2} , t_{2}) konnten nach dem Darüberlegen einer Meßfolie durch einfaches Ablesen von Werten gewonnen werden. Auf der durchsichtigen Meßfolie war ein Gitter gedruckt, welches in horizontaler und vertikaler Richtung linear geteilt war. In vertikaler Richtung war zusätzlich der Zeitmaßstab 20mm/sek (entsprechend der Einstellung des X-Y-Schreibers) aufgetragen. Der vertikale Maßstab mußte nicht mit den tat-sächlichen Konzentrationen übereinstimmen. Dies zeigt folgende Ableitung:

$$L = \frac{\ln K \cdot C_2 - \ln K \cdot C_1}{t_2 - t_1} = \frac{(\ln K + \ln C_2) - (\ln K + \ln C_1)}{t_2 - t_1} = \frac{\ln C_2 - \ln C_1}{t_2 - t_1} = L$$

Vor dem Ablesen der Werte wurden die kurzzeitigen Schwankungen der Abklingkurven durch Einzeichnen interpolierender Kurven ausgeglichen.

Zur Vereinfachung der Auswertung wurde ein FORTRAN-Programm (**7**Anhang S.79) Umfanges erstellt, welches aus den abgelesenen Wertepaaren die Luftwechselraten berechnete und in geeigneter Form ausgab. Den Ausdruck der Ergebnisse zeigt Bild 31. In diesem Programm wurde auch gleich die Um-

rechnung der Modellluftwechselraten in die Originalluftwechselraten entsprechend der im folgenden abgeleiteten Formel vorgenommen.

$$(\frac{f \cdot l}{u})_{\text{Original}} = (\frac{f \cdot l}{u})_{\text{Modell}} \quad \text{(Strouhal siehe Kapitel 5.2)}$$
$$\Rightarrow L_{\text{Original}} = \frac{l_{\text{Modell}}}{l_{\text{Original}}} \cdot \frac{u_{\text{Original}}}{u_{\text{Modell}}} \cdot L_{\text{Modell}} = \frac{1}{M} \cdot L_{\text{Modell}}$$
$$\text{mit:}$$

Windgeschwindigkeit $u_{\text{Original}} = u_{\text{Modell}}$ (wurde im Versuch so gewählt)

Modellmaßstab $M = \frac{l_{Original}}{l_{Modell}}$

Diese Umrechnung ist zulässig, da die Luftwechselrate analog zu einer Frequenz f angibt, wie oft die Luft pro Zeiteinheit ausgetauscht wird. Unter Berücksichtigung der Umrechnung von Sekunde in Stunde ergibt sich für die stündliche Luftwechselrate des Originals:

$$L_{\text{Original,stündlich}} = \frac{\ln C_2 - \ln C_1}{t_2 - t_1} \cdot \frac{3600}{\text{Modellmaßst.}} \left[\frac{1}{h}\right]$$

Die Mittelwerte der Meßstellen Nr.1 und Nr.2 wurden für die verschiedenen Lüftungssituationen über dem Anströmwinkel aufgetragen. Diese Kurven zeigt Bild 32. Danach ergibt sich die ungünstigste Lüftungsituation bei Anströmung etwa senkrecht zur Hallenachse (330° bis 360°). Die Ursache dafür liegt darin, daß für diese Windrichtungen der Halleninnendruck näherungsweise dem äußeren Druck an der leeseitigen Zuluftfläche entspricht und nur eine recht geringe Druckdifferenz zwischen Halleninnendruck und Außendruck im Firstbereich auftritt. Für diese kritischen Windrichtungen ergibt sich bei 5 vollständig geöffneten Jalousiereihen eine Luftwechselrate von L = 4 h⁻¹. Bei 3 vollständig geöffneten Jalousiereihen beträgt L = 3 h⁻¹. Reduziert man die Zu- und Abluftflächen gleichmäßig, so ergeben sich stärkere Verringerungen der Luftwechselraten. Dies deutet darauf hin, daß für die untersuchten Verhältnisse von Abluft- zu Zuluftflächen der Einfluß der Abluftfläche dominiert.

Der Modellmaßstab betraegt: 1:2 Propankonzentrationen C in: 10E5 p Zeiten t in: sek. Luftwechselraten in: 1/h	50. pm C(t1)	tl	C(t2)	t2 Luft	wechselrate
270 Grad vollst.geoeffnet Nr.1 270 Grad vollst.geoeffnet Nr.2 270 Grad halb geoeffnet Nr.1 270 Grad halb geoeffnet Nr.2 270 Grad viertel geoeffnet Nr.2 270 Grad nur untere 3 Jalous.Nr.1 270 Grad nur untere 3 Jalous.Nr.1 270 Grad vollst.geoeffnet Nr.2 300 Grad vollst.geoeffnet Nr.1 300 Grad halb geoeffnet Nr.2 300 Grad viertel geoeffnet Nr.2 300 Grad viertel geoeffnet Nr.1 300 Grad viertel geoeffnet Nr.1 300 Grad vollst.geoeffnet Nr.2 300 Grad viertel geoeffnet Nr.1 300 Grad viertel geoeffnet Nr.2 300 Grad vollst.geoeffnet Nr.2 300 Grad viertel geoeffnet Nr.2 300 Grad nalb geoeffnet Nr.2 300 Grad nur untere 3 Jalous.Nr.1 300 Grad nur untere 3 Jalous.Nr.2	$\begin{array}{c} 10.0\\ 10.0\\ 10.0\\ 11.0\\ 10.0\\ 11.0\\ 10.5\\ 11.0\\$	1786253550028510008526097002	5005005000500055555555855085 	7.00 11.80 11.00 11	7.312 3.263 4.73509 9.28395 4.37509 5.15045 4.329475 4.32944 3.15445 5.1663526 2.3355 1.1663526 1.1669979 4.34774 1.46457778 4.3236 1.43278 1.43278

Neue Messe Leipzig Luftwechselraten

Bild 31: Tabelle der Luftwechselraten

Bild 32: Luftwechselraten über Anströmrichtung

8.7. Beurteilung der Entrauchungswirksamkeit

8.7.1 Anströmung senkrecht zur Hallenachse (0°)

Die Ergebnisse für die Anströmung senkrecht zur Hallenachse sind in den Fotos (Bilder 33a bis 33c) zu sehen. Das Zeitintervall zwischen den Fotos beträgt $\Delta t = 5$ sek.. In Anbetracht der Tatsache, daß die Untersuchungen bei der Windgeschwindigkeit erfolgten, bei der auch die Beurteilung der Entrauchungswirksamkeit für das Original erfolgen soll, ist diese Zeitspanne wie folgt auf das Original umzurechnen.

 $\Delta t_{Original} = Modellmaßstab·\Delta t_{Modell}$

Die Zeitspanne zwischen den Fotos beträgt also bezogen auf das Original:

 $\Delta t_{Original} = 250 \cdot 4 \text{ sek} \approx 21 \text{ min}$

In Bild 33a sind folgende Tatsachen zu erkennen:

-starke Einströmung an der luvseitigen Zuluftfläche

-starke Ausströmung an der leeseitigen Zuluftfläche

-schwache Ausströmung an der Abluftfläche im Firstbereich

Die Ursachen dafür liegen in der Druckverteilung über der Dachfläche (**7**Bild 18 S.43), wobei noch hinzu kommt, daß die wirksame Fläche der Firstöffnung geringer ist, als die geöffnete Fläche der 5 Jalousiereihen.

Desweiteren ist in Bild 33a ein wesentlich stärkerer Rauchaustritt in der Nähe der Fassadenfläche sichtbar. Dieser resultiert aus der infolge Kantenumströmung auftretenden Sogspitze.

In Bild 33b sind die Halleneinbauten infolge der erheblichen Abnahme der Rauchdichte schon deutlich zu erkennen.

Nach umgerechnet 42 min ist die Halle vollständig entraucht (Bild 33c).

Bei Augenbeobachtung während des Versuches war zu erkennen, daß aus den leeseitigen Zuluftflächen in unregelmäßigen Zeitabständen auch Rauch austritt. Die Druckschwankungen, insbesondere an der Außenfläche , führten dazu, daß sich an diesen Öffnungen abwechselnd positive und negative Druckdifferenzen, d.h. Einströmungen und Ausströmungen einstellen.

Bild 33a: Anströmrichtung 0° , t = 0 s

Bild 33b: Anströmrichtung 0° , t = 4 s

Bild 33c: Anströmrichtung 0° , t = 8 s

8.7.2. Anströmung parallel zur Hallenachse (270° und 90°)

Eine deutlich raschere Entrauchung stellt sich bei Anströmung parallel zur Hallenachse sowohl für 270° als auch für 90° ein(7Bilder 34a bis 34c und 36a bis 36c). Das Zeitintervall zwischen den Fotos betrug $\Delta t = 2.5$ s. Der Entrauchungsvorgang ist bereits nach 5s (Modellzeit), entsprechend etwa 21 min in der Natur, vollständig abgeschlossen. Der Rauchaustritt zu Beginn des Versuches (7/Bild 34a) ist durch den Strömungsimpuls der Rauchsonde bedingt. Bei beiden Anströmrichtungen ließ sich eine besonders wirksame Entlüftung im Bereich der Fassadenflächen erkennen (7Bilder 34b und 36a). Der Grund dafür ist in der Kantenumströmung, welche starke Sogspitzen verursachte, zu sehen. Dieser Effekt trat sowohl im Fuß- als auch im Firstbereich auf. Die stirnseitigen Sogspitzen führten im Halleninneren zu einer deutlichen Luftbewegung in Richtung der Stirnseiten. Die Bilder 35 und 37 verdeutlichen die dabei entstandene Wirbelbildung. Bei einer nicht geteilten Halle, wie im Original, würden sich diese gegenläufigen Wirbel gegenseitig abschwächen und zu einer etwas größeren Dauer bis zur vollständigen Entrauchung führen. Die in den Modellversuchen gemessene Entrauchungszeit von 5s (entsprechend 21min in der Natur) dürfte aber trotzdem nicht über der Entrauchungszeit bei Anströmung quer zur Hallenachse (0°) liegen.

Bild 34a: Anströmrichtung 270°, t = 0 s

Bild 34b: Anströmrichtung 270°, t = 2,5 s

Bild 34c: Anströmrichtung 270°, t = 5 s

Bild 35: Wirbelbildung im Halleninneren bei Anströmrichtung 270°

Bild 36a: Anströmrichtung 90°, t = 0 s

Bild 36b: Anströmrichtung 90°, t = 2,5 s

Bild 36c: Anströmrichtung 90°, t =5 s

Bild 37: Wirbelbildung im Halleninneren, Anströmrichtung 90°
8.7.3 Vergleich zwischen Anströmung parallel und Anströmung senkrecht zur Hallenachse

Die Strömungsbeobachtung zeigte, daß die Entlüftungswirksamkeit bei Anströmung parallel zur Hallenachse deutlich günstiger ist, als bei Anströmung senkrecht zur Hallenachse. Ferner läßt sich erkennen, daß bei Windströmung parallel zur Hallenachse eine Raumströmung im nahezu gesamten Hallenquerschnitt auftritt. Für die Windrichtung senkrecht zur Hallenachse ist die Raumströmung mit im zeitlichen Mittel geringeren Geschwindigkeiten verbunden. Der Grund dafür dürfte sein, daß sich dort infolge der Schwankungen der Druckdifferenzen an den Zuluft- und Abluftöffnungen keine stationäre Strömung einstellen kann.

9. Schlußfolgerungen

9.1 Windlastannahmen

Die anzusetzenden Windlasten lassen sich entsprechend Kapitel 8.4.2. S. 50 und mit dem Bemessungsstaudruck aus Kapitel 8.5. S.63 berechnen. Für die Bemessungslast -ohne Sicherheitsbeiwert- bei Druck und Sog ergibt sich dann:

$$W_{\text{B,Druck}} = C_{\text{p max}} \cdot q_{\text{m23}} = C_{\text{p max}} \cdot 0,42 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$
$$W_{\text{B,Sog}} = C_{\text{pmin}} \cdot q_{\text{m23}} = C_{\text{pmin}} \cdot 0,42 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

9.1.1. Tragstruktur

a) Dachfläche

Für die Dimensionierung der Tragrohre ist mit den resultierenden Spitzenbeiwerten der extremen nur luvseitig geöffneten Lüftungsanordnung (才Bilder 24/25 S.55/56) zu rechnen. Eine vereinfachte Verteilung der Lasten zeigt Bild38. Die Tragrohre müssen so dimensioniert werden, daß sie die in Bild38 angegebenen Sog- und die Drucklasten ertragen können.

b) Fassadenflächen

Mit den Werten aus Kapitel 8.4.4. ergeben sich die Bemessungslasten folgendermaßen.

$$W_{\text{Bernessung Druck}} = C_{\text{pmax}} \cdot q_{\text{m23}} = 1,8 \cdot 0,42 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} = 0,76 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$
$$W_{\text{BernessungSog}} = C_{\text{pmin}} \cdot q_{\text{m23}} = 0,7 \cdot 0,42 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} = 0,29 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$



Bild 38: Bemessungslasten für Tragrohre

9.1.2. Panele und Panelhalterungen

a) Dachfläche

Da die extremsten auftretenden Lasten (Sogbelastungen entsprechend Bild 28 S.60) Isobarenverläufe parallel zur Fassadenfläche haben, wird vorge-schlagen, die Dachfläche in folgende Teilflächen zu unterteilen:

- Dachüberstand der Breite 3m
- Randstreifen der Breite 8m, welcher sich an den Dachüberstand anschließt und zu diesem parallel verläuft
- Restfläche

Entsprechend den Bildern 27 - 30 ergeben sich für die Teilflächen folgende Bemessungslasten:

Teilfläche	Druck		Sog	
	$C_{p \max}$	$W_{\scriptscriptstyle B,D}\!\left[rac{kN}{m^2} ight]$	$C_{p\min}$	$W_{B,S}\left[\frac{kN}{m^2} ight]$
Dachüberstand	1,50	0,63	-4,00	1,68
Randbereich	2,20	0,92	-2,50	1,05
Restfläche	2,20	0,92	-1,50	0,63

b) Fassadenflächen

Mit den Werten aus Kapitel ergeben sich die Bemessungslasten folgendermaßen.

$$W_{\text{BemessungDruck}} = C_{\text{pmax}} \cdot q_{\text{m23}} = 2,8 \cdot 0,42 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} = 1,18 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$
$$W_{\text{BemessungSog}} = C_{\text{pmin}} \cdot q_{\text{m23}} = -1,2 \cdot 0,42 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} = 0,5 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

9.2. Lüftungswirksamkeit

Für die Lüftungskonfiguration mit 3 Jalousiereihen ergibt sich selbst für die kritische Windrichtung senkrecht zur Hallenachse eine windbedingte Luftwechselrate von $L = 3 h^{-1}$. Da besonders auch an Tagen mit weniger als der betrachteten mittleren Windgeschwindigkeit von 3,5 m/s noch der Thermikeinfluß hinzu kommt, wird die Konfiguration mit 3 Jalousiereihen auch ohne zusätzliche Ventilatoren ausreichend sein.

9.3. Entrauchungswirksamkeit

Da das Halleninnere bei den Strömungsbeobachtungen in vertretbaren Zeiten und vollständig rauchfrei wurde, ist die Entrauchung sichergestellt.

10. Literaturverzeichnis

- [1] A.G.Davenport
 Wind Effects on Buildings and Structures
 London 1965
- [2] Ruscheweyh, H.Dynamische Windwirkung an Bauwerken, Teil2Wiesbaden, Berlin 1982
- [3] Böswirth/Plint Technische Strömungslehre Hannover 1975
- [4] J.Holmes and R.E.Lewis Optimization of dynamic-pressure measurement systems, CSIRO Victoria, Australia 1986
- [5] M.Knoch Entwicklung einer Methode zur amplitudenrichtigen Messung schnell schwankender Drücke mittels pneumatischer Meßstellenumschalter Studienarbeit RWTH Aachen, Fakultät für Maschinenwesen 1980
- [6] C.Kramer, H.J.Gerhardt, S.Scherer
 Wind pressure on block-type buildings
 Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 4 1979
- [7] Dr.K.J.Eaton Wind Effects on Buildings and Structures Heathrow 1975
- [8] Newberry/ EatonWind loading handbookLondon 1974
- [9] A.G.Davenport The application of statistical concepts to the wind loading of structures Proc. Inst. of Civil Engineers 1961, 19, 449-472
- [10] Gerhardt, Janser, Lampe Strömungstechnische Untersuchungen für das BV 'NML' Aachen 1993