

# Modelluntersuchung des Innenklimas in einer Fabrikhalle<sup>\*)</sup>

Von R. D. Crommelin und P. Maaskant, Delft, Holland\*\*)

Im Modell (1 : 20) einer Fabrikhalle wurden Luftgeschwindigkeiten, Temperaturen und Konzentrationen gemessen und mit Messungen in der Fabrikhalle selbst verglichen. Es wurde an etwa 200, im ganzen Raum der Halle und des Modells verteilten, Punkten gemessen. Die Luftströmungsmuster in Halle und Modell stimmten gut miteinander überein. Sie werden durch freie Konvektion bestimmt, die durch die Wärmeentwicklung der Maschinen in der Halle verursacht wird. Vergleicht man die Messungen in der Halle selbst und im Modell, dann sieht man, daß die Lufttemperaturen in der Halle mit annehmbarer Genauigkeit aus den Modellmessungen vorhergesagt werden können. Für die Konzentrationen ist diese Genauigkeit sehr viel geringer, für die Luftgeschwindigkeit sogar unmöglich.

In a 1 : 20 scale model of a work hall air velocities, temperatures and concentrations were measured and compared with measurements in the work hall itself. These measurements were made at about 200 points divided over the whole space of the hall and the model. The air flow patterns in the hall and in the model agree well with each other. They are controlled by free convection caused by heat developed by the machines in the hall. Comparing the measurements in the work hall itself and in the model, it is seen that the air temperatures in the hall can be predicted with reasonable accuracy from the measurements in the model. The concentrations cannot be predicted with the same degree of accuracy and prediction of air velocities from the measurements in the model is impossible.

On a mesuré les vitesses et températures d'air et les concentrations de gaz dans un modèle à l'échelle 1 : 20 d'une halle industrielle et on les a comparées avec les mesuréments dans la halle elle-même. Ces mesuréments étaient faits à environ 200 points, divisés sur toute l'espace de la halle et du modèle. Les patrons des courants d'air dans la halle et dans le modèle s'accordent bien l'un avec l'autre. Ils sont dominés par convection libre, qui est causée par la production de chaleur des machines dans la halle. Si on compare les mesuréments dans la halle elle-même et dans le modèle, on verra, que les températures de la halle peuvent être prédites des mesuréments du modèle avec une exactitude raisonnable. Cette exactitude est beaucoup plus moins pour les concentrations et c'est impossible de prédire les vitesses de l'air des mesuréments dans le modèle.

Schlagwörter: Innenraum; Klima; Verunreinigung / Modelle, Modelluntersuchungen

## 1 Einleitung

Die Ausbreitung von Wärme und Luftverunreinigungen in einer Fabrikhalle werden allgemein als lästig und zuweilen als gefährlich für die Arbeiter anerkannt. Deshalb hat man vieles versucht, um diese Ausbreitung zu verhindern oder zu vermindern. Das kann am besten an der Quelle geschehen, z. B. durch einen Schutzschirm oder durch Absaugung. Da dies aber nicht immer funktioniert, muß man dann die Ausbreitung in der Halle durch gute Lüftung und das bestmögliche Luftströmungsmuster (Strömungsprofil) in der Halle vermindern.

In geplanten aber noch nicht gebauten Fabrikhallen kann man das erwartete Innenklima und die erwarteten Luftverunreinigungskonzentrationen nur an Modellen studieren. In bestehenden Hallen können mögliche Verbesserungen durch Messungen in der Halle selbst untersucht werden. In

der Praxis sind die Schwierigkeiten und die benötigten Kosten eine Behinderung, so daß man am besten Modelle verwendet.

Es gibt zwei Arten von Modellen:

- mathematische Modelle,
- maßstabgetreue Modelle.

In mathematischen Modellen wird die Kompliziertheit eines Problems durch die Gleichungen, die die Phänomene beschreiben, und durch die Randbedingungen bestimmt. Im vorliegenden Fall sind die bestimmenden Gleichungen die Differentialgleichungen für den Transport von Impuls, Wärme und Masse (z. B. Luftverunreinigungen) in einer turbulenten Strömung. Es sind komplizierte, nichtlineare Gleichungen, die durch die Turbulenz noch viel komplizierter werden. In den letzten Jahren hat man aber für turbulente Strömungen mathematische Modelle entwickelt, die sicher auch für die Untersuchung von Fabrikhallen benutzt werden können. Die Randbedingungen, die die Geometrie von Wänden, Boden, Decke, Maschinen usw. beschreiben, sind aber so kompliziert, daß man sich fragt, ob mathematische Modelle für Fabriken überhaupt anwendbar sind.

Man glaubt, daß Innenklima und Ausbreitung von Verunreinigungen in Fabrikhallen in den meisten Fällen nur mit Hilfe maßstabgetreuer Modelle untersucht werden können. Um die Anwendung solcher Modelle zur Bestimmung der Bedingungen in wirklich vorhandenen Fabrikhallen untersuchen zu können, wurde das Modell einer bestehenden Halle angefertigt.

In diesem Bericht werden Messungen am Modell mit den vor einigen Jahren in der Halle selbst durchgeführten Messungen verglichen [1]. Die untersuchten Veränderlichen sind die Luftgeschwindigkeiten, Lufttemperaturen, dem Ölnebelschmiersystem der Maschinen zuzuschreibende Konzentrationen kleiner Öltröpfchen in der Luft. Es wurden Rauchtests sowie Wärme- und Massenstrombilanzen für die Luftströme in die Halle hinein und aus der Halle heraus durchgeführt. Es wurde an mehr als 200, über den ganzen Raum der Fabrikhalle verteilten Punkten gemessen. Die Luftgeschwindigkeiten, Temperaturen und Spürgaskonzentrationen wurden an korrespondierenden Punkten im Modell gemessen. So gibt es jetzt genug Material für Vergleich und Analyse.

\*) Eine Forschungsarbeit mit einer Subvention der Kommission der Europäischen Gemeinschaften. Veröffentlichung Nr. 708 D des Forschungsinstituts für Umwelthygiene TNO, Postfach 214, Delft, Niederlande.

\*\*) Anschrift der Verfasser: s. Autorenverzeichnis

# Modelluntersuchung des Innenklimas in einer Fabrikhalle

## 2 Messungen in der Fabrikhalle

Es wurde in der sogenannten S-Halle der elektrolytischen Verzinnerie von *Hoogovens IJmuiden B.V.* in den Niederlanden gemessen. Die Ergebnisse sind in [1] veröffentlicht, die Forschungsarbeit wurde im Detail in einem Bericht des *Forschungsinstituts für Umwelthygiene* beschrieben [2]. Die Ergebnisse, die für die Messungen im Modell wichtig sind, wurden im vorliegenden Bericht aufgenommen.

Bild 1 zeigt die geometrische Einteilung der Halle in 14 Querschnitte und drei Längsflächen. Zwei der letztgenannten Flächen laufen durch die Mittellinien der zwei Elektroverzinnungsmaschinen, die dritte läuft zwischen den Maschinen hindurch. Die durch die Maschinen entwickelte Wärme wird hauptsächlich im Gebiet des Querschnitts 9 abgegeben. Die Meßpunkte liegen auf den Schnittlinien der Querschnitte und der vertikalen Längsschnitte.

Die Geschwindigkeiten, Temperaturen und Konzentrationen wurden von einem Kran aus an sechs oder sieben Stellen in Entfernungen von 2,75 m übereinander gemessen.

Dieser Kran wurde auch für die Rauchuntersuchungen benutzt. Für diese wurde Rauch in Plastikrohre geblasen. Diese Rohre waren aus 2,75 m langen Segmenten aufgebaut, so daß die Gesamtlänge variiert werden konnte. Das war nötig, um über den Maschinen und über dem Kran unter hohen Teilen des Daches messen zu können. Der Rauch verließ die Rohre durch kleine Öffnungen, so daß die örtliche Richtung des Luftstromes sichtbar gemacht wurde.

Die Rohrsegmente waren mit Anemometern verbunden, mit denen die absoluten Geschwindigkeiten gemessen wurden; die Temperaturen wurden mit Thermoelementen, die Konzentrationen mit einem *Sinclair-Phoenix-Aerosolfotometer* gemessen. Es zeigte sich, daß die Rauchprüfungen, die Geschwindigkeits- und Temperaturmessungen nur in der Hälfte der 14 Querschnitte vorgenommen werden konnten. Dafür wurden die niedrigen Teile des Daches gewählt. Die Konzentrationen wurden in allen Querschnitten aber zu einer anderen Zeit gemessen.

Die Anemometer waren von unserem Institut entwickelt worden [3]. Die Massen- und Wärmeströme der durch Fenster und andere Öffnungen in den Wänden hinaus- und hereinkommenden Luft wurden durch die Messung der Geschwindigkeiten, der Temperaturen und Luftfeuchtigkeiten bestimmt.

## Formelzeichen

$Ar$	Archimedeszahl $\left( Ar = \frac{g l \Delta T}{\nu^2 T} \right)$
$C$	Konzentration ( $m^3/m^3$ Luft, ppm)
$c_p$	Spezifische Wärme bei konstantem Druck
$g$	Erdbeschleunigung ( $m/s^2$ )
$Gr$	Grashofzahl $\left( Gr = \frac{g l^3 \Delta T}{\nu^2 T} \right)$
$l$	charakteristische Länge (m)
$m$	Maßstab des Modells $\left( m = \frac{l_w}{l_m} \right)$
$Pe$	Pécletzahl $\left( Pe = \frac{\rho c_p V l}{\lambda} \right)$
$Q$	Wärmestrom (W)
$Q'$	Frei werdende Luftverunreinigungs- oder Spürgasmenge ( $m^3/s$ , l/s)
$Re$	Reynoldszahl $\left( Re = \frac{V l}{\nu} \right)$
$T$	Temperatur (K)
$\Delta T$	Temperaturunterschied (K)
$V$	Luftgeschwindigkeit (m/s)
$\nu$	Verhältnis der Luftgeschwindigkeit im Modell und in der Halle
$\epsilon$	Strahlungsemissionskoeffizient
$\nu$	kinematische Zähigkeit ( $m^2/s$ )
$\sigma$	Standardabweichung
$\phi$	Luftmassenstrom (kg/s)
-	Mittelwert einer Größe
'	stochastische Komponente einer Größe

## Indices

a	ausströmende Luft
e	einströmende Luft
Konv	Konvektion
l	Luft
Leit	Leitung
m	Modell
Max	Maximum
Mitt	Mittel
Str	Strahlung
tot	total
Übertr	Übertragung
Vent	Ventilation
w	Wirklichkeit

$$Re = \frac{V l}{\nu} = \frac{\text{Trägheitskraft}}{\text{Zähigkeitskraft}}$$

$$Ar = \frac{g l \Delta T}{\nu^2 T} = \frac{\text{Thermische Kraft}}{\text{Trägheitskraft}}$$

$$Pe = \frac{\rho c_p V l}{\lambda} = \frac{\text{Wärmeübertragung durch Konvektion}}{\text{Wärmeübertragung durch Leitung}}$$

## Ergebnisse

Aus den Ergebnissen der Rauchprüfungen ging hervor, daß in der Halle ein deutliches Luftströmungsmuster vorhanden war, das aus zwei sich gegenläufig drehenden Wirbeln bestand [1]. Diese Wirbel werden durch aufsteigende warme Luft über jenen Teilen der Maschinen verursacht, an denen starke Wärmeentwicklung stattfindet. Bild 2 vermittelt einen Eindruck dieses Strömungsprofils und der in der Halle gemessenen Geschwindigkeiten (weitere Daten siehe [2]).

Deutlich sieht man hieraus, daß die Wirbel durch aufsteigende, warme Luft angetrieben werden, weil in ihr die höchsten Geschwindigkeiten auftreten. In Bild 3 ist das Luftströmungsmuster mit der Temperaturverteilung global dargestellt. Die Höchsttemperaturen treten im aufsteigenden Luftstrom über den warmen Teilen der Maschinen auf. Dieser Luftstrom stößt gegen das Dach und kühlt langsam ab, während er unter dem Dach von der Mitte aus wegströmt. Die über den Boden zuströmende Luft nimmt ein wenig an Temperatur zu. Die niedrigsten Temperaturen findet man bei den Verbindungsöffnungen zu den angrenzenden Hallen (siehe Bild 1).

Bild 4 zeigt die Konzentrationsverteilung der Öltröpfchen und das Luftströmungsmuster. Die Konzentrationen zeigen dieselbe Tendenz wie die Temperaturen; aber die Abnahme der Konzentrationen unter dem Dach von der Mitte zu den Rändern ist nur gering, da – anders als bei der Wärme – keine Übertragung durch das Dach auftritt.

## 3 Bedingungen für maßstabgerechte Modellstudien

Wenn man die Luftströmungen, Temperaturen und Konzentrationen in einer Werkhalle an einem Modell untersuchen will, müssen einige Ähnlichkeitsbedingungen erfüllt werden, nämlich geometrische Ähnlichkeit, mechanische Ähnlichkeit, kinematische Ähnlichkeit, dynamische Ähnlichkeit, Konzentrationsähnlichkeit und thermische Ähnlichkeit.

Die Bedingung der geometrischen Ähnlichkeit bedeutet, daß die Wände, der Boden und das Dach des Modells dieselben Formen wie die Halle haben müssen [4]. Einzelheiten der Halle brauchen aber nicht imitiert zu werden, falls sie die Massen- und Wärmeströme in der Halle oder im Modell nicht beeinflussen.

Kinematische Ähnlichkeit bedeutet eine Verminderung der Luftgeschwindigkeit in allen Punkten der Halle um denselben Verkleinerungsfaktor, wenn man sie in den



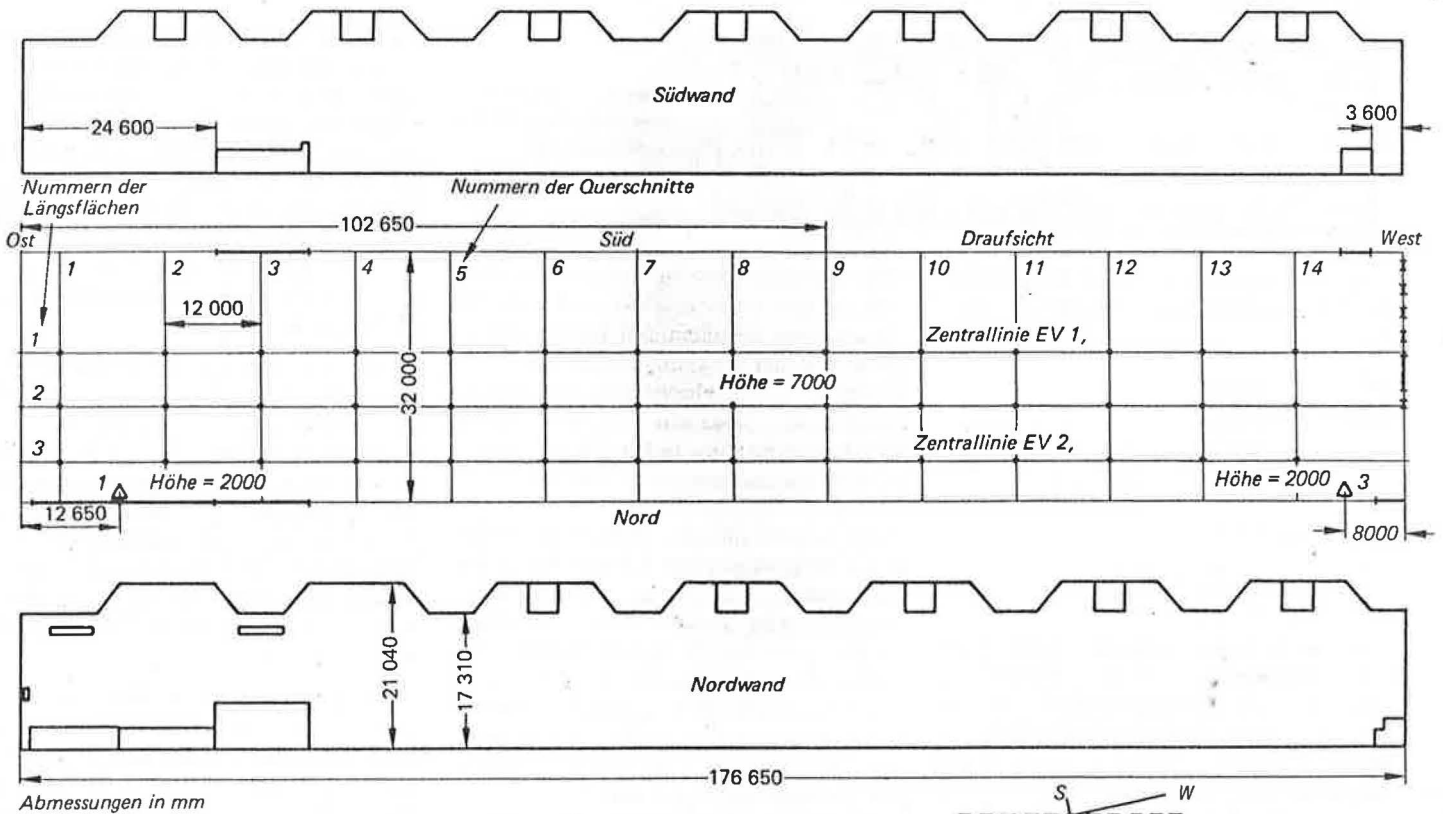


Bild 1: Grundriß und Seitenwände der S-Halle (aus [1])

ST817.1

gleichen Punkten im Original und Modell vergleicht. Bei dynamischer Ähnlichkeit gilt die vorige Regel zusätzlich auch bei den Kräften, die die Luftströmung verursachen, z. B. die Normal- und die Schubkräfte.

Konzentrationsähnlichkeit bedeutet, daß man die gleiche Regel auf die Luftverunreinigungskonzentrationen in der Halle und auf das Spürgas im Modell anwendet.

Thermische Ähnlichkeit bedeutet, daß die Wärmeströme in der Werkhalle mit demselben Faktor reduziert werden müssen, um korrespondierende Wärmeströme im Modell zu bekommen [5]. Die Bedingungen für mechanische und thermische Ähnlichkeit können gefunden werden, wenn man die Gleichungen zur Erhaltung des Impulses und der Energie dimensionslos macht. Dann erhält man die bekannten dimensionslosen Zahlen [4; 6].

Wird die Luftströmung durch Konvektion beherrscht, so wird sie durch die *Grashofzahl* gekennzeichnet, nämlich:

$$Gr = Ar \cdot Re^2 = \frac{g \rho \Delta T}{\nu^2 T}$$

Wären alle dimensionslosen Zahlen für Modell und Original gleich, so wären auch die dimensionslosen Gleichungen identisch, und das Modell würde den reellen Fall vollkommen simulieren. Mehrere Verfasser [4; 6] haben aber gezeigt, daß dies unmöglich ist.

In eingeschlossenen Volumina sind die Trägheitskräfte bei  $Re > 10^4$  um so viel stärker wie die Zähigkeitskräfte, so daß die kinematische Ähnlichkeit nicht länger von  $Re$ , sondern nur noch von der geometrischen Ähnlichkeit abhängt. Dies gilt für erzwungene Konvektion. Wird die Strömung

durch freie Konvektion beherrscht, so wird dann kinematische Ähnlichkeit vorliegen, wenn die thermischen Kräfte viel stärker sind als die Zähigkeitskräfte. Das ist der Fall, wenn die *Grashofzahl* einen kritischen Wert, nämlich den Quadratwert der kritischen *Reynoldszahl*, überschreitet; das ist der Fall, wenn  $Gr > 10^8$  ist. Es wird keine dynamische Ähnlichkeit geben; aber das bedeutet nicht notwendigerweise auch, daß Modellprüfungen keine brauchbare Auskunft über Luftgeschwindigkeiten, Temperaturen und Konzentrationen geben.

Für die thermische Ähnlichkeit sind die folgenden Wärmeströme wichtig: Wärmeströme durch Ventilation, Wärmeströme durch Konvektion von Wärmequellen a) erzwungene Konvektion, b) freie Konvektion; Wärmeströme durch Strahlung und Wärmeströme durch Leitung.

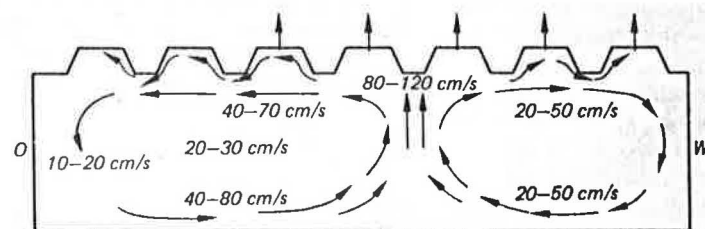


Bild 2: Luftströmungsprofil in der Halle (aus [1])

ST817.2

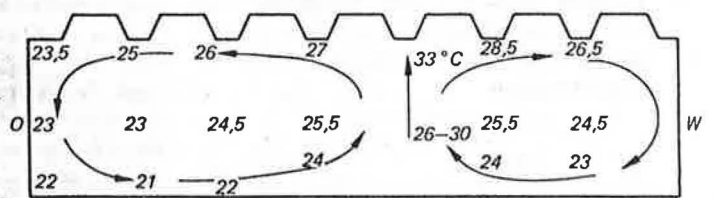
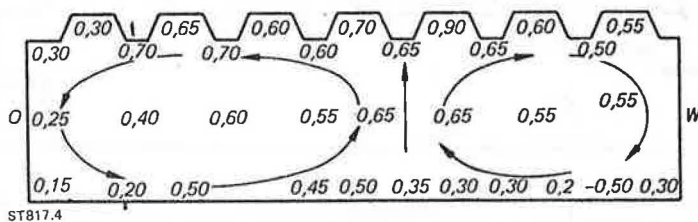


Bild 3: Temperaturverteilung in der Halle (aus [1])

ST817.3

## Modelluntersuchung des Innenklimas in einer Fabrikhalle



**Bild 4: Konzentrationsverteilung in der Halle (aus [1])**  
(Massenkonzentration in g Öl/m<sup>3</sup> Luft gemessen mit Sinclair-Phoenix-Gerät)

Die thermische Ähnlichkeit kann durch die folgende Gleichung ausgedrückt werden:

$$\left(\frac{Q_m}{Q_w}\right)_{\text{Vent}} = \left(\frac{Q_m}{Q_w}\right)_{\text{Konv}} = \left(\frac{Q_m}{Q_w}\right)_{\text{Str}} = \left(\frac{Q_m}{Q_w}\right)_{\text{Leit}} \quad (1)$$

Für Ventilation findet man:

$$\left(\frac{Q_m}{Q_w}\right)_{\text{Vent}} = \frac{v}{m^2} \frac{(T_{1,a} - T_{1,e})_m}{(T_{1,a} - T_{1,e})_w} \quad (2)$$

Die warmen Maschinen geben ihre Wärme hauptsächlich durch freie Konvektion an die Luft ab. Allerdings spielt die erzwungene Konvektion in der Halle eine Rolle, da durch Absaugung großer Luftmengen aus angrenzenden Hallen eine Luftströmung entsteht. Für freie Konvektion (turbulente Strömung) findet man

$$\left(\frac{Q_m}{Q_w}\right)_{\text{Konv}} = m^{-2} \left(\frac{\Delta T_m}{\Delta T_w}\right)^{4/3} \quad (3)$$

Für erzwungene Konvektion (turbulente Strömung) wird:

$$\left(\frac{Q_m}{Q_w}\right)_{\text{Konv}} = m^{-1,8} v^{0,8} \frac{\Delta T_m}{\Delta T_w} \quad (4)$$

gefunden.

Unter dem Dach kühlt die Luft ab, während sie aus dem Zentrum zu den Außenenden der Halle strömt. Dies ist ein Prozess erzwungener Konvektion.

Substituiert man Gleichung (4) in Gleichung (3), so bekommt man eine Beziehung zwischen  $v$ ,  $m$  und  $(Q_m/Q_w)_{\text{Konv}}$ :

$$v = m^{0,370} \left(\frac{Q_m}{Q_w}\right)_{\text{Konv}}^{0,310} \quad (5)$$

Gilt diese Beziehung, dann ist das Verhältnis der Wärmeübertragung von den Maschinen bei freier und bei erzwungener Konvektion für Modell und Fabrikhalle dasselbe. Die wirkliche Beziehung muß durch Geschwindigkeitsmessungen an vielen Punkten im Modell und in der Halle erforscht werden.

Für Strahlung wird gefunden:

$$\left(\frac{Q_m}{Q_w}\right)_{\text{Str}} = \frac{\epsilon_m}{\epsilon_w} \frac{\Delta T_m}{\Delta T_w} \quad (6)$$

Bei dieser Gleichung wird angenommen, daß die Temperaturunterschiede im Ver-

gleich zur absoluten Temperatur (K) klein sind. Ist das nicht so, dann muß man die Unterschiede zwischen den vierten Potenzen der absoluten Temperaturen in der Halle und im Modell verwenden. Die einzige signifikante Wärmeübertragung durch Strahlung erfolgt in diesem Falle von den warmen Maschinenteilen in Richtung Dach und zu den Seitenwänden.

Die in der Halle entwickelte Wärme wird durch Ventilation und Leitung durch das Dach und die Seitenwände abgeführt. Wärmeübertragung durch Leitung wird durch die Dicke der Wände und die Wärmeleitfähigkeit des benutzten Materials bestimmt. Das braucht aber nicht in allen Einzelheiten betrachtet zu werden, da die einzigen wichtigen Wärmeübertragungsprozesse diejenigen innerhalb der Halle sind.

Die beste Vorhersage der Temperatur in einem Punkt in der Halle bekommt man, wenn man die folgende Gleichung verwendet:

$$(T_1 - T_{1,e})_w = \frac{v}{m^2} \frac{Q_w}{Q_m} (T_1 - T_{1,e})_m \quad (2a)$$

Die Temperaturterme auf der rechten Seite dieser Gleichung sind die Lufttemperatur im entsprechenden Punkt im Modell ( $T_{1,m}$ ) und der Mittelwert der Temperaturen der eintretenden Luftströme ( $T_{1,e,m}$ ). Gleichung (2a) ist eigentlich die Ventilationsgleichung (2), in der  $T_{1,a}$  in einem willkürlichen Punkt durch  $T_1$  ersetzt worden ist.

Die Referenztemperatur in dieser Gleichung ist  $T_{1,e}$ , die Temperatur einer festen Grenze, wie der Maschinen oder des Daches, wird nicht als Referenztemperatur verwendet. Falls man die Mitteltemperatur der warmen Maschinenoberflächen als Referenztemperatur verwendet, muß die Geometrie der warmen Maschinenteile und der Wärmeübertragungsprozeß in allen Einzelheiten im Modell nachgeahmt werden.

Da dies praktisch unmöglich ist, könnten sich Fehler in die vorhergesagten Lufttemperaturen einschleichen, was durch Verwendung von Gleichung (2a) vermieden wird. Wir haben solche Fehler tatsächlich dann bemerkt, wenn wir die Temperatur der warmen Teile der Maschinen oder der Innenseite des Daches als Referenztemperatur verwendeten. Deshalb ist im Modell nur die entwickelte Wärmemenge wichtig. Wir sind aber dennoch bis zu einem gewis-

sen Grade frei, die Oberflächentemperatur der nachgeahmten Maschinen und auch die Abmessung ihrer Fläche zu wählen. In Gleichung (2a) ist  $Q$  die in der Halle und im Modell von den wirklichen und den Modell-Maschinen entwickelte Wärme. Deshalb kann diese Gleichung nur verwendet werden, wenn der Prozentsatz des Wärmeverlustes durch Ventilation in bezug auf den totalen Wärmeverlust in der Halle und im Modell derselbe ist.

Für die Vorhersage von Temperaturen in der Halle kann nur ein berechneter Wert des Geschwindigkeitsverhältnisses  $v$  verwendet werden. Dieser Wert wird mit Hilfe der Gleichung (5) aus der entwickelten Wärme berechnet. Die mechanisch aus der Halle abgesaugte Luft und die Luft, die die Halle durch die Fenster verläßt, muß im Modell durch mechanische Absaugung der Luft an entsprechenden Stellen nachgeahmt werden.

Im Prinzip entsprechen alle Wärmetransportprozesse – außer denen durch Strahlung – Massentransportprozessen von Luftverunreinigungen. In dieser Halle steigen kleine Öltröpfchen des Ölschmiersystems der Maschinen als kleine Fahnen empor. Die Fallgeschwindigkeit dieser kleinen Tröpfchen ist zu vernachlässigen, weil die Luftgeschwindigkeit viel größer ist. Das bedeutet, daß der Massentransport der Öltröpfchen nur durch die Luftströmung, also durch Ventilation, beherrscht wird.

Keiner der anderen Wärmetransportprozesse kann durch Massentransportprozesse in der Halle dargestellt werden. Deshalb gelten die Gleichungen (2) und (2a) auch für die Ölkonzentrationen und deren Transport durch Ventilation, falls man die Temperaturen durch die Konzentrationen und die Wärmeströme durch die, in die Halle, respektive in das Modell eintretenden, Öltröpfchen und Spürgasmengen ersetzt. Die durch die Fenster in die Halle tretende Luft wird durch eine mechanische Zufuhr gekühlter Luft simuliert. Die Luftströmung zwischen der Halle und den angrenzenden Hallen braucht aber nicht simuliert zu werden, da die Temperatur in allen diesen Hallen auf Bodenhöhe nahezu gleich ist. Dem Modell zugeführte oder aus dem Modell abgesaugte Luftmengen werden aus den in [1] gegebenen Massenströmen mit

$$\phi_m = \frac{v}{m^2} \phi_w \quad (7)$$

berechnet.

Wie hiervoor schon gesagt, ist es unmöglich, die Halle so zu modellieren, daß die relevanten dimensionslosen Zahlen und die



thermische Ähnlichkeit für alle Wärmeströme gleich sind.

Hieraus sieht man aber, daß außer der geometrischen Ähnlichkeit nur noch zwei andere Bedingungen erfüllt werden müssen:

1.  $Gr > 10^8$  für kinematische Ähnlichkeit und
2.  $(Q_m/Q_w)_{tot} = (Q_m/Q_w)_{vent}$

Wir beschränken uns auf diese Bedingungen und wählen weiterhin eine Oberflächentemperatur für die Modell-Maschinen, die niedrig genug ist, um eine große Wärmeübertragung zum Dach und zu den Seitenwänden durch Strahlung zu verhindern. Durch Experimente im Modell kann man untersuchen, ob es überhaupt möglich ist, zuverlässige Modellexperimente durchzuführen, die nur auf diesen Bedingungen basieren.

## 4 Das maßstabgetreue Modell

### 4.1 Bau des Modells

Das Modell der S-Halle wurde im Maßstab 1:20 gebaut. Der Boden, das Dach und die Wände bestanden aus 0,05 m dicken Brettern. Eine kurze Wand und eine Seitenwand waren zu Vorführzwecken und auch um Rauchprüfungen beobachten zu können, aus Perspex. Während der Messungen wurde das Perspex zur Verminderung der Wärmeverluste mit 0,05 m dickem Polystyrol isoliert. Solche Wärmeverluste gibt es in der wirklichen Halle nicht, weil die Lufttemperaturen in den angrenzenden Hallen ungefähr gleich sind. Die Maschinen in der Halle wurden durch Blöcke mit annähernd derselben Form nachgeahmt. Die warmen Teile jeder Maschine wurden durch vier vertikale Plastikplatten der Länge nach modelliert. Diese Platten waren mit untereinander verbundenen Kupferstreifen bedeckt. Mit elektrischem Strom, der durch diese Streifen geleitet wurde, wurde die durch die Maschinen entwickelte Wärme simuliert.

Die Luftverunreinigung durch Öltröpfchen in der Halle wurde im Modell mit einem Spürgas simuliert. Hierfür verwendete man Helium. Das Helium wurde durch einen Schlauch mit Löchern dicht an den Maschinen in den Modellraum geblasen. So kam das Spürgas auf dieselbe Weise in das Modell wie die Öltröpfchen aus den Maschinen in die Fabrikhalle.

Die meisten ins Modell hineinkommenden oder das Modell verlassenden Luftströme wurden mechanisch, das heißt durch Ventilatoren und Kanäle, erzeugt. Auf etwa 12°C gekühlte Luft simulierte die Außenluft, die durch die Fenster in den Südwänden während der Messungen in die Halle

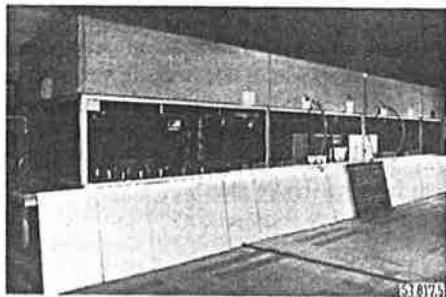


Bild 5: Außenseite des Modells

eindrang. Öffnungen im Boden des Modells, die die Verbindungen der Halle mit den angrenzenden Hallen darstellten, ermöglichten den freien Lufteintritt ins Modell. Drei Fenster im Modell wurden für die Zufuhr gekühlter Luft und zwei andere für die Luftabfuhr verwendet. Hiermit wurde die die Halle durch die Fenster in der Nordwand während der Messungen verlassende Luft simuliert. Die anderen Fenster im Modell blieben zum freien Luftein- und Austritt offen. Die Bilder 5 und 6 zeigen das Modell und die Halle. In beiden wird die Luft an fünf Stellen im Dach und an den Maschinen (Querschnitte 6, 8, 10, 12, 14) abgesaugt (siehe Bild 1).

### 4.2 Meßinstrumente

Die Luftgeschwindigkeiten wurden mit Anemometern gemessen, die vom Institut entwickelt worden waren. Im Modell wurden dieselben Typen verwendet wie in der Halle. Das Signal ist praktisch unabhängig von der Strömungsrichtung und gibt nur den absoluten Wert der Geschwindigkeit an.

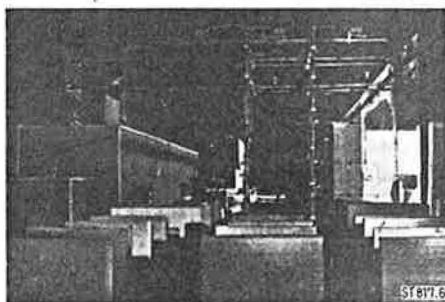


Bild 6: Innenseite a) des Modells b) der S-Halle

Das Anemometer arbeitet im Prinzip wie ein Thermoelement, deren einer Fühler durch einen konstanten elektrischen Strom erhitzt wird. Beide Fühler befinden sich in einer Metallkugel mit einem Durchmesser von 5 mm. Der Temperaturunterschied zwischen der warmen und der kalten Kugel hängt nur von der örtlichen Luftgeschwindigkeit ab und ist unabhängig von der Lufttemperatur. Eine komplette Beschreibung des Geräts kann man in [3] finden.

Die Temperaturen wurden mit Thermoelementen gemessen. Die Spürgaskonzentrationen wurden mit Katharometern gemessen. Solch ein Gerät enthält eine Wheatstone-Brücke, deren zwei Widerstände Kontakt mit der Luft-Spürgasmischung haben. Bei reiner Luft wird die Brücke stromlos eingestellt. Das Spürgas beeinflusst die Wärmeabgabe beider der Mischung ausgesetzter Widerstände, wodurch sich der Wert dieser Widerstände ändert. Durch die Brücke wird dann ein Strom fließen, der direkt proportional der Spürgaskonzentration ist, falls diese niedrig ist. Die Änderung des Brückenstroms ist auch von der Art des Spürgases abhängig, so daß das Gerät für jedes Spürgas geeicht werden muß.

Die Anemometer und Thermoelemente waren an einem Gestell montiert, die Thermoelemente konnten über die Länge des Modells verstellt werden. Das Gestell ließ sich mit dem Kran in der Halle vergleichen, die Aufstellung der Geräte entsprach ebenfalls ungefähr der Krananstellung [2]. Die Geräte waren mit zwei Rohren fester, statt mit drei Rohren veränderlicher Länge verbunden, die zwischen den Modell-Maschinen bewegt werden konnten. Die Katharometer waren außerhalb des Modells aufgestellt. Während der Konzentrationsmessungen waren dünne Schläuche an das Meßstativ befestigt, durch die das Gas zu den Katharometern gesaugt wurde. Die Enden dieser Schläuche befanden sich bei den Anemometern, so daß die Luftgeschwindigkeit, die Temperatur und die Konzentration immer an derselben Stelle gemessen wurde.

Es wurde an Stellen, die mit den Meßpunkten in der Halle übereinstimmten, gemessen und darum gilt Bild 1 auch dem Modell, wenn man nur die Abmessungen mit dem Faktor 20 verkleinert. Mit dieser Montieranordnung würden die Instrumente beim Messen in den Längsflächen, die durch die Modell-Maschinen (1 und 3) hindurchgehen, bei niedrigen Höhen gegen die Blöcke, die im Modell diese Maschinen darstellen, stoßen. Durch eine flexible Verbindung mit dem Rohr können die Instrumente so auf die Seite gedreht werden, daß das

## Modelluntersuchung des Innenklimas in einer Fabrikhalle

Gestell über die Blöcke bewegt werden kann. Die gleiche flexible Konstruktion wurde für die nur unter den hohen Teilen des Daches (gerade numerierte Querschnitte) messenden Instrumente verwendet. Auch die Temperaturen der in das Modell eintretenden oder aus dem Modell austretenden Luft und der Oberflächen der elektrisch geheizten Platten der Modell-Maschinen und der Innenoberfläche des Daches wurden gemessen.

Alle Signale der Meßgeräte wurden einem Datensammlungssystem zugeführt, das sie in Geschwindigkeits-, Temperatur- und Konzentrationswerte übersetzte. Diese Werte wurden nach Beendigung einer Meßreihe ausgedruckt.

Mit diesem Datensammlungssystem braucht man für eine Meßreihe in allen 14 Querschnitten nur eine Stunde.

### 4.3 Daten von Original und Modell

Es folgen einige Daten, die für die Analyse der Messungen wichtig sind:

Volumen der S-Halle:	100 000 m <sup>3</sup>
Volumen des Modells:	13,5 m <sup>3</sup>
Maßstab des Modells (m):	1:20
Wärmeerzeugung in der S-Halle ( $Q_w$ ):	1,98 · 10 <sup>6</sup> W
Wärmeerzeugung im Modell ( $Q_m$ ):	9,5 · 10 <sup>2</sup> W
Freiwerdende Önebelmenge in der S-Halle ( $Q'_w$ ):	etwa 20 bis 90 l pro Woche (nicht genau bekannt)

dem Modell zugeführte Heliummenge ( $Q'_m$ ): 0,165 l/s

#### Luftzufuhr:

Fenster in der Südwand:	0,0451 kg/s
Wandöffnungen beim Boden (natürliche Lüftung):	0,0540 kg/s

#### Luftabfuhr:

Dach (fünf Stellen):	0,0356 kg/s
Maschinen (simuliert):	0,0189 kg/s
Öffnungen in der Südwand:	0,0158 kg/s
Fenster in der Nordwand:	0,0186 kg/s
Fenster in der Südwand:	0,0059 kg/s
natürliche Lüftung durch die Fenster in der Nord- und Südwand:	0,0043 kg/s

Die totale Luftzu- und -abfuhr beträgt also 0,0991 kg/s; das heißt eine Luftwechselzahl von 22 h<sup>-1</sup>.

## 5 Ergebnisse

### 5.1 Strömungsprofil

Auch im Modell nimmt man bei den warmen Teilen der simulierten Maschinen,

nämlich beim Querschnitt 9, einen nach oben gerichteten, konvektiven Luftstrom wahr. Ebenso wie in der S-Halle verursacht diese Konvektionsströmung zwei in entgegengesetzter Richtung drehende Wirbel. Das Strömungsprofil im Modell ist also dem in der S-Halle gleich.

### 5.2 Luftgeschwindigkeiten

Nach einigen orientierenden Messungen wurden im Modell drei Versuche durchgeführt, bei denen Luftgeschwindigkeiten und Lufttemperaturen gemessen wurden. Der einzige Unterschied zwischen diesen drei Versuchen bestand in einer besseren oder geringeren Wärmeisolation des Modells und damit in einem kleineren oder größeren Wärmeverlust durch Ableitung. Diese Unterschiede hatten aber auf die Luftgeschwindigkeiten nicht den geringsten Einfluß. Es wurde in allen 14 Querschnitten gemessen. Weil in der S-Halle aber an einem Tag in nur sieben Querschnitten gemessen werden konnte, konnten die Meßwerte im Modell und in Wirklichkeit auch nur in sieben Querschnitten verglichen werden. Die Geschwindigkeits- und Temperaturmessungen in der S-Halle, die mit den Modellmessungen verglichen wurden, wurden in den sieben Querschnitten unter den niedrigen Dachteilen vorgenommen (siehe Abschnitt 2).

Beim Vergleich der Luftgeschwindigkeiten in Modell und Original sind wir von der Formel

$$V_w = \frac{V_m}{V} + V^1 \quad (8)$$

ausgegangen.

Bei einer perfekten Vorhersage der Geschwindigkeit in der Original-Halle aus der im Modell wird  $V^1$  in jedem Punkt den Wert 0 haben. In Wirklichkeit ist die Vorhersage aber nicht perfekt, und so hat diese stochastische Komponente  $V^1$  in jedem Punkt einen bestimmten Wert. Mit Gleichung (8) kann  $V^1$  in jedem Punkt berechnet werden, so daß man bei jedem Versuch eine Menge von  $V^1$ -Werten erhält. Eine Analyse dieser Mengen gibt einen Hinweis über die Zuverlässigkeit der Vorhersage der Luftgeschwindigkeiten in der Original-Halle aus den Modellmessungen. Tabelle 1 gibt eine Übersicht über Mittelwerte und Standardabweichungen der  $V^1$ -Wertemenge in jedem Längsschnitt (siehe Bild 1) bei den drei Versuchen. Um mit Gleichung (8)  $V^1$  berechnen zu können, muß man  $v$  kennen. Diesen Wert berechnet man aus den Daten von Abschnitt 4.3 mit Gleichung (5):  $v = 0,28$ .

Aus der dritten und sechsten Spalte ersieht man, daß in der Vorhersage der Geschwindigkeiten bei den Längsschnitten 2 und 3 ein systematischer Fehler von 0,036 bis 0,086 m/s oder etwa 10 bis 25% in bezug auf  $V_w$ , gemacht wird. Die Standardabweichung der Vorhersage beträgt in diesen Querschnitten 0,180 bis 0,232 m/s oder 50 bis 65%. Für diese Grenzen ist die Überschreitungswahrscheinlichkeit 31,8%.

Der Schluß, den man aus diesen Ziffern ziehen muß, ist, daß die örtlichen Luftgeschwindigkeiten nicht zuverlässig aus den Modellmessungen vorhergesagt werden können. Äußerstenfalls können gewisse Tendenzen in der Geschwindigkeitsverteilung mit Modellmessungen signalisiert werden.

Im Längsschnitt 1 sind die systematischen Fehler und die Standardabweichungen noch größer. Das ist deshalb der Fall, weil die Geschwindigkeit wegen der während der Messungen vielfältig auftretenden Störungen an den Anemometern nur an wenigen Stellen im Längsschnitt 1 der S-Halle gemessen werden konnte [2]. Es standen daher nur 15 Meßwerte für Vergleiche mit den Modellmessungen zur Verfügung; bei den Längsschnitten 2 und 3 waren das 41 bzw. 36 Werte. Unter den 15 Meßwerten im Längsschnitt 1 waren aber auch die hohen Luftgeschwindigkeiten im aufsteigenden Luftstrom über dem warmen Teil einer der Maschinen in Querschnitt 9. Deshalb findet man für Längsschnitt 1 im Mittel zu hohe Geschwindigkeiten, wie Spalte 5 der Tabelle 1 zeigt. Da die Meßwerte vom Längsschnitt 1 ein falsches Bild der gesamten Geschwindigkeitsverteilung in diesem Schnitt geben, müssen sie bei der weiteren Analyse außer Betracht gelassen werden.

In einem folgenden Abschnitt werden wir die Analysen der Geschwindigkeitsmessungen mit denen der Temperatur- und Konzentrationsmessungen vergleichen.

### 5.3 Lufttemperaturen

Durch eine immer bessere Isolierung des Modells in der Versuchsreihe waren die Temperaturen der Abluft ein wenig höher. Aber auch die Zulufttemperatur war nicht immer gleich.

Tabelle 2 enthält die Temperaturen der ins Modell ein- oder ausströmenden Luft.

Die Temperaturwerte sind gewogene Mittel in bezug auf die Massenströme. Der Wärmeverlust im Modell durch Lüftung wurde mit Gleichung

$$Q_{vent} = Q \cdot c_p \cdot (T_{i,a} - T_{i,e}) \quad (9)$$

berechnet, wobei  $Q = 0,0991$  kg/s und  $c_p = 1000$  J/kg °C für Luft sind.



**Tabelle 1: Mittelwerte und Standardabweichungen von  $V'$**

Versuch Nr.	Längsschnitt	$\bar{V}'_i$ m/s	$\sigma_{V'_i}$ m/s	$\bar{V}'_w$ m/s	$\frac{\bar{V}'}{\bar{V}'_w}$	$\frac{\sigma_{V'}}{\bar{V}'_w}$
1	1	0,189	0,381	0,541	0,350	0,704
1	2	0,059	0,218	0,350	0,169	0,623
1	3	-0,060	0,180	0,348	-0,172	0,518
2	1	0,203	0,374	0,541	0,376	0,691
2	2	0,060	0,221	0,350	0,171	0,631
2	3	-0,054	0,186	0,348	-0,155	0,535
3	1	0,106	0,470	0,541	0,196	0,869
3	2	0,036	0,232	0,350	0,103	0,663
3	3	-0,086	0,193	0,348	-0,248	0,555

**Tabelle 2: Temperaturen der ins Modell und in die S-Halle ein- oder ausströmenden Luft (in °C)**

	Versuch Nr.			S-Halle
	1	2	3	
zugeführte Luft:				
Fenster der Südwand	12,5	12,4	11,2	8,3
Öffnungen nahe am Boden (natürliche Lüftung)	18,6	19,1	19,5	22,7
abgesaugte Luft:				
Dach (5 Stellen)	21,8	22,6	23,6	26,8
Maschinen	21,2	21,8	21,7	23,3
Öffnungen nahe am Boden in der Südwand	18,4	18,8	19,2	19,3
Fenster der Nordwand	23,1	24,0	24,4	21,8
Fenster der Südwand	21,7	22,7	21,2	19,3
Fenster der Nord- und Südwand (natürliche Lüftung)	23,4	23,4	24,0	
Mittelmenge der zugeführten Luft ( $T_{1,e}$ )	15,8	16,0	15,7	16,0
Mittelmenge der abgesaugten Luft ( $T_{1,a}$ )	21,6	22,3	22,5	23,5

Der Wärmeverlust durch Lüftung in der S-Halle ergibt sich aus der Subtraktion des Wärmeverlustes durch Ableitung durch das Dach von der totalen Wärmeproduktion. Dann ist

$$Q_{Vent} = Q_{tot} - Q_{Leit} \quad (10)$$

**Tabelle 3: Verhältnisse von Wärmeverlust durch Lüftung zu totalem Wärmeverlust**

Versuch	$\frac{Q_{Vent}}{Q_{tot}}$
1 (Modell)	0,60
2 (Modell)	0,65
3 (Modell)	0,71
S-Halle	0,73

**Tabelle 4: Mittelwerte und Standardabweichungen von  $T'$**

Versuch Nr.	Längsschnitt	$\bar{T}'_i$ K	$\sigma_{T'_i}$ K	$(T_1 - T_{1,e})_w$ K	$\frac{\bar{T}'}{(T_1 - T_{1,e})_w}$	$\frac{\sigma_{T'}}{(T_1 - T_{1,e})_w}$
1	1	2,0	1,7	9,1	0,220	0,187
1	2	1,7	1,4	8,5	0,200	0,165
1	3	1,4	1,9	9,1	0,154	0,209
2	1	1,7	1,6	9,1	0,187	0,176
2	2	1,2	1,6	8,5	0,141	0,188
2	3	0,9	1,9	9,1	0,099	0,209
3	1	0,6	2,2	9,1	0,066	0,242
3	2	0,5	2,0	8,5	0,059	0,235
3	3	-0,2	2,8	9,1	-0,022	0,308

wie die Geschwindigkeitsmessungen analysieren zu können, wird mit Hilfe der Gleichung (2a) die folgende Formel eingeführt:

$$(T_1 - T_{1,e})_w = \frac{v}{m^2} \frac{Q_w}{Q_m} (T_1 - T_{1,e})_m + T' \quad (11)$$

Analog zur statistischen Analyse der  $V'$ -Werte gibt die Analyse der  $T'$ -Wertemenge einen Hinweis auf die Zuverlässigkeit der Lufttemperaturvorhersage in der Halle aus den Modellmessungen. In Tabelle 4 wird eine Übersicht über die Ergebnisse dieser Analyse gegeben.

Aus den Ergebnissen der letzten Spalte läßt sich zeigen, daß die Standardabweichung in der  $T'$ -Wertemenge etwa 17 bis 30% der durchschnittlichen Temperaturzunahme beträgt. Demnach ist diese Vorhersage beträchtlich besser als die der Luftgeschwindigkeiten.

Die Ergebnisse der dritten und sechsten Spalte zeigen aber die Wirkung einer zu geringen Wärmeisolation des Modells und eine dadurch zu kleine Wärmeabfuhr durch Lüftung (siehe Tabelle 3). Hierdurch werden im Versuch Nr. 1 systematisch etwa 20% zu niedrige Werte für  $T_1 - T_{1,e}$  in der Halle vorhergesagt. Im Versuch Nr. 2 liegt dieser Wert bei etwa 15% und im Versuch Nr. 3 nur noch bei etwa 6%.

Man kann also erwarten, daß die systematischen Fehler bei der Vorhersage von  $T_1 - T_{1,e}$  in der Halle dann eliminiert werden können, wenn man Gleichung (11) zum Prozentsatz der Wärmeabfuhr durch Lüftung in der Halle (73%) korrigiert. Der erste Term im rechten Glied von Gleichung (11) muß dann für jeden Modellversuch mit einem Korrekturfaktor multipliziert werden. Dieser Faktor kann aus den in Tabelle 3 gegebenen Prozentsätzen berechnet werden. Man findet dann die Korrekturfaktoren:

Versuch Nr. 1:  $73/60 = 1,217$

Versuch Nr. 2:  $73/65 = 1,123$

Versuch Nr. 3:  $73/71 = 1,028$

Mit einer auf diese Weise korrigierten Gleichung (11) würde die  $T'$ -Wertemenge, die man dann bekommt, statistisch analysiert. Das Ergebnis dieser Analyse wird in Tabelle 5 dargestellt.

Nach der Korrektur von Gleichung (11) werden für die Halle Temperaturzunahmen mit systematischen Fehlern vorhergesagt, die in der Regel nicht höher als 5% sind. Nur in einem Fall, in Versuch Nr. 2 im Längsschnitt 1, ist der Fehler 8,8%.

Die Standardabweichungen sind allerdings etwas höher als ohne Korrektur, nämlich 20 bis 33%. Diese Änderung fällt kaum ins Gewicht. Hieraus kann man folgern, daß die Temperaturen in der Halle ziemlich gut, nämlich mit einer Standardabweichung

## Modelluntersuchung des Innenklimas in einer Fabrikhalle

von etwa 2 bis 2,5 K, aus den Modellmessungen vorhergesagt werden können, falls Gleichung (11), wenn nötig, für die richtige Wärmeabfuhr durch Lüftung korrigiert wird.

### 5.4 Konzentrationen

In einem Sonderversuch wurden die Spürgaskonzentrationen im Modell und die Öltröpfchenkonzentrationen in der Halle gemessen. Es konnte in allen 14 Querschnitten gemessen werden. Die Zahl der Punkte, in denen daher die Konzentrationen miteinander verglichen werden können, beträgt für die Längsschnitte 1, 2, 3, 81, 91 und 77. Das sind viel mehr Vergleichspunkte als bei den Luftgeschwindigkeiten und Temperaturen.

Für die Konzentrationen wurde dieselbe statistische Analyse durchgeführt wie für die Luftgeschwindigkeiten und Temperaturen. Dazu wurde die folgende Formel benutzt:

$$C_w = (\overline{C_w}/C_m) C_m + C' \quad (12)$$

Die mittlere Konzentration im Modell betrug 2267 ppm Helium. Das ist etwa 13% mehr als die Gleichgewichtskonzentration von 2000 ppm; die aus den Daten von Abschnitt 4.3 berechnet werden konnte. Die Gleichgewichtskonzentration in der S-Halle konnte nicht berechnet werden, weil die freiwerdende Schmierölmengung nur sehr global bekannt ist. Das Mittel der gemessenen Konzentrationen betrug 0,48 mg Öl/m<sup>3</sup> Luft.

Solange die mittlere Konzentration nicht bekannt ist, läßt sich aber mit Gleichung (12) nur eine Konzentrationsverteilung in bezug auf die Mittelkonzentration ( $C_w/\overline{C_w}$ ) vorhersagen.

Tabelle 6 zeigt die Ergebnisse der statistischen Analyse der  $C'$ -Wertemenge.

Hieraus können wir folgern, daß mit Gleichung (12) aus Modellmessungen die Konzentrationen in der Halle mit einer Standardabweichung von etwa 0,2 mg/m<sup>3</sup> oder 40 bis 45% der mittleren Konzentration, vorhergesagt werden können.

### 5.5 Vergleich der Vorhersagen für die Luftgeschwindigkeiten, Temperaturen und Konzentrationen

In den vorhergehenden Abschnitten wurde mit den statistischen Analysen der Meßergebnisse ein Eindruck der Genauigkeit vermittelt, mit der die Originalgeschwindigkeiten, -temperaturen und -konzentrationen aus Modellmessungen vorhergesagt werden können. Ein Vergleich der Fehler bei der Vorhersage dieser Größen ist nützlich. Es können jedoch nur relative Fehler (letzte

Tabelle 5: Mittelwerte und Standardabweichungen von  $T'$  nach Korrektur von Gleichung (11)

Versuch Nr.	Längsschnitt	$\overline{T'}$ , K	$\sigma_{T'}$ , K	$(T_1 - T_{1in})_w$ , K	$\overline{T'}$ $(T_1 - T_{1e})_w$	$\sigma_{T'}$ $(T_1 - T_{1e})_w$
1	1	0,5	2,3	9,1	0,055	0,253
1	2	0,2	1,8	8,5	0,023	0,212
1	3	-0,3	2,6	9,1	-0,033	0,286
2	1	0,8	1,8	9,1	0,088	0,198
2	2	0,3	1,8	8,5	0,035	0,212
2	3	-0,2	2,3	9,1	-0,022	0,253
3	1	0,3	2,3	9,1	0,033	0,253
3	2	0,2	2,1	8,5	0,023	0,247
3	3	-0,5	3,0	9,1	-0,055	0,330

Tabelle 6: Mittelwerte und Standardabweichungen von  $C'$

Längsschnitt	$\overline{C'}$ , mg/m <sup>3</sup>	$\sigma_{C'}$ , mg/m <sup>3</sup>	$\overline{C_w}$ , mg/m <sup>3</sup>	$\frac{C'}{\overline{C_w}}$	$\frac{\sigma_{C'}}{\overline{C_w}}$
1	0,0077	0,218		0,0160	0,454
2	0,0166	0,191	0,48	0,0344	0,398
3	-0,0332	0,199		0,0690	0,413

Spalten der Tabellen 1, 5 und 6) miteinander verglichen werden. Bei den absoluten Fehlern muß von Fall zu Fall entschieden werden, wieweit sie annehmbar sind.

Tabelle 7 gibt eine Übersicht über die relativen Fehler, der Durchschnittswerte dreier Längsschnitte.

Aus Gründen, die in Abschnitt 5.2 angegeben wurden, wurde bei den Geschwindigkeiten nur das Mittel über die Längsschnitte 2 und 3 genommen. In dieser Tabelle steht  $W$  für  $V_w$ ,  $(T_1 - T_{1e})_w$  oder  $C_w$  und  $W'$  für  $V'$ ,  $T'$  oder  $C'$ .

Bei den Temperaturen werden nur die relativen Fehler betrachtet, die man mit der korrigierten Gleichung (11) und in Tabelle 5 findet.

## 6 Diskussion

### 6.1 Statistische Analyse der stochastischen Komponenten

Eine sinnvolle Beurteilung der Zuverlässigkeit der Vorhersagen von Luftgeschwin-

Tabelle 7: Mittelwerte der relativen Fehler bei den Vorhersagen

	Versuch Nr.	$\frac{W'}{W}$	$\frac{\sigma_{W'}}{W}$
Geschwindigkeit	1	-0,002	0,570
	2	0,008	0,583
	3	0,072	0,609
	Mittelwert	0,026	0,587
Temperatur	1	0,015	0,250
	2	0,034	0,221
	3	0,000	0,277
	Mittelwert	0,016	0,249
Konzentration		0,040	0,422

digkeiten, Lufttemperaturen und Konzentrationen in der Halle aus Modellmessungen ist nur auf Grund relativer Größen möglich, wie sie in Tabelle 7 gegeben sind. Die dritte Spalte dieser Tabelle zeigt, daß die systematischen Fehler in den Vorhersagen gering sind und bei maximal 4% für die Konzentrationen liegen.

Man kann also annehmen, daß die Zuverlässigkeit der Vorhersagen fast ausschließlich durch die Standardabweichungen bestimmt wird. Das bedeutet auch, daß die in Abschnitt 3 gemachten Annahmen, auf denen die Berechnung der Geschwindigkeiten und Temperaturen in der Halle aus den Modellmessungen basiert, richtig sind.

Die vierte Spalte von Tabelle 7 zeigt, daß die Standardabweichungen bei den Temperaturen am kleinsten (im Mittel etwa 25%) und bei den Geschwindigkeiten am größten (im Mittel etwa 59%) sind. Messungen in einer anderen Fabrikhalle [8] zeigten aber, daß die in einem festen Punkt gemessenen Luftgeschwindigkeiten Standardabweichungen des Mittelwertes von 10 bis 25% aufweisen, während die Meßgenauigkeit (abhängig von der Geschwindigkeit) 5 bis 10% beträgt. Bei den Temperaturen betragen diese Standardabweichungen 5 bis 10% und die Meßgenauigkeit 1%. Diese Werte sind auch bei den Messungen in der S-Halle und ebenso bei den Modellmessungen zu erwarten. Hierdurch werden die Unterschiede in den Standardabweichungen bei der Vorhersage der Luftgeschwindigkeiten und Temperaturen erklärbar. Die Genauigkeit der Konzentrationsmessungen in der S-Halle betrug konzentrationsabhängig etwa



5 bis 25%. Die Schwankungen der Konzentrationen sind aber nicht bekannt. Die Genauigkeit der Konzentrationsmessungen im Modell betrug etwa 5%. Hierdurch wurde auch die Standardabweichung bei der Vorhersage der Konzentrationen einigermaßen begrenzt.

## 6.2 Die Grashofzahl

Aus dem bisher Gesagten sehen wir, daß die Luftströmung in der Halle hauptsächlich von freier Konvektion bestimmt wird. In Abschnitt 3 erwähnten wir, daß die Grashofzahl für das Modell und für die Werkhalle höher als der kritische Wert von  $10^8$  sein muß, damit kinematische Ähnlichkeit erreicht wird.

Die charakteristische Länge in der Grashofzahl ist die Höhe der warmen Maschinenteile in der Halle und die Höhe der geheizten Platten im Modell. Der Temperaturunterschied wird als der Unterschied zwischen der Temperatur der warmen Maschinenoberflächen oder der geheizten Platten im Modell und der Mitteltemperatur der eintretenden Luft definiert (siehe Tabelle 2). Man findet dann:

Werkhalle:  $l = 8,0 \text{ m}$ ,  $\Delta T_w = 34 \text{ K}$ ,  
 $Gr = 2,6 \times 10^{12}$   
 Modell:  $l = 0,4 \text{ m}$ ,  $\Delta T_m = 20 \text{ K}$ ,  
 $Gr = 1,9 \times 10^8$

In der Werkhalle ist die Grashofzahl, wie erwartet werden konnte, viel höher als der kritische Wert. Da die Temperaturen der geheizten Platten nicht viel erhöht werden können, bedeutet dies, daß das Modell beinahe die Mindestabmessungen hatte, die es haben mußte, ohne daß die Grashofzahlen unterhalb des kritischen Wertes lagen.

## 6.3 Die Archimedeszahl

In Abschnitt 3 wurde die Archimedeszahl erwähnt, weil man sie erhält, wenn die Impuls- und Energiegleichungen dimensionslos gemacht werden. Die meisten Verfasser setzen voraus, daß gleiche Archimedeszahlen für zuverlässige, maßstabgetreue Modellversuche notwendig sind. In ihren Versuchen verwenden sie jedoch immer nicht-isotherme Luftstrahlen, die in einen geschlossenen Raum geblasen werden. In solchen Versuchen werden thermische- und Trägheitskräfte in den Raum gebracht, die als Eingabedaten für das System betrachtet werden können. Das Luftströmungsprofil wird durch thermische- und Trägheitskräfte bestimmt. Es ist klar, daß die Verhältnisse dieser Kräfte, ausgedrückt durch die Archimedeszahl, in Modell und Wirklichkeit

gleich sein müssen. Wie oben erwähnt, sind im geschilderten Fall aber nur thermische Kräfte ins System eingeführt worden. Da der Luftstrom nicht von der Eintrittsgeschwindigkeit beeinflusst wird, kann aus den Eingabedaten nur eine Grashofzahl und keine Archimedeszahl berechnet werden. Örtliche Windeinflüsse bei den Fenstern können vernachlässigt werden, so daß das Luftströmungsmuster in der Halle nur von Gleichgewichtskräften bestimmt wird. Die Wärmeübertragung von den Maschinen an die Luft geschieht aber durch gemischte Konvektion. Erzwungene Konvektion wird durch natürliche Lüftung in der Halle, durch den Wind und durch mechanische Lüftung, durch Absaugung der Luft aus der Halle und aus den angrenzenden Hallen, verursacht. Die Anforderungen für gleiche Wärmeübertragungsverhältnisse durch erzwungene und freie Konvektion in der Werkhalle und im Modell liefert Gleichung (5) für das Geschwindigkeitsverhältnis  $v$ . Wenn man  $v$  mit dieser Gleichung löst, gibt Gleichung (11) eine befriedigende Vorhersage der Lufttemperaturen in der Halle, wie in Abschnitt 5.3 gezeigt wurde. Das bedeutet, daß die Verhältnisse zwischen erzwungener und freier Konvektion in der Halle und im Modell wirklich ungefähr gleich sind. Dieses Verhältnis kann als  $(Gr/Re^2)$  ausgedrückt werden, was eigentlich eine örtliche Archimedeszahl für die warmen Maschinenteile oder ihre Modelle ist. Also ist Voraussetzung für gleiche örtliche Archimedeszahlen bei beiden Maschinen die Gleichung (5).

Nennt man die örtliche Archimedeszahl  $Ar_1$ , so kann das Verhältnis zwischen ihren Werten im Modell und in der Halle aus der Gleichung

$$\frac{(Ar_1)_m}{(Ar_1)_w} = \frac{1}{mv^2} \frac{(\Delta T)_m}{(\Delta T)_w} \quad (13)$$

berechnet werden. Wenn man die Werte von  $\Delta T$  aus Abschnitt 6.2 in (13) einsetzt und die Gleichung mit 4 multipliziert, bekommt man  $\frac{(Ar_1)_m}{(Ar_1)_w} = 1,5$ .

Die Multiplikation mit 4 ist nötig, da die warmen Teile jeder Maschine im Modell durch vier parallele Längsplatten simuliert worden sind, um die Temperaturen dieser Platten genügend niedrig zu halten. Die örtlichen Archimedeszahlen bei den Maschinen im Modell und in der Halle sind ungefähr gleich. Vollkommene Übereinstimmung kann man nicht erwarten, da die durchschnittlichen Oberflächentemperaturen der warmen Maschinenteile nicht genau bestimmt werden können. Wenn wir die Luftströmungsprofile in der Halle und im

Modell beobachten, sehen wir, daß thermische Kräfte hauptsächlich im konvektiven Luftstrom über den warmen Maschinenteilen im Querschnitt 9 vorhanden sind. Für die Untersuchung des Verhältnisses der thermischen und der Trägheitskräfte in der ganzen Werkhalle oder im Modell ist es also notwendig, eine Gesamt-Archimedeszahl aus dem Temperaturunterschied zwischen dem warmen konvektiven Luftstrom in Querschnitt 9 und der mittleren Temperatur der Wirbel neben dem konvektiven Luftstrom zu definieren. Nennt man sie Gesamt-Archimedeszahl  $Ar_2$ , dann kann das Verhältnis ihrer Werte im Modell und in der Halle aus der Gleichung

$$\frac{(Ar_2)_m}{(Ar_2)_w} = \frac{1}{mv^2} \frac{(T_{1, \text{Max}} - T_{1, \text{Mit}})_m}{(T_{1, \text{Max}} - T_{1, \text{Mit}})_w} \quad (14)$$

berechnet werden.

Die Maximallufttemperatur im Längsschnitt 2, die im höchsten Meßpunkt gefunden wird, wird als eine repräsentative Temperatur für Querschnitt 9 betrachtet und mit  $T_{1, \text{Max}}$  bezeichnet. Aus den Messungen ergibt sich:

Versuch 1:  $(Ar_2)_m / (Ar_2)_w = 0,73$

Versuch 2:  $(Ar_2)_m / (Ar_2)_w = 0,69$

Versuch 3:  $(Ar_2)_m / (Ar_2)_w = 0,92$ .

Die Gesamt-Archimedeszahlen in der Halle und im Modell sind also auch ungefähr gleich. Es sei bemerkt, daß das Verhältnis  $(Ar_2)_m / (Ar_2)_w$  in Versuch 3, wo  $Q_{\text{Vent}} / Q_{\text{tot}}$  am besten mit dem benötigten Wert (Tabelle 3) übereinstimmt, auch am besten mit dem benötigten Wert 1 übereinstimmt.

Im allgemeinen kann gefolgert werden, daß das Verhältnis zwischen, sowohl in Gesamt- wie in örtlichen Archimedeszahlen ausgedrückten, thermischen und Trägheitskräften in der Halle und im Modell ungefähr gleich ist. Dies ist der Fall sowohl wenn man die Gesamt- als auch die örtlichen Archimedeszahlen betrachtet.

## 6.4 Entwurf der Halle

Die dargestellte Analyse basiert auf einer bestehenden Werkhalle und den Ergebnissen der darin durchgeführten Messungen. Man kann sich fragen, wie Vorhersagen in dieser Halle möglich waren, wenn sie wohl geplant aber noch nicht gebaut worden war. Welche Daten muß man kennen oder aus dem Entwurf berechnen?

Aus der Analyse folgt, daß folgende Daten bekannt sein oder aus dem Entwurf berechnet werden müssen:

- die Geometrie der Werkhalle
- die in die Halle ein- und ausströmenden Luftströme

## Modelluntersuchung des Innenklimas in einer Fabrikhalle

- die in der Halle erzeugte Wärmemenge
- der Prozentsatz der durch Lüftung verlorenen Wärme
- die mittleren Temperaturen der Oberflächen der Wärmequellen
- die Temperaturen der in die Halle einströmenden Luft
- die Schmierölmenge, die aus den Maschinen als kleine Öltröpfchen in die Halle kommt.

Im Entwurf müssen die durch künstliche Belüftung erzeugten, in die Halle ein- oder ausströmenden Luftmengen angegeben werden. Die Druckverteilung über die Außenseite der Halle kann durch Modellversuche mit willkürlichen Windgeschwindigkeiten und Windrichtungen in einem Windkanal bestimmt werden. Aus Fenster-, Tür- und anderen Spezifikationen können die Widerstände gegen Luftströme geschätzt werden.

Darauf kann man mit einem Computerprogramm [8] die Luftwechselzahl berechnen. Wärmeverluste und auch die Temperaturen der in die Halle einströmenden Luft hängen von der Wetterlage, d.h. von der Außentemperatur und vom Wind, ab. Im allgemeinen muß bemerkt werden, daß ein

Modellversuch nur für spezifische Wetterlagen ausgeführt werden kann.

### 7 Schlußfolgerungen

1. Das Luftströmungsmuster in der Fabrikhalle und im Modell ist gleich.
2. Die Lufttemperaturen in der Halle können ziemlich genau aus Modellversuchen vorhergesagt werden. Bei den Konzentrationen ist die Genauigkeit kleiner, bei den Luftgeschwindigkeiten ist sie so gering, daß eine sinnvolle Vorhersage nicht möglich ist. Es können höchstens gewisse Tendenzen in der Luftgeschwindigkeitsverteilung vorhergesagt werden.
3. Das Verhältnis zwischen den, als örtliche oder globale *Archimedeszahlen* ausgedrückte, thermische und Trägheitskräften ist im Modell und in der Halle ungefähr gleich.

### 8 Danksagung

Der *Kommission der Europäischen Gemeinschaften* sei für die Unterstützung, durch die diese Untersuchung ermöglicht wurde, gedankt. *Hoogovens IJmuiden B.V.* danken wir für ihr Interesse und wertvolle Hilfe bei der Untersuchung. [ST 817]

### Schrifttum

- [1] *Van Beukering, F. C., P. Boekesteijn und R. D. Crommelin*: Die Ausbreitung von Luftverunreinigungen in einer Werkhalle durch Konvektionsströmungen. Staub-Reinhalt. Luft 33 (1973) Nr. 4, S. 192/196.
- [2] *Van Beukering, F. C., P. Boekesteijn, R. D. Crommelin und R. Ebens*: De verspreiding van luchtverontreiniging in fabrieksruimten onder invloed van luchtstromingen tengevolge van warmte, wind en ventilatoren. (Die Ausbreitung von Luftverunreinigung in Fabrikräumen unter dem Einfluß von Luftströmungen durch Wärme, Wind und Ventilatoren). IG-TNO, Rapport C312, Januar 1973.
- [3] *Crommelin, R. D. und M. Dubbeld*: Modified anemometers for indoor climate research. Journal of Physics E: Scientific Instruments 1976, Volume 9, p. 1005/1009.
- [4] *Rolloos, M.*: Mogelijkheden en beperkingen bij het vooraf bepalen van stromings- en temperatuurvelden in grote ruimten. (Möglichkeiten und Beschränkungen beim Vorherbestimmen von Strömungs- und Temperaturfeldern in großen Räumen). Klimaatbeheersing 6 (1977), nr. 9/10 (September und October).
- [5] *Renzi, P. N. and K. I. Parczewski*: Scale model studies of temperature distributions in internally heated enclosures. ASHRAE Transactions, Vol. 69, (1963) no. 1854.
- [6] *Müllejans, H.*: Über die Ähnlichkeiten der nichtisothermen Strömung und den Wärmeübergang in Räumen mit Strahlhlftung. Dissertation, Techn. Universität Aachen. Westdeutscher Verlag - Köln und Opladen, 1966.
- [7] *Phaff, J. C.*: Ventilatievoudmetingen in het S-Hal model. (Luftwechselzahlmessungen im Modell der S-Halle). IG-TNO, memo no. 77 BK/115.
- [8] *Van Beukering, F. C., P. Boekesteijn und W. F. de Gids*: Metingen in de Branderij von de Pellet-fabriek. (Messungen in der Brennerie der Pelletfabrik). IG-TNO, rapport C356, Oktober 1975.

## Sorptions- und Ionenaustausch-Eigenschaften lungengängiger Staubanteile von Gießerei-Arbeitsplätzen

Von Václav Mašek, CSc., Ostrava/Tschechoslowakei\*)

Nach der Deposition kleinster Staubpartikeln im Atemtrakt können diese verschiedenen Reaktionen unterliegen. Es wurden daher die Oberflächeneigenschaften von Gießerei-Feinstäuben untersucht. Aus den vorgelegten Resultaten geht hervor, daß es sich bei diesen um fast inaktives Material handelt. Zusätze können jedoch die Oberflächenpassivität ändern.

Schlagwörter: Gießerei / Ionisation / Sorption / Staub, Allgemeines

After finest dust particles have settled in the respiratory tract, they can defeat different reactions. For this reason the surface properties of respirable dust from foundries were investigated. It follows from the results obtained that this dust consists of almost non-active material. Additives can, however, change its surface passivity.

Après la déposition des plus petites particules de poussière dans l'appareil respiratoire, ces différentes réactions peuvent se produire. Pour cette raison on a analysé les caractéristiques superficielles des fines poussières de fonderie. Des résultats obtenus il en résulte qu'il ne s'agit presque essentiellement que de matériel inactif. Des additifs peuvent toutefois changer la passivité superficielle existante jusqu'ici.

Bei den verschiedenen Arbeitsvorgängen in Gießereien, wie Formen, Kernmachen, Gießen, Ausleeren, Strahlen, Putzen, Sandaufbereitung, Ofen- und Pfannenmauern,

entsteht mehr oder weniger Staub. Es wird angenommen, daß von allen in Gießereien verwendeten Arbeitsstoffen die weitaus größten Gesundheitsgefahren von Stäuben quarzhaltiger Mineralien ausgehen. In den letzten Jahren zeigen sich jedoch weitere

hygienische Probleme der Gießereistäube, die zu lösen sind. Z.B. haben *Gwin* und Mitarbeiter [1] bestätigt, daß bei 1450 °C durch Pyrolyse vom Formsand Kondensationsprodukte entstehen, die u.a. etwa 100 aromatische, teilweise kanzerogene Kohlen-

\*) Anschrift des Verfassers: s. Autorenverzeichnis