

# **Auslegung lufttechnischer Einrichtungen zur Stoßfassung**

Von der Fakultät Maschinenbau der Universität Stuttgart zur Erlangung  
der Würde eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.) genehmigte Abhandlung

vorgelegt von

**Armin Walz**

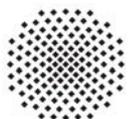
aus Herrenberg

Hauptberichter:  
Prof. Dr.-Ing. Michael Schmidt

Mitberichter:  
Prof. Dr.-Ing. Heinz Bach

Tag der Einreichung:  
28.05.2003

Tag der mündlichen Prüfung:  
21.10.2003



Universität Stuttgart

**IKE**

Lehrstuhl für Heiz- und Raumlufttechnik

2003

## Kurzfassung

Bei Fertigungsprozessen in Handwerk und Industrie werden Stoffe in Form von Gas, Nebel, Rauch und Staub in die Raumluft freigesetzt, welche die Gesundheit der beschäftigten Personen beeinträchtigen und die Produktqualität mindern können. Um die Stoffexposition in den Arbeitsstätten zu reduzieren, werden lufttechnische Einrichtungen zur direkten Erfassung der Stoffe am Entstehungs- oder Emissionsort eingesetzt.

In der vorliegenden Arbeit wird ein Verfahren zur bedarfsgerechten Konzipierung von Erfassungseinrichtungen offener Bauart vorgestellt. Die wesentlichen Strömungsvorgänge bei der Erfassung luftfremder Stoffe können damit vollständig und geschlossen berücksichtigt werden. Einleitend wird eine Übersicht über die bestehenden Auslegungsgrundlagen für Erfassungseinrichtungen gegeben. Die Defizite der bisher angewandten Methoden werden aufgezeigt.

Es folgt die Beschreibung der experimentellen Methode, mit der das Zusammenwirken von Erfassungsströmung, Stoffausbreitungsvorgängen und Störluftbewegungen systematisch untersucht wird. Der Aufbau des Prüfstands für Erfassungseinrichtungen wird skizziert. Daran schließt sich die Theorie zur numerischen Simulation von Raumluftströmungen an. Besonderheiten bei der Modellierung von Auftriebsströmungen werden dargelegt. Die Ergebnisse der Strömungssimulation werden mit experimentell gewonnenen Daten validiert.

Ausgehend von Untersuchungen zum ungestörten Strömungsfeld vor frei stehenden Saugrohren mit Einströmdüse und Flansch werden die Isotachenfelder der Erfassungselemente in Abhängigkeit von der Flanscbreite berechnet und allgemeingültig aufbereitet. Die ermittelten Sauggeschwindigkeiten dienen als Bezugsgrößen sowohl für die weiteren Untersuchungen zur Erfassung luftfremder Stoffe als auch für die Erstellung der Auslegungsgrundlagen. Darüber hinaus werden für die untersuchten Erfassungselemente Berechnungsgleichungen zur genauen Beschreibung des Geschwindigkeitsverlaufs auf der Saugachse entwickelt.

Basierend auf umfangreichen experimentellen Untersuchungen und numerischen Berechnungen wird für ausgewählte Erfassungselemente der Erfassungsgrad in Abhängigkeit vom Erfassungsluftstrom (sog. Erfassungsgradkennlinie) ermittelt. Die variierten Parameter sind die Geschwindigkeit der Querströmung, der Abstand bzw. Versatz zwischen Erfassungselement und Stoffquelle, die Quellstärke sowie die Hauptabmessungen der Stoffquelle. Insgesamt werden acht Wärme- und Stoffquellen kombiniert mit bis zu sechs Erfassungselementen untersucht.

Aus den Ergebnissen wird ein Auslegungsverfahren für Erfassungseinrichtungen bei thermisch geprägten und isothermen Stoffausbreitungsvorgängen abgeleitet, das in der Praxis einfach zu handhaben ist. Die Anwendung der Auslegungsgrundlagen wird an einem Beispiel demonstriert.

## **Abstract**

Many production processes generate air contaminants (gases, vapors, fumes and dust) which can cause negative health effects on workers and which might reduce product quality. Local extract systems (LES) are used to reduce or preferably avoid workers' exposure by removing contaminants close to the emission source.

In this thesis a validated and precise design method for exterior LES is presented. Within the design procedure the most important factors affecting the performance of LES can be taken quantitatively into account.

Prefacing a survey of existing design principles for LES is given. The disadvantages of the presently used design methodologies are shown.

The experimental method is described with which the interactions between the extract air volume rate, the spread of contaminants and the disturbing air movements, e.g. crossflow, are investigated. The measuring principle for the investigation of LES and the construction of the test rig are outlined. The theory for the numerical simulation (CFD) of air flow patterns within buildings is followed afterwards. Special features for modelling buoyancy driven flows are represented. The CFD calculations are verified by laboratory experiments.

Starting from investigations of the undisturbed air flow into freestanding bellmouth intakes with flange the velocity fields are calculated and measured depending on the width of the flange. The results are presented in an universal manner. The ascertained suction velocities are used as reference values both within investigations concerning capture of contaminants and within the development of design guidelines. In addition centreline velocity equations are developed for the investigated collecting devices to estimate precisely the suction velocity in front of the hoods. Based on experimental investigations and CFD calculations the characteristics of collection efficiency versus extract air volume rate (so-called collection efficiency characteristic) of differently shaped collecting devices are determined. The varied parameters are the velocity of the crossflow, the distance and vertical eccentricity between collecting device and contaminant source, the source strength and in particular the dimensions of the heat source. Overall eight heat and contaminant sources are investigated combined with up to six collecting devices.

Based on these findings new LES design methods are developed. The results are summarised in design diagrams for easy use. The handling of the design guidelines is demonstrated by way of an example.

# Inhalt

## Nomenklatur

<b>1</b>	<b>Einleitung</b> .....	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Literaturüberblick</b> .....	<b>7</b>
2.1	Grundlagen .....	7
2.1.1	Strömung an Erfassungseinrichtungen .....	7
2.1.2	Stoffemissions- und Stoffausbreitungsvorgänge .....	12
2.1.3	Störströmungen .....	14
2.2	Erfassung luftfremder Stoffe .....	16
2.3	Bestehende Auslegungsgrundlagen .....	21
2.3.1	Allgemeine Gestaltungshinweise .....	21
2.3.2	Empfehlungen für bestimmte Anwendungsfälle .....	21
2.3.3	Auslegung nach Erfassungsluftgeschwindigkeiten .....	22
2.3.4	Auslegung nach dem Thermikluftstrom .....	25
2.3.5	Modelluntersuchungen .....	26
2.3.6	Numerische Strömungssimulation .....	28
<b>3</b>	<b>Versuchskonzept</b> .....	<b>30</b>
3.1	Randbedingungen .....	33
3.2	Umsetzung der Erkenntnisse in ein Auslegungskonzept .....	34
<b>4</b>	<b>Experimenteller Aufbau</b> .....	<b>35</b>
4.1	Versuchsanlage .....	35
4.2	Erfassungselemente .....	39
4.3	Wärme- und Stoffquellen .....	41
4.4	Messung der Luftgeschwindigkeiten auf der Saugachse .....	43
4.5	Experimentelle Bestimmung des Erfassungsgrads .....	45
<b>5</b>	<b>Numerische Berechnung von Raumlftströmungen</b> .....	<b>47</b>
5.1	Erhaltungsgleichungen zur mathematischen Modellbildung .....	48
5.1.1	Kontinuitätsgleichung .....	48
5.1.2	Impulserhaltungsgleichung .....	49
5.1.3	Energieerhaltungsgleichung .....	49
5.1.4	Stofftransportgleichung .....	50
5.1.5	Allgemeine Transportgleichung .....	50
5.2	Turbulenzmodellierung .....	53
5.2.1	Standard- $k$ - $\varepsilon$ -Turbulenzmodell .....	54
5.2.2	Renormalization Group (RNG)- $k$ - $\varepsilon$ -Turbulenzmodell .....	56
5.2.3	Behandlung der turbulenten Strömung im wandnahen Bereich .....	58

5.3	Diskretisierung des Gleichungssystems .....	59
5.4	Berechnungsgitter .....	62
5.4.1	Frei stehende Erfassungseinrichtungen .....	62
5.4.2	Erfassungseinrichtungen in der Prüfkabine .....	65
5.5	Vergleich der Simulationsergebnisse mit Messwerten .....	67
<b>6</b>	<b>Ergebnisse .....</b>	<b>72</b>
6.1	Geschwindigkeitsfelder an frei stehenden Erfassungseinrichtungen .....	72
6.1.1	Isotachenfelder an Saugrohren mit Einströmdüse und Flansch .....	72
6.1.2	Geschwindigkeitsabnahme auf der Saugachse .....	74
6.2	Einsatzgrenzen von Erfassungseinrichtungen .....	83
6.3	Ausspülung .....	87
6.4	Einflussgrößen auf den Erfassungsgrad .....	89
6.4.1	Übertemperatur der Wärme- und Stoffquelle .....	89
6.4.2	Flanschbreite .....	94
6.4.3	Querströmung .....	96
6.4.4	Vertikaler Abstand zwischen Erfassungselement und Stoffquelle .....	99
6.4.5	Horizontaler Versatz zwischen Erfassungselement und Stoffquelle .....	100
6.4.6	Quellendurchmesser .....	105
6.4.7	Quellenhöhe .....	110
6.4.8	Emissionsgeschwindigkeit .....	110
<b>7</b>	<b>Grundlagen zur Auslegung von Erfassungseinrichtungen .....</b>	<b>113</b>
7.1	Auslegungsdiagramme und Korrekturfaktoren .....	113
7.2	Anwendungsbereich der Auslegungsgrundlagen .....	118
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung .....</b>	<b>120</b>
<b>9</b>	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>123</b>
<b>Anhang</b>	<b>.....</b>	<b>135</b>
	Anhang 1: Erfassungselemente .....	135
	Anhang 2: Isotachenfelder .....	142
	Anhang 3: Auslegungsdiagramme .....	145
	$H_p = 500 \text{ mm}, D = 300 \text{ mm}, H_{\max} = 550 \text{ mm}$ .....	145
	$H_p = 1000 \text{ mm}, D = 300 \text{ mm}, H_{\max} = 550 \text{ mm}$ .....	155
	$H_p = 1500 \text{ mm}, D = 300 \text{ mm}, H_{\max} = 550 \text{ mm}$ .....	162
	$H_p = 500 \text{ mm}, D = 600 \text{ mm}, H_{\max} = 550 \text{ mm}$ .....	169
	$H_p = 1000 \text{ mm}, D = 600 \text{ mm}, H_{\max} = 550 \text{ mm}$ .....	176
	$H_p = 1500 \text{ mm}, D = 600 \text{ mm}, H_{\max} = 550 \text{ mm}$ .....	186
	$H_p = 1000 \text{ mm}, D = 600 \text{ mm}, H_{\max} = 1100 \text{ mm}$ .....	193
	Anhang 4: Beispielauslegung .....	197