

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

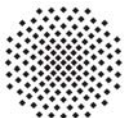
aus Herrenberg

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

1	Einleitung	1
2	Literaturüberblick	7
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
3	Versuchskonzept	30
3.1	Randbedingungen	33
3.2	Umsetzung der Erkenntnisse in ein Auslegungskonzept	34
4	Experimenteller Aufbau	35
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
5	Numerische Berechnung von Raumlftströmungen	47
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 - ε -Turbulenzmodell	54
5.2.2	Renormalization Group (RNG)- k - ε -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
6	Ergebnisse	72
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
7	Grundlagen zur Auslegung von Erfassungseinrichtungen	113
7.1	Auslegungsdiagramme und Korrekturfaktoren	113
7.2	Anwendungsbereich der Auslegungsgrundlagen	118
8	Zusammenfassung	120
9	Literaturverzeichnis	123
Anhang	135
	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