

Energieeinsparung versus Schadstoff- reduzierung in der Industrielüftung

17.10.2018

6. Industrie Symposium der PGMM

Eberhard Dux, PGMM

Agenda

	Motivation		Lüftungsprinzipien und Belastungsgrade
	Wo kommen wir her? Entwicklung der Außenluftrate im Karosseriebau		„treibende Kräfte“ der Veränderung
	Schematische Darstellung Wärme- und Stoffströme		Betrachtete Referenzhalle
	Basics		Messung der Schadstoffe
	Schadstoffe		Ermitteln der Thermikströme
	Erfassungseinrichtungen		Zusammenfassung

Motivation

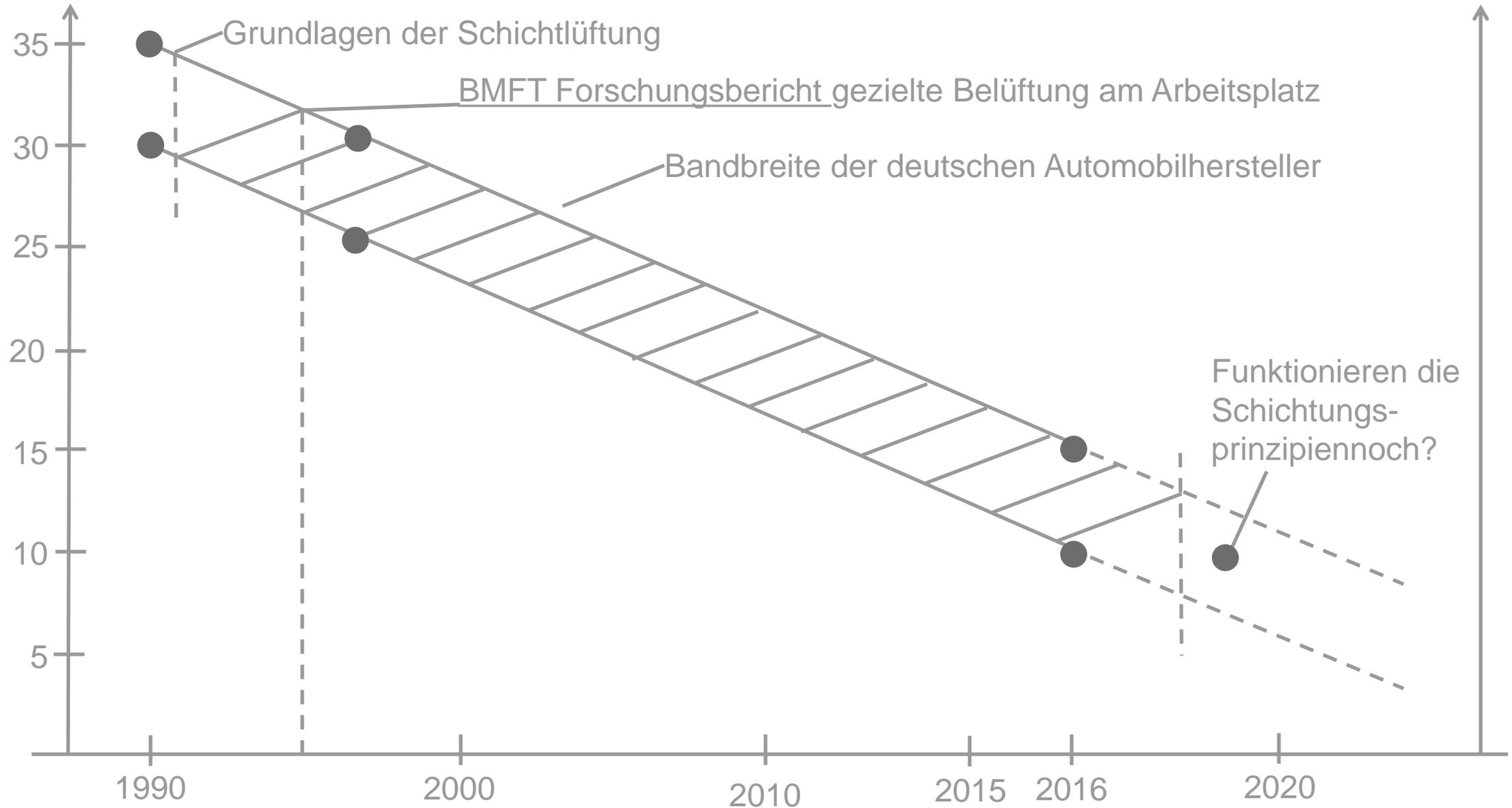


- Klären, ob bereits der Grenzbereich für die Auslegung der Schichtlüftung erreicht ist
- Die Auslegung (Reduzierung der Luftmengen) erfolgt in der Praxis nicht durch Berechnung, sondern durch „Probieren“ (Messung von Schadstoffen im Betrieb)
- Aufbau einer Datenbank bezüglich der Partikelfreisetzung bei verschiedenen Arbeitsprozessen im Karosseriebau
- Kreieren eines neuen Forschungsprojekts in der Industrielüftung mit Schwerpunkt Karosseriebau

Agenda

	Motivation		Lüftungsprinzipien und Belastungsgrade
	Wo kommen wir her? Entwicklung der Außenluftrate im Karosseriebau		„treibende Kräfte“ der Veränderung
	Schematische Darstellung Wärme- und Stoffströme		Betrachtete Referenzhalle
	Basics		Messung der Schadstoffe
	Schadstoffe		Ermitteln der Thermikströme
	Erfassungseinrichtungen		Zusammenfassung

Entwicklung der Auslegungsrate im Karobau



Agenda



	Motivation		Lüftungsprinzipien und Belastungsgrade
	Wo kommen wir her? Entwicklung der Außenluftrate im Karosseriebau		„treibende Kräfte“ der Veränderung
	Schematische Darstellung Wärme- und Stoffströme		Betrachtete Referenzhalle
	Basics		Messung der Schadstoffe
	Schadstoffe		Ermitteln der Thermikströme
	Erfassungseinrichtungen		Zusammenfassung

Schematische Darstellung der Wärme- und Schadstoffströme

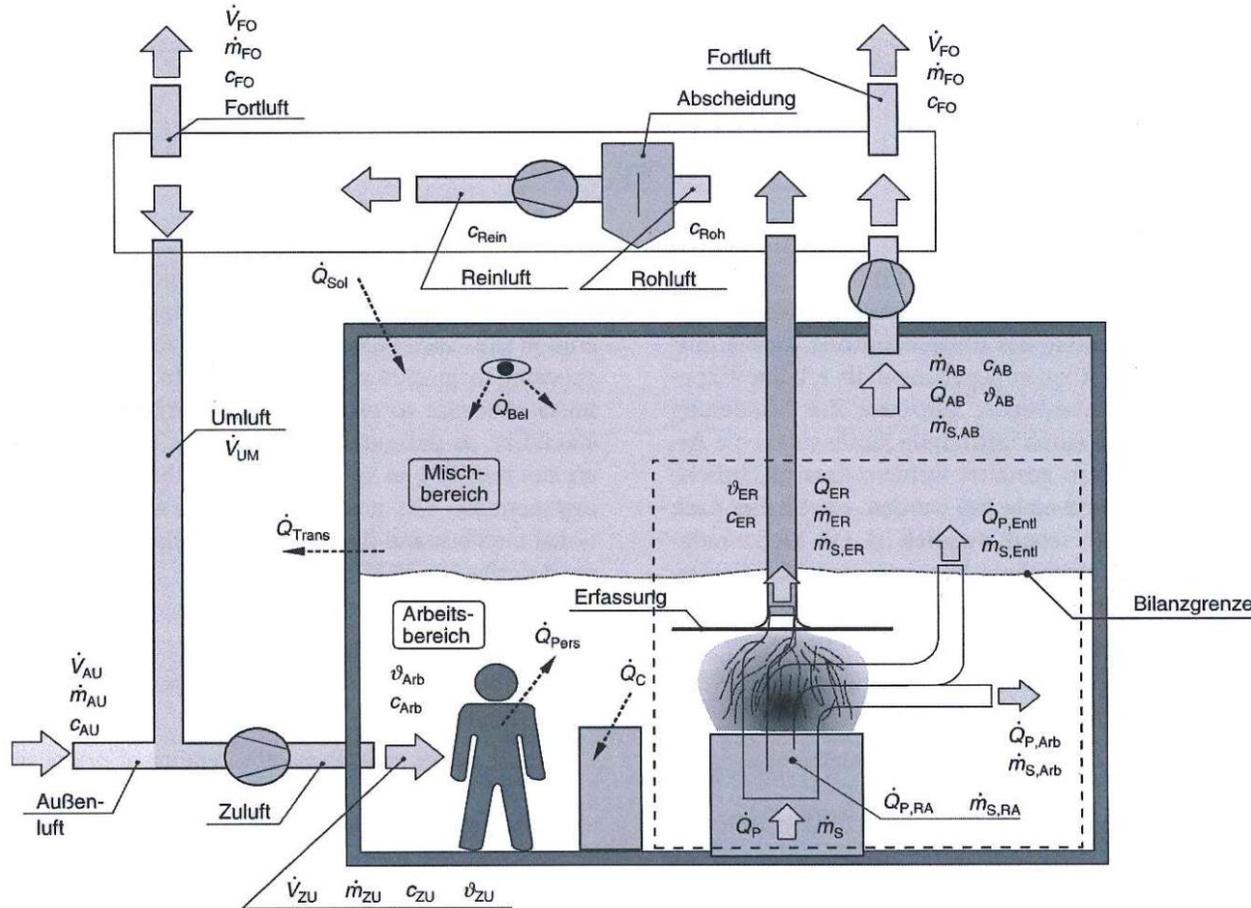


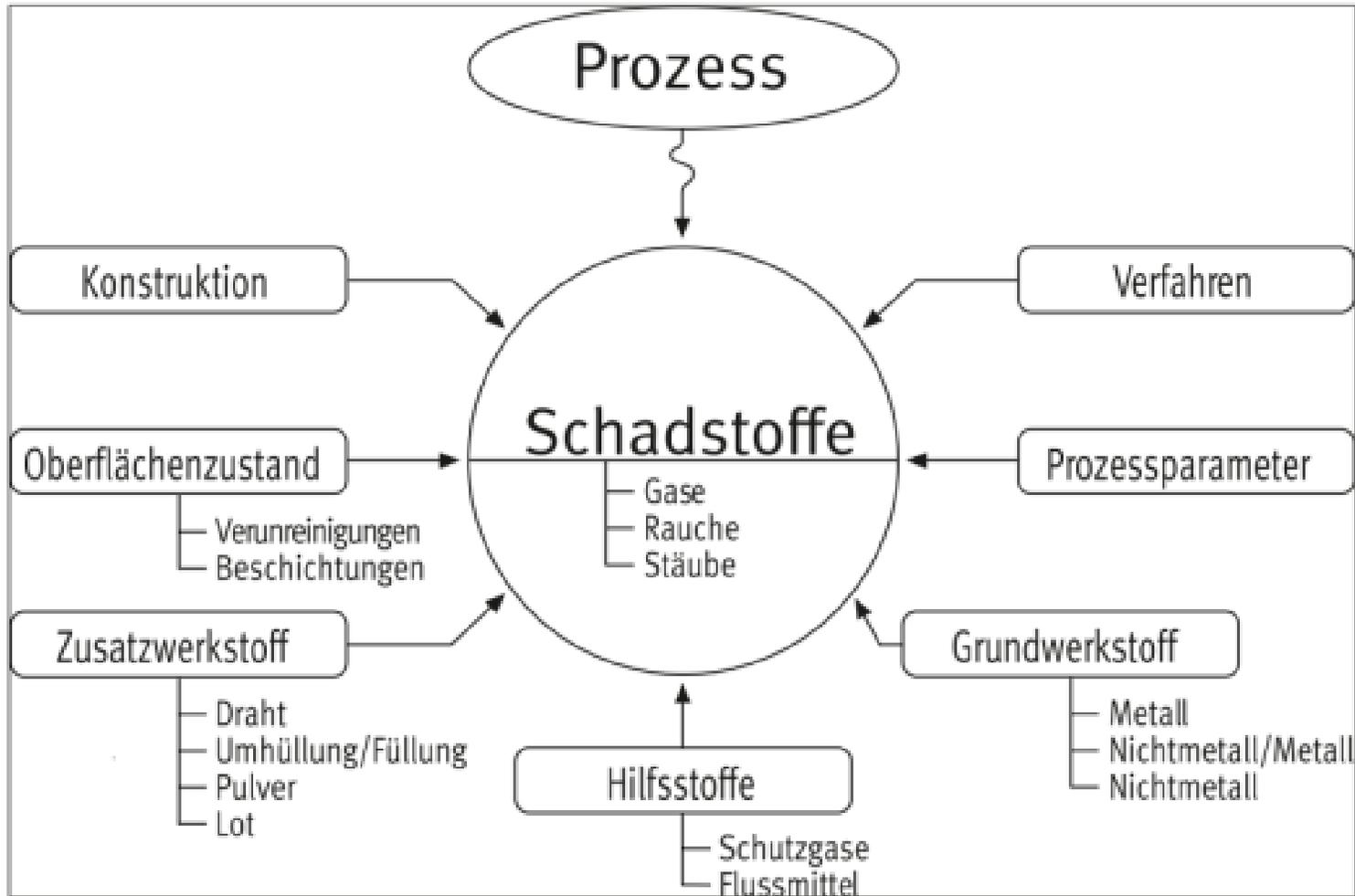
Bild 1. Schematische Darstellung der Wärme und Stoffströme, Berechnungsgrößen

Agenda

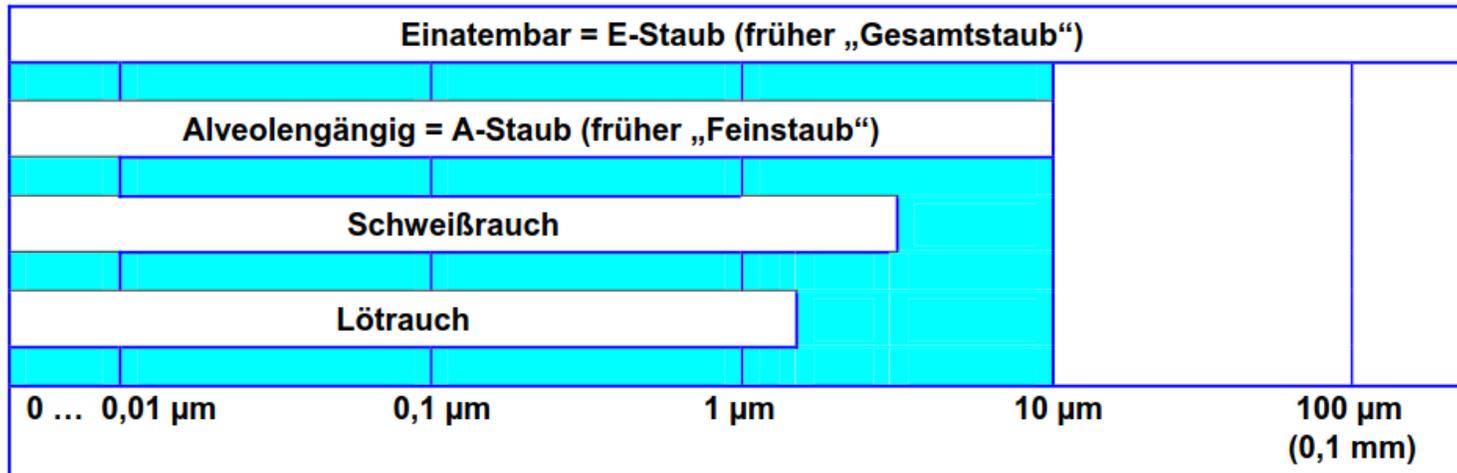


	Motivation		Lüftungsprinzipien und Belastungsgrade
	Wo kommen wir her? Entwicklung der Außenluftrate im Karosseriebau		„treibende Kräfte“ der Veränderung
	Schematische Darstellung Wärme- und Stoffströme		Betrachtete Referenzhalle
	Basics		Messung der Schadstoffe
	Schadstoffe		Ermitteln der Thermikströme
	Erfassungseinrichtungen		Zusammenfassung

Basics - Schadstoffe



Einteilung der partikelförmigen Gefahrstoffe in der Schweißtechnik nach Partikelgröße



MAK-Werte (Maximale-Arbeitsplatzkonzentration)

Allgemeiner Staubgrenzwert

Einatembare (E-)Fraktion

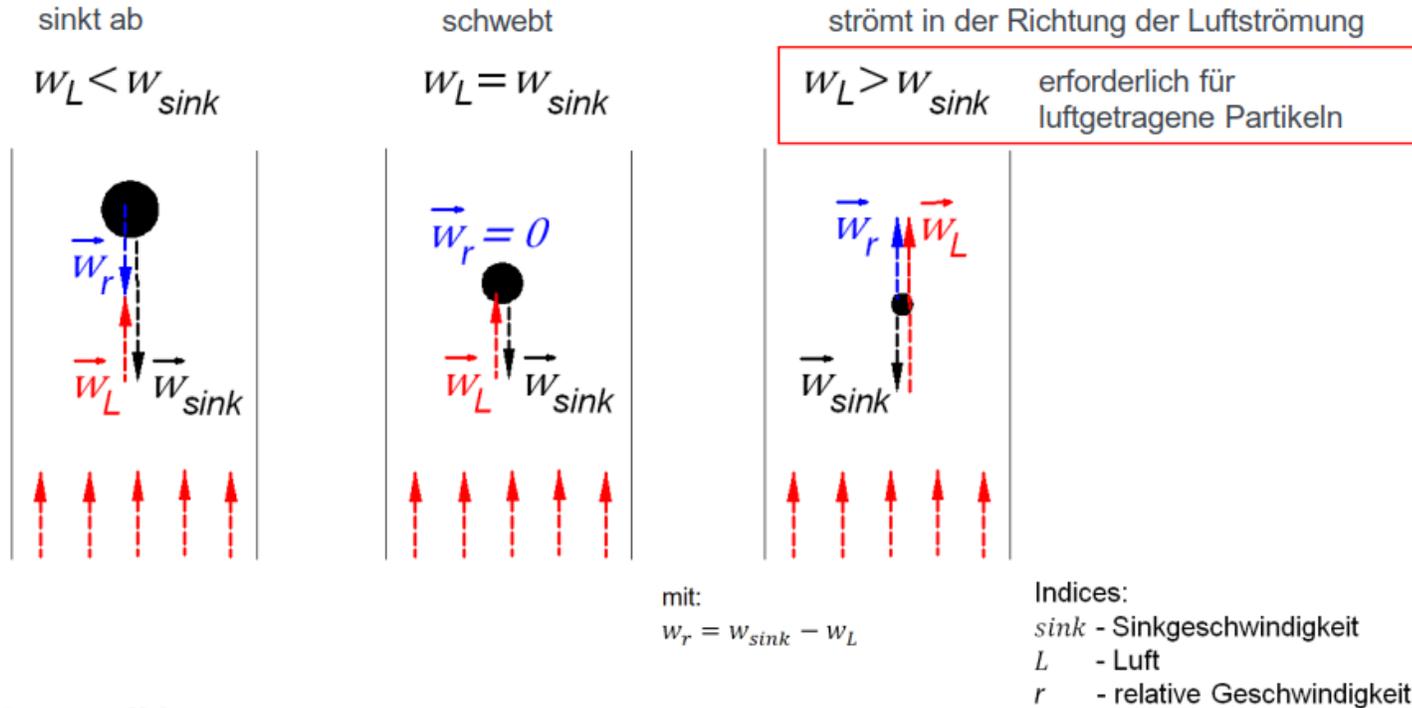
- Grenzwert 4 mg/m³
- „Gesamtstaub“
- Durchmesser bis über 100 µm

Alveolengängige (A-) Fraktion

- Grenzwert 0,3 mg/m³
- „Feinstaub“
- Durchmesser bis zu 10 µm

Grenzwerte gelten für den Arbeitsbereich.

Ausbreitung der luftfremden Stoffe



Klasse	d	w_{sink}
[-]	[μm]	[m/s]
1	Kleiner 2,5	0,00
2	2,5 – 10	0,00
3	10 – 50	0,04
4	Größer 50	0,15

Überprüfung

- Auftrieb Luft > Sinkgeschwindigkeit Partikel?
- Falls ja: Partikel werden aus dem Arbeitsbereich gebracht
- Falls nicht: Zusätzliche Luft wird benötigt

Agenda

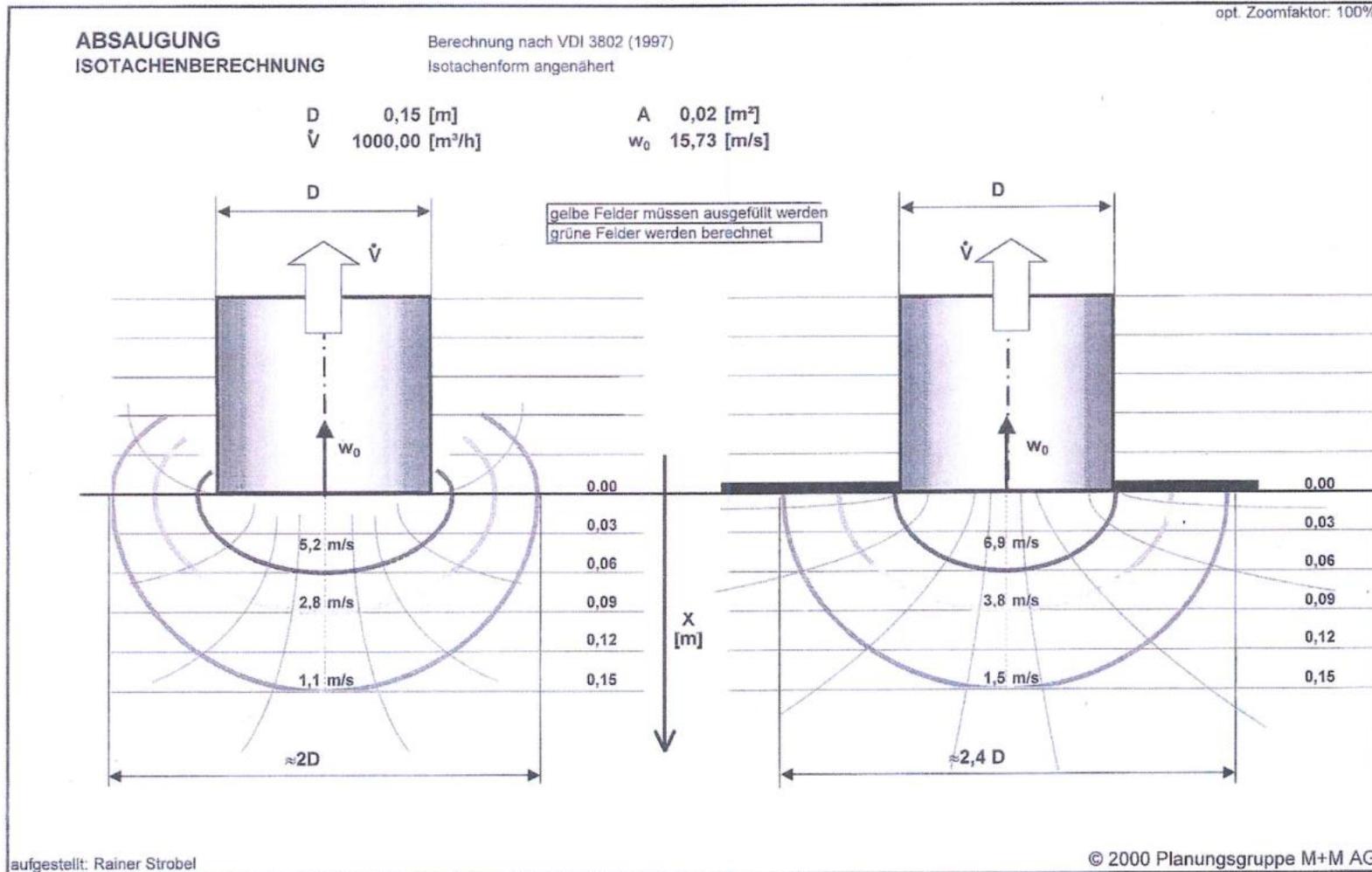


	Motivation		Lüftungsprinzipien und Belastungsgrade
	Wo kommen wir her? Entwicklung der Außenluftrate im Karosseriebau		„treibende Kräfte“ der Veränderung
	Schematische Darstellung Wärme- und Stoffströme		Betrachtete Referenzhalle
	Basics		Messung der Schadstoffe
	Schadstoffe		Ermitteln der Thermikströme
	Erfassungseinrichtungen		Zusammenfassung

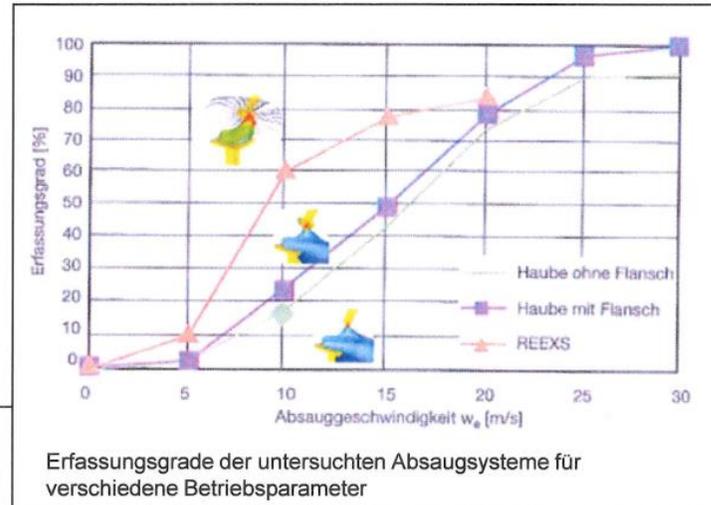
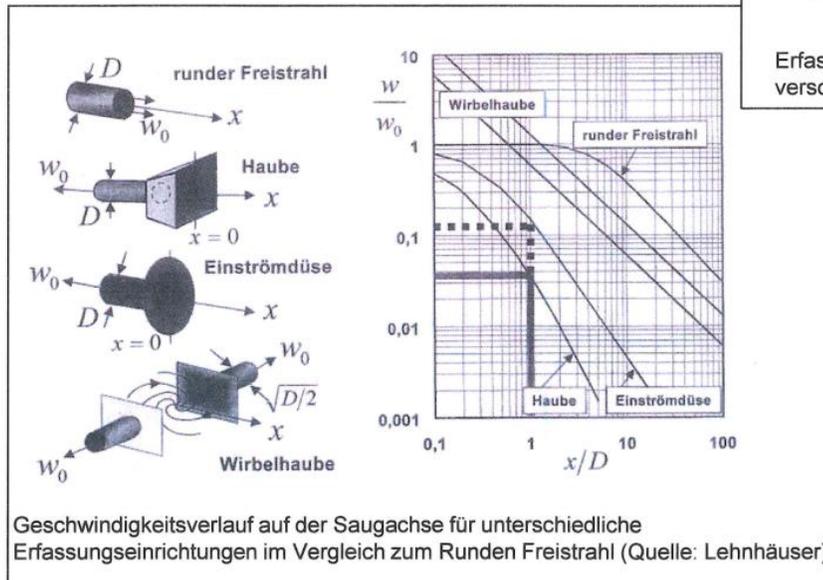
Erfassungseinrichtungen



Berechnung Absaugung



Wirkung Absaugsysteme

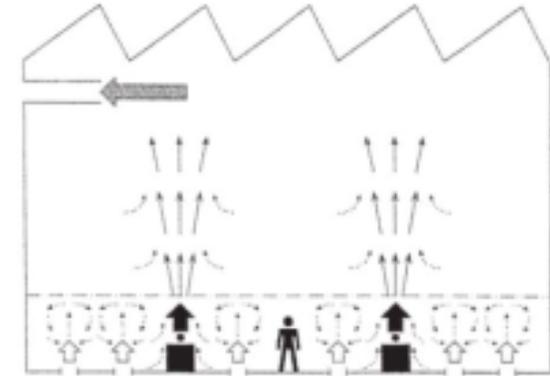
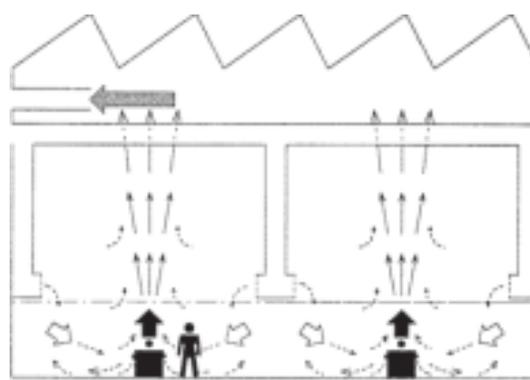
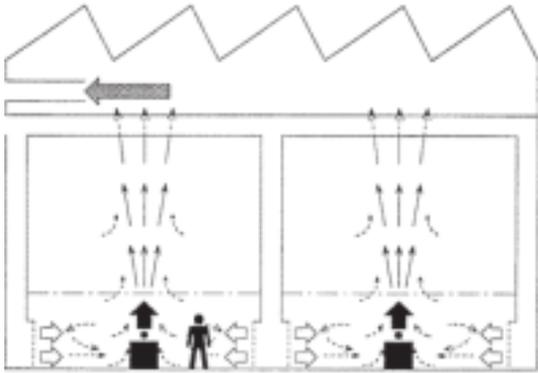


Agenda

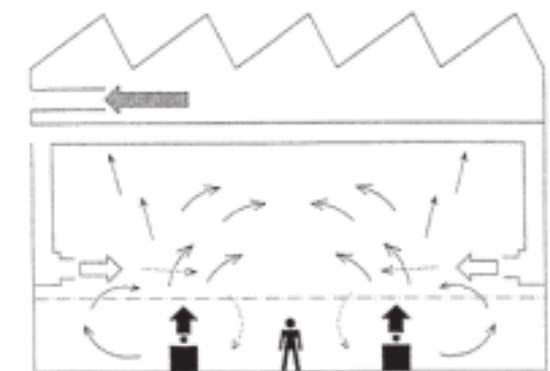
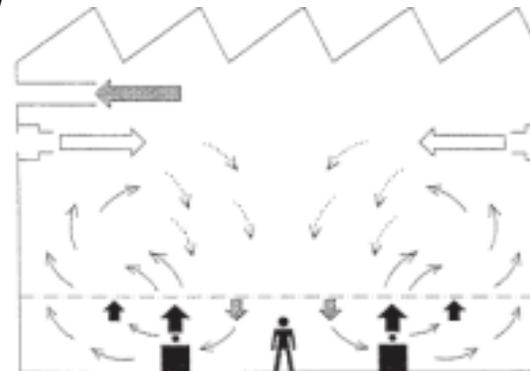
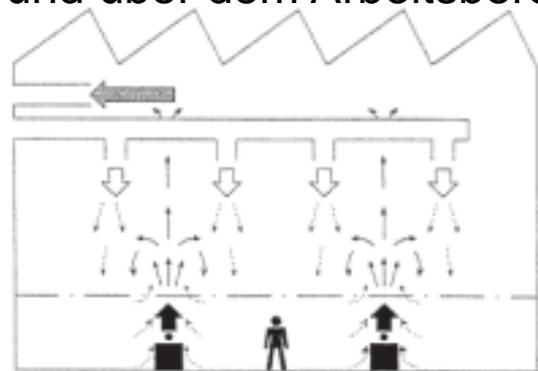
	Motivation		Lüftungsprinzipien und Belastungsgrade
	Wo kommen wir her? Entwicklung der Außenluftrate im Karosseriebau		„treibende Kräfte“ der Veränderung
	Schematische Darstellung Wärme- und Stoffströme		Betrachtete Referenzhalle
	Basics		Messung der Schadstoffe
	Schadstoffe		Ermitteln der Thermikströme
	Erfassungseinrichtungen		Zusammenfassung

Lüftungsprinzipien und Belastungsgrade

Prinzip der Schichtlüftung: Luftzufuhr im Arbeitsbereich (links), Luftzufuhr oberhalb des Arbeitsbereich (Mitte), Luftzufuhr über den Boden (rechts)



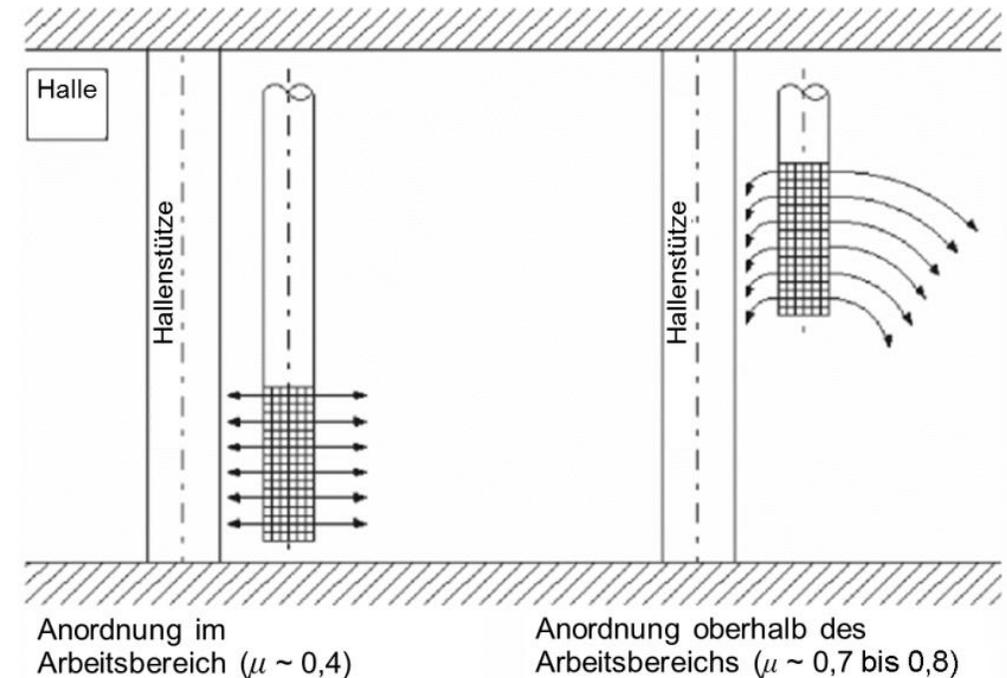
Prinzip der Mischlüftung: Luftzufuhr nach unten gerichtet (links), horizontal unter dem Hallendach (Mitte) und über dem Arbeitsbereich (rechts)



Experimentell ermittelte Belastungsgrade für unterschiedliche Luftführungskonzepte

Lastabfuhrprinzip	Luftführung	verwendete Luftdurchlässe	Belastungsgrade ¹ nach [43]	
			μ_s	μ_w
Mischen	hallenfüllende Mischströmung	Wand-Luftdurchlässe (horizontal ausblasend in Höhe $H = 3,5$ m)	1,0	1,0
Eingrenzen	Schichtströmung mit impulsarmer Luftzufuhr im Arbeitsbereich	ebene Schichtzulftdurchlässe (am Boden)	0,42 - 0,69	0,4 - 0,7
		zylindrische Schichtzulftdurchlässe mit Impulsstabilisierung (am Boden)	0,05 - 0,18	0,45
Eingrenzen	bereichsweise Mischströmung mit Luftzufuhr am Boden	Zulftdurchlässe im Fußboden	0,17 - 0,21	0,38 - 0,45
Eingrenzen	Schichtströmung mit impulsarmer Luftzufuhr über dem Arbeitsbereich	Schichtzulftdurchlässe eben oder zylindrisch (horizontal ausblasend in Höhe $H = 3$ m)	0,47 - 0,73	0,65

¹ für die Anwendungsfälle Gießerei, Preßwerk und mechanische Fertigung



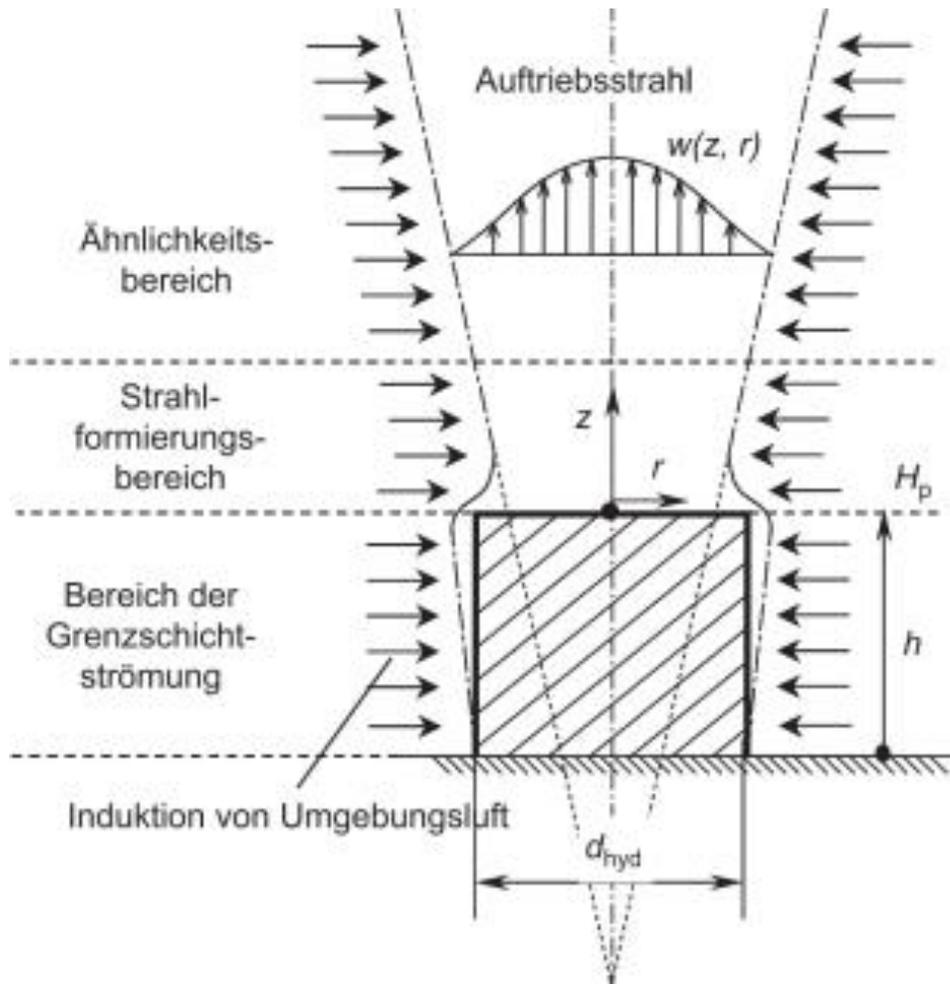
Quelle: Biegert B., Dittes W.: Katalog technischer Maßnahmen zur Luftreinhaltung. Konzeption, Auswahl und Auslegung von Einrichtungen. Dortmund/Berlin. 2001. (Schriftenreihe der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin: Forschung, Fb834)

Quelle: VDI/DVS 6005 02/2018

Agenda

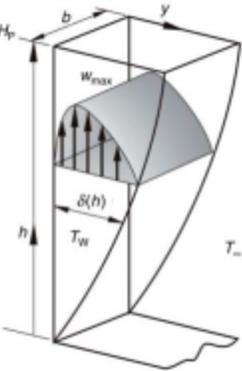
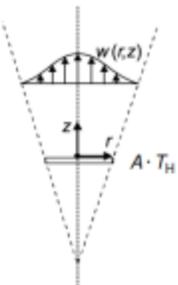
	Motivation		Lüftungsprinzipien und Belastungsgrade
	Wo kommen wir her? Entwicklung der Außenluftrate im Karosseriebau		„treibende Kräfte“ der Schichtlüftung
	Schematische Darstellung Wärme- und Stoffströme		Betrachtete Referenzhalle
	Basics		Messung der Schadstoffe
	Schadstoffe		Ermitteln der Thermikströme
	Erfassungseinrichtungen		Zusammenfassung

Thermikströmung an einer wärmeabgebenden Oberfläche



1. Isotherme Berechnung:
Beruht auf der Annahme, dass die Umgebungstemperatur über die gesamte Höhe der Zuluftschicht konstant bleibt
2. Anisotherme Berechnung:
Berücksichtigt, dass mit der Höhe die Temperatur des Thermikstroms zunimmt und es zu Temperaturschichtungen kommt. Dabei wird ein ca. 6 - 10 % geringerer Luftstrom als bei der isothermen Berechnung ermittelt. Jedoch ist dies rechnerisch nur sehr schwer realistisch umsetzbar. Die Temperaturgradienten müssten willkürlich angenommen werden, was wiederum zu Fehlern in der Berechnung führt.

Berechnung der Thermik an vertikalen und horizontalen Flächen

Thermik an vertikalen Flächen		
	Für laminarer Strömungsbereich: $Gr(h) * Pr < 10^8$	
	Luftstrom: $\dot{V}_V = 1,79 * v_w * Gr(h)^{\frac{1}{4}} * b$ (2-1)	
	Für turbulenter Strömungsbereich: $Gr(h) * Pr > 10^8$	
	Luftstrom: $\dot{V}_V = 0,104 * v_w * Gr(h)^{0,4} * b$ (2-2)	
mit:	$Gr(h) = \frac{g * h^3 * (T_w - T_{\infty})}{v_w^2 * T_{\infty}}$ (2-3)	
	Pr = 0,72 (für Luft)	
Thermik über horizontalen Flächen		
	Luftstrom: $\dot{V}_H(z) = k_1 * \dot{Q}_K^{\frac{1}{3}} * (z + 1,7 * d_{hyd})^{\frac{5}{3}}$ (2-4)	
	mit:	$k_1 = 0,005 m^{\frac{4}{3}} W^{-\frac{1}{3}} s^{-1}$
		$\dot{Q}_K = \alpha_K * A * (T_H - T_{\infty})$ (2-5)

$$\dot{V} \approx \sqrt[3]{Q}$$

Agenda



■	Motivation	■	Lüftungsprinzipien und Belastungsgrade
■	Wo kommen wir her? Entwicklung der Außenluftrate im Karosseriebau	■	„treibende Kräfte“ der Schichtlüftung
■	Schematische Darstellung Wärme- und Stoffströme	■	Betrachtete Referenzhalle
■	Basics	■	Messung der Schadstoffe
■	Schadstoffe	■	Ermitteln der Thermikströme
■	Erfassungseinrichtungen	■	Zusammenfassung

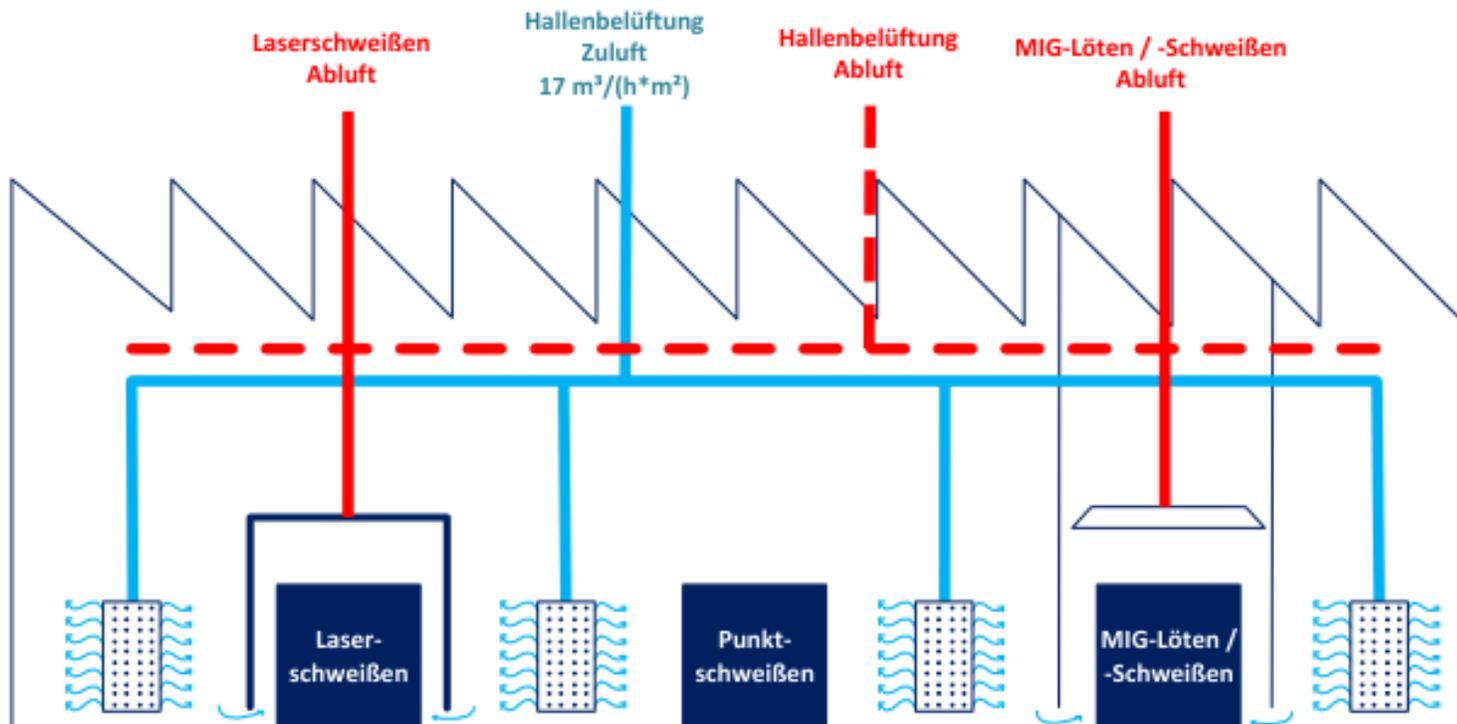
Betrachtete Referenzhalle



Hallengdaten	
Hallenfläche gesamt	18.500 m ²
Rohbau-Hallenfläche	16.500 m ²
Logistik-Hallenfläche	2.000 m ²
Hallenhöhe	11,5 m
Anlagedaten	
Roboterarme gesamt	255 Stk.
Schweißroboterarme	156 Stk.
sonstige Roboterarme (Hebe-, Prüfroboter)	107 Stk.
Schweißpunkte	129.171 SWP/h
Luftmengen	
Hallenbelüftung - Zuluft	280.000 m ³ /h
MIG-Löten - Abluft	30.450 Stk.
Laserschweißen - Abluft	2.000 Stk.

Betrachtete Referenzhalle

Messungen in der Abluft zeigen
Konzentrationen von
 $0,09 - 0,10 \text{ mg/m}^3 \text{ h}$



- Anzahl der Schweißpunkte wurde aus den Analysedatenblättern ermittelt
- Die Umrechnung auf die Anzahl der Schweißpunkte zeigt, dass pro Punkt $0,20 - 0,22 \text{ mg/h}$ an Schadstoff freigesetzt werden

Agenda



■	Motivation	■	Lüftungsprinzipien und Belastungsgrade
■	Wo kommen wir her? Entwicklung der Außenluftrate im Karosseriebau	■	„treibende Kräfte“ der Schichtlüftung
■	Schematische Darstellung Wärme- und Stoffströme	■	Betrachtete Referenzhalle
■	Basics	■	Messung der Schadstoffe
■	Schadstoffe	■	Ermitteln der Thermikströme
■	Erfassungseinrichtungen	■	Zusammenfassung

Emissionsmessungen in der Abluft



Anlagen- bezeichnung	Abluft- volumenstrom	Konzentration gemessen im Reingas	Emissions- massenstrom im Reingas	Anzahl der Schweißpunkte	Emissionen pro Schweißpunkt
[-]	[m³/h]	[mg/m³]	[mg/h]	[SWP/h]	[mg/SWP]
1. Auswertung der Abluft einer Halle mit einem Abluftgeräten:					
Hallenabluft	16830	0,09	1515	7727	0,20
Hallenabluft	16830	0,10	1683	7727	0,22
2. Auswertung einer Haubenabsaugung von 5 Schweißrobotern:					
Haubenabsaugung	685	0,45	308	1280	0,24
Haubenabsaugung	685	0,30	206	1040	0,20

Emissionsmessungen im betrachteten OG



Anlagen- bezeichnung	Abluft- volumenstrom	Konzentration gemessen im Reingas	Emissions- massenstrom im Reingas	Anzahl der Schweißpunkte	Emissionen pro Schweißpunkt
[-]	[m³/h]	[mg/m³]	[mg/h]	[SWP/h]	[mg/SWP]
Auswertung der Abluft einer Halle mit 4 Abluftgeräten: (Referenzhalle)					
Hallenabluft 1	72020	0,36	25927	33622	0,77
Hallenabluft 2	72017	0,27	19445	30027	0,65
Hallenabluft 3	71633	0,23	16476	34199	0,48
Hallenabluft 4	63497	0,23	14604	31323	0,47
gesamt:	279167	0,27	19113	32293	0,59

Agenda



■	Motivation	■	Lüftungsprinzipien und Belastungsgrade
■	Wo kommen wir her? Entwicklung der Außenluftrate im Karosseriebau	■	„treibende Kräfte“ der Schichtlüftung
■	Schematische Darstellung Wärme- und Stoffströme	■	Betrachtete Referenzhalle
■	Basics	■	Messung der Schadstoffe
■	Schadstoffe	■	Ermitteln der Thermikströme
■	Erfassungseinrichtungen	■	Zusammenfassung

Ermitteln der Thermikströme - Einflussfaktoren



Thermik der Schaltschränke

Abmessungen: 0,4 m x 0,4 m x 2,0 m

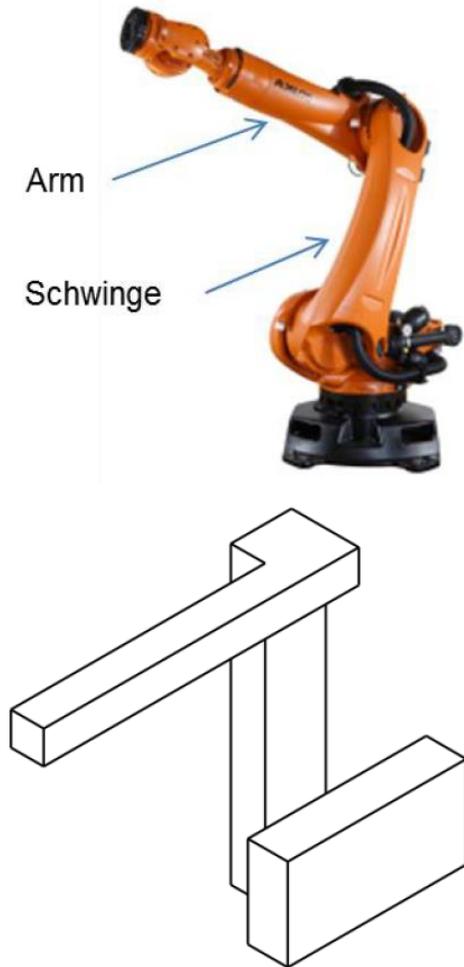
→ Oberflächentemperatur gemessen: 30,8°C

Thermik der Personen

2-Schicht: ca. 50 Personen je Schicht

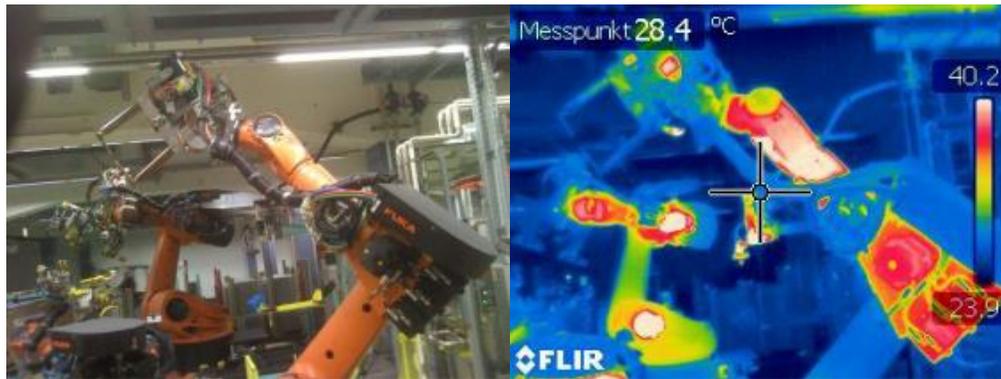
Energieumsatz DIN EN 7730: 116W/Person

Thermikberechnung Industrieroboter KUKA KR 150 R3100 prime

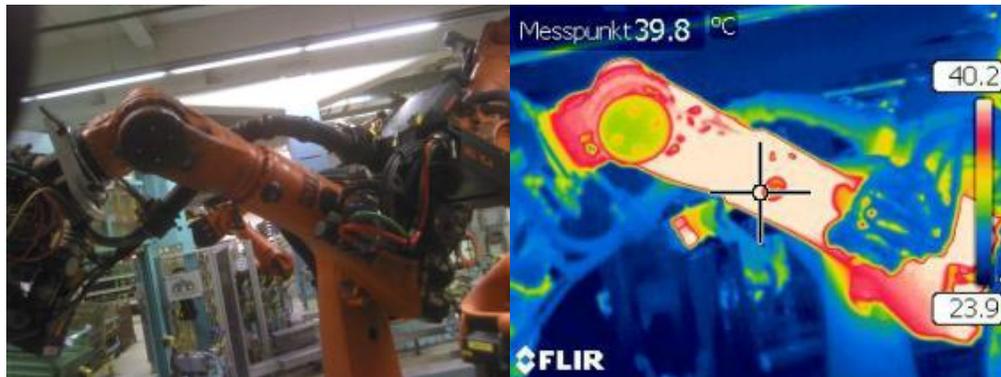


Flächen Nr.	Anzahl	Ausrichtung	Temperatur	Höhe über Boden	Höhe Fläche	Breite Fläche	Abzug	gesamt Fläche
[-]	[Stk.]	[-]	[°C]	[m]	[m]	[m]	[m ²]	[m ²]
I	2	vertikal	25,9	0,00	0,61	0,27		0,32
II	1	vertikal		0,00	0,61	1,19		0,73
III	1	vertikal		0,00	0,61	1,19	0,15	0,58
IV	1	horizontal		0,61	0,27	1,19		0,32
V	2	vertikal		0,19	1,76	0,20		0,70
VI	1	vertikal		0,19	1,76	0,36		0,62
VII	1	vertikal		0,53	1,13	0,36		0,40
VIII	1	horizontal	34,7	1,95	0,21	0,36		0,08
IX	1	vertikal		1,74	0,21	1,82		0,39
X	1	vertikal		1,74	0,21	1,46		0,31
XI	2	vertikal		1,74	0,21	0,21		0,09
XII	1	horizontal		1,95	1,82	0,21		0,39
gesamt:								6,03

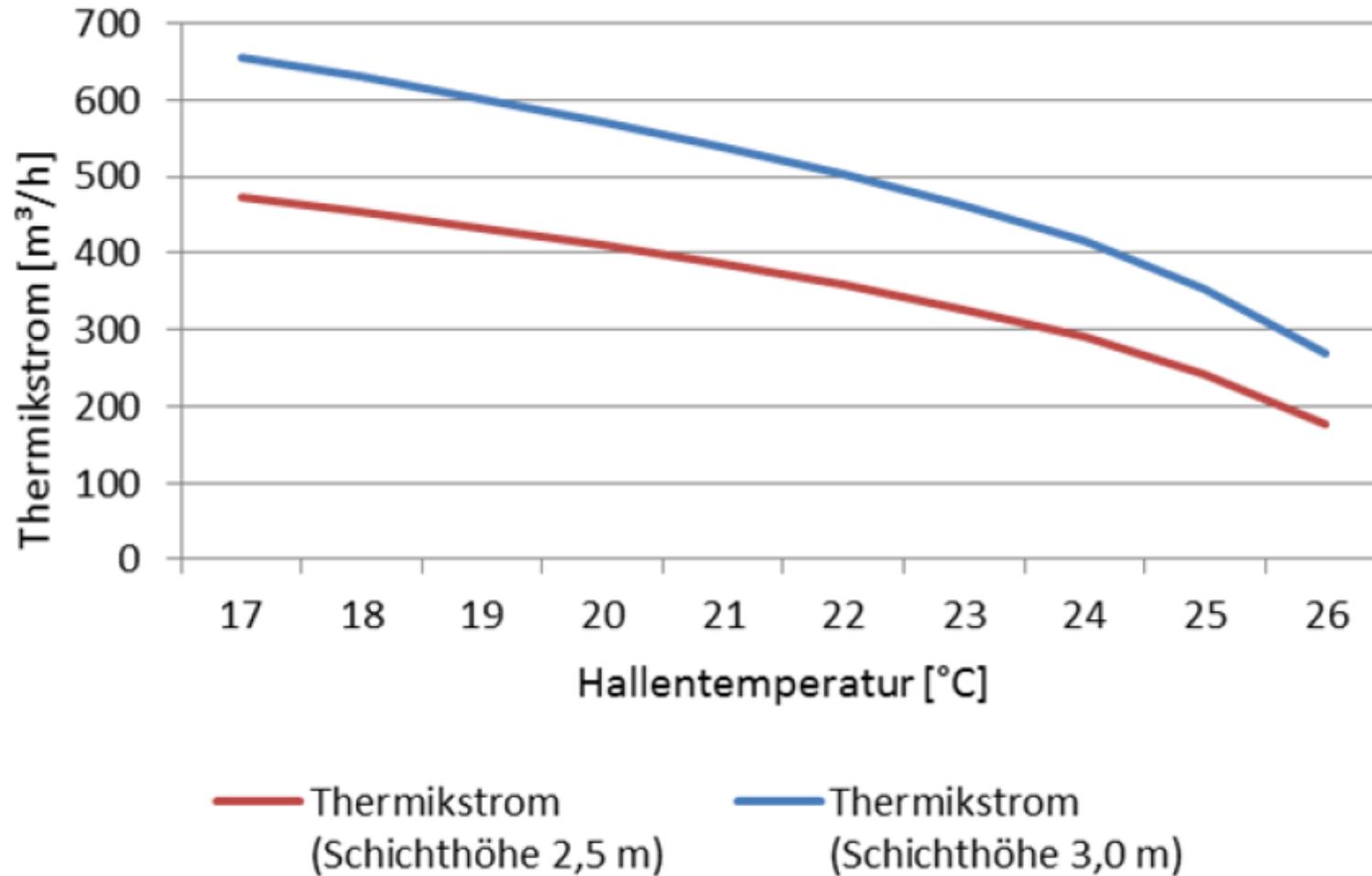
Thermikberechnung Industrieroboter KUKA KR 150 R3100 prime



Temperaturmessung Industrieroboter					
Bezeichnung	Oberflächentemperatur in °C				
Messung der Schwinge					
Heberoboter	25,5	26,3	27,1	26,1	26,8
Schweißroboter	24,5	24,6	26,5	25,0	26,2
Mittelwert:	25,9 °C				
Messung des Arms					
Heberoboter	35,5	37,5	36,8	35,3	36,2
Schweißroboter	35,5	28,5	31,6	32,5	37,6
Mittelwert:	34,7 °C				



Ermittelte Thermikströme des Industrieroboter

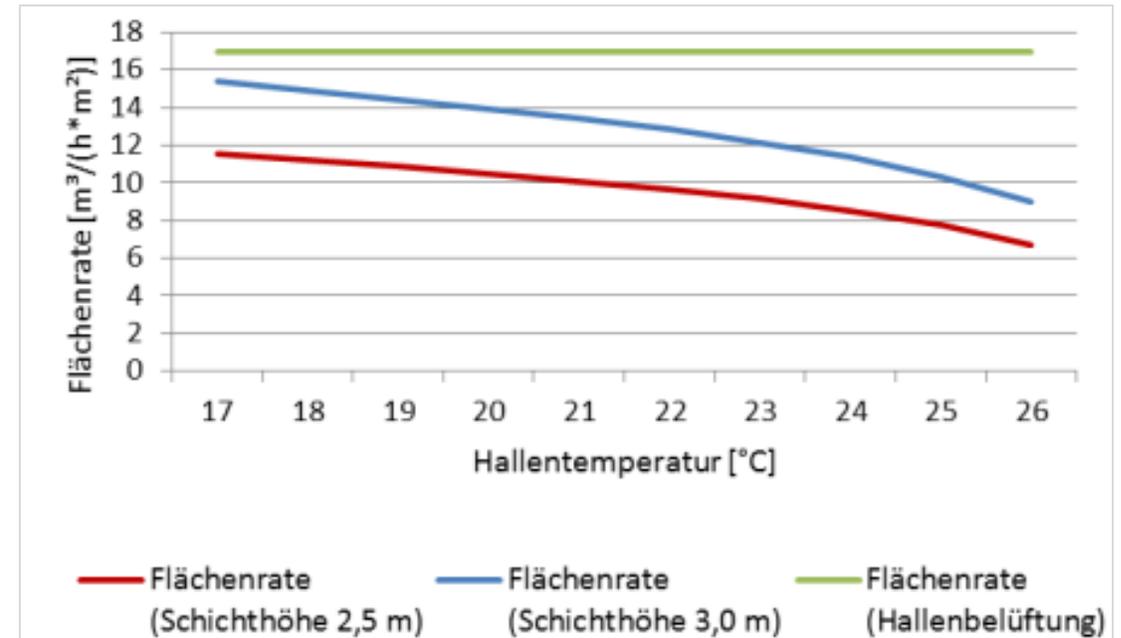
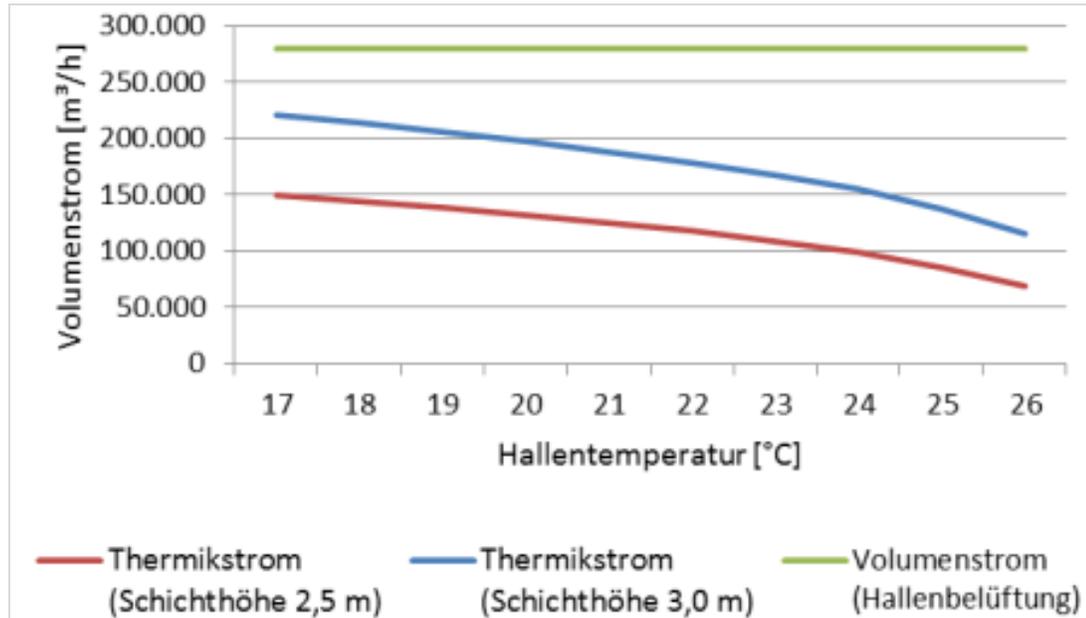


Mittelwert der Anteile am benötigten Luftvolumen in der Karosseriehalle



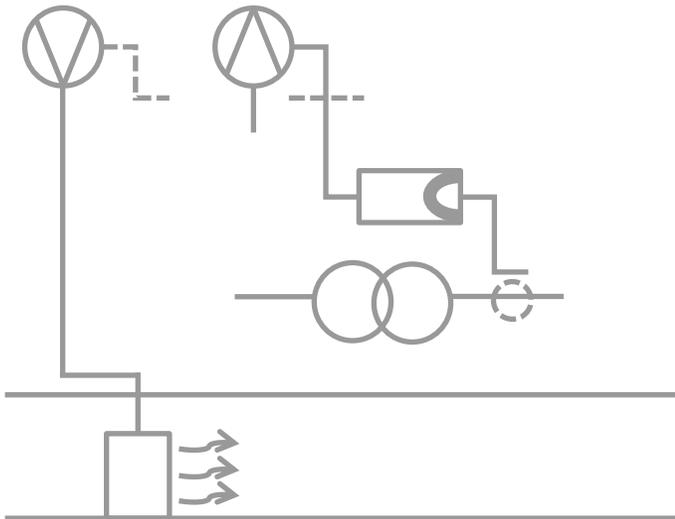
Mittelwert der Anteile am benötigtem Luftvolumen		
	Schichthöhe 2,5 m	Schichthöhe 3,0 m
Industrieroboter	56,0 %	59,6 %
weitere Prozesse	21,1 %	15,8 %
Schweißpunkte	9,2 %	9,9 %
Schaltschränke	8,0 %	7,4 %
Personen	5,8 %	7,3 %

Thermikstrom und Flächenrate für die gesamte Karosseriebauhalle



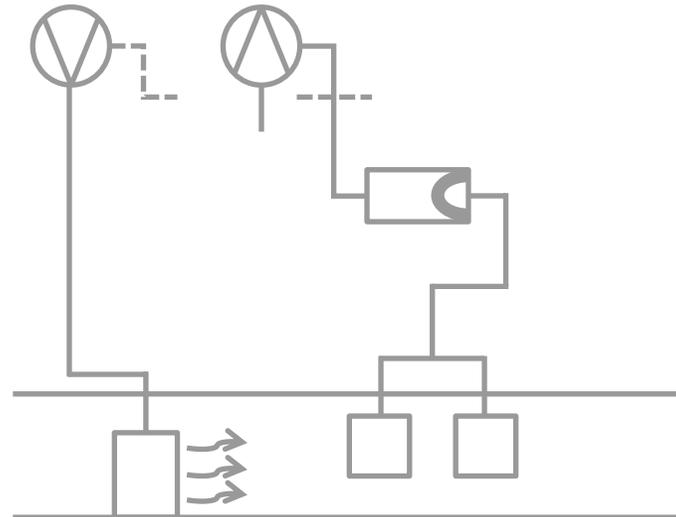
Regelung der „Schichtlüftung“

Überstromentnahme



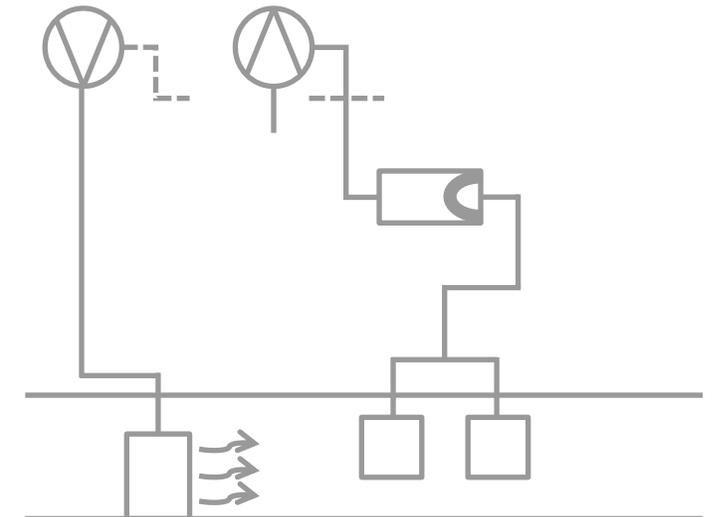
- Stromaufnahme des Trafos messen mit Ansteuerung der Lüftungsanlagen
- erprobt

Stoffkonzentration



- Messung der Partikel mit Feinstaubsonden mit Ansteuern der Lüftungsanlagen
- noch nicht erprobt

Schichthöhenmessung



- Messung der Schichthöhe im Labor erprobt/Patent
- in der Praxis noch nicht umgesetzt

Agenda



■	Motivation	■	Lüftungsprinzipien und Belastungsgrade
■	Wo kommen wir her? Entwicklung der Außenluftrate im Karosseriebau	■	„treibende Kräfte“ der Schichtlüftung
■	Schematische Darstellung Wärme- und Stoffströme	■	Betrachtete Referenzhalle
■	Basics	■	Messung der Schadstoffe
■	Schadstoffe	■	Ermitteln der Thermikströme
■	Erfassungseinrichtungen	■	Zusammenfassung

Zusammenfassung



- Schichtlüftung funktioniert im betrachteten Fall, Luftmenge könnte sogar reduziert werden
- Grenzen der Schichtlüftung werden erreicht
- Regelmäßiges Überprüfen der Grenzbereiche (individuell)
- Entwickeln/ Testen von Regelmodellen angepasste Fahrweise
- Forschungsprojekt anzustreben mit Thema Auslesen – Schadstoffe – Regelung



Erfolg durch Vertrauen

