Planung von energieeffizienten Lüftungssystemen für Industriehallen

Dipl.-Ing. Detlef Makulla

Head of Research & Development
Krantz GmbH, Aachen

Dietmar Rossbruch

Head of Air Distribution Systems,
Krantz GmbH, Aachen

Ausgangslage

Zur Belüftung von industriellen Fertigungsstätten stehen verschiedene Luftführungssysteme zur Verfügung.

Wesentliche Auswahlkriterien sind der Schutz von Personen vor luftfremden Stoffen, die thermischen Verhältnisse in der Arbeitsumgebung und nicht zuletzt der energetische Aufwand.

Durch die Auswahl des richtigen Luftführungssystems ergeben sich bei effizientem Einsatz der Zuluft hohe Verbesserungs- und Einsparpotentiale.

Bei der Planung gilt es zuerst, die zu erwartenden thermischen Lasten und Stofflasten zu ermitteln. Thermische Lasten werden in Industriehallen aus Kostengründen häufig nur mit freier Kühlung durch die Außenluft abgeführt. Bei hohen Außenlufttemperaturen geht die Kühlleistung aber bis auf null zurück. Es kann sogar ein ungewünschter „Sommerheizfall“ auftreten, wenn die Zulufttemperatur höher ist als die Hallenlufttemperatur. Dieser Fall wird später noch näher betrachtet.

Stofflasten treten nicht in allen Industriehallen auf. In der Endmontage, im Versand oder in Lagerbereichen sind in der Regel keine oder sehr geringe Emissionen vorhanden. Anders sieht es in den Bereichen der mechanischen Fertigung unter Einsatz von Kühlschmierstoffen, bei Schweißprozessen oder in Gießereien aus. Obwohl das erste Planungsziel die Erfassung der luftfremden Schadstoffe am Entstehungsort sein sollte, lässt sich in der Regel eine Belastung der Arbeitsbereiche von Personen nicht vollständig vermeiden.

1 Turbulente Mischlüftung über Drallauslass

2 Turbulenzarme Verdrängungslüftung mit thermostatischer Verstellung

Varianten von Luftführungssystemen

Bei Lüftungssystemen für den Industriebereich unterscheidet man zwischen der turbulenten Mischlüftung, der Verdrängungslüftung aus etwa 3 m Höhe und der Verdrängungslüftung vom Boden, auch Schichtlüftung genannt. Alle drei Systeme haben ihre berechtigten Anwendungsfälle.

Die **turbulente Mischlüftung** wird häufig über Radial-, Drallauslässe 1 oder Weitwurfdüsen realisiert. Charakteristische Merkmale der turbulenten Mischlüftung sind Luftaustrittsgeschwindigkeiten von 4 – 6 m/s bei Drallauslässen bzw. von 8 – 12 m/s bei Düsen und eine Montage im Decken- oder oberen Wandbereich. Aufgrund der hohen Induktionswirkung wird im Raum das 20- bis 30-fache Luftvolumen im Verhältnis zum Zuluft-Volumenstrom umgewälzt und dadurch die Temperaturdifferenz zwischen Zu- und Raumluft schnell abgebaut. Dadurch ergeben sich bei der turbulenten Mischlüftung überall im Raum gleichmäßig verteilte Wärme- und Stofflasten. Somit ist der Einsatz der Mischlüftung wenig geeignet in Fällen, bei denen luftfremde Stoffe durch den Produktionsprozess in die Raumluft gelangen.

Eine bessere Möglichkeit für solche Fälle bietet die **Verdrängungslüftung**, bei der die Luftdurchlässe im Bereich zwischen 3 und 4 m Höhe vorzugsweise an den Hallensäulen angeordnet werden 2 + 3.

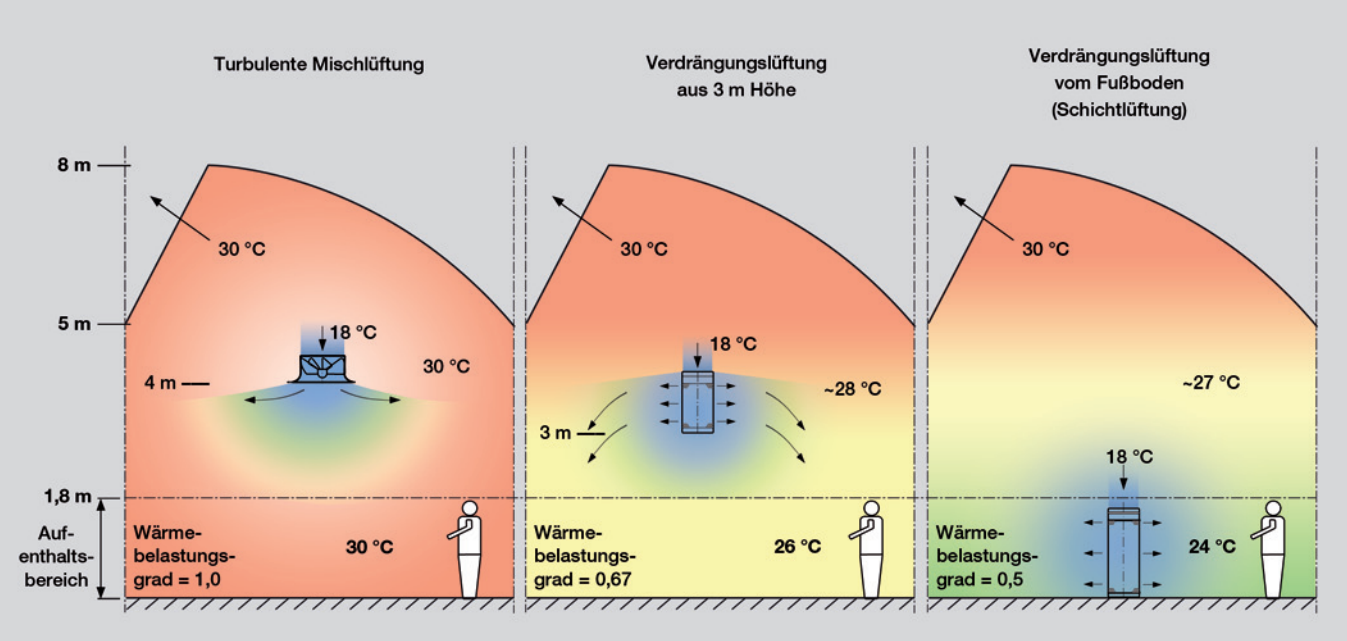
Die Austrittsgeschwindigkeit der Zuluft ist mit 0,6 – 0,9 m/s deutlich geringer als bei der turbulenten Mischlüftung. Demzufolge wird auch weniger Raumluft in die Zuluft induziert. Dadurch ergeben sich im Aufenthaltsbereich geringere Temperaturen und Stoffbelastungsgrade als in höheren Hallenbereichen. Die Nähe des Luftdurchlasses zum Arbeitsbereich gestattet es zudem, manuelle Verstelleinrichtungen an den Säulen zu installieren. Dies erhöht die Akzeptanz bei den Mitarbeitern, da sie die Intensität der Luftbewegung an ihren Arbeitsplätzen selbst beeinflussen können.

Die Schichtlüftung

Bei hohen Wärme- und Stofflasten sollten die Luftdurchlässe auf dem Boden positioniert werden. Hierdurch wird bei geringstmöglichem Zuluft-Volumenstrom die höchste Effizienz erzielt. Diese Schichtlüftung wird erreicht, indem die Zuluft mit geringen Luftgeschwindigkeiten von 0,3 – 0,4 m/s nahe den Arbeitsplätzen zugeführt wird 4. Die Stofflasten werden dadurch in ihrer Ausbreitung nicht behindert und durch den Verdrängungseffekt und den thermischen Auftrieb in die höheren Hallenbereiche befördert, wo sie mit der Abluft abgeführt werden.

3 Turbulenzarme Verdrängungslüftung aus 3 m Höhe

4 Schichtlüftung mit bodenstehenden Luftdurchlässen



5 Wärmebelastungsgrade für die drei Luftführungssysteme im Vergleich

Vergleich der Systeme

Beim Systemvergleich sind zwei wesentliche Parameter zu berücksichtigen. Dies sind zum einen der Wärmebelastungsgrad und zum anderen der Stoffbelastungsgrad. Der Wärmebelastungsgrad μ_W ergibt sich aus folgender Beziehung:

$$\mu_W = \frac{\vartheta_{Ra} - \vartheta_{Zu}}{\vartheta_{Ab} - \vartheta_{Zu}}$$

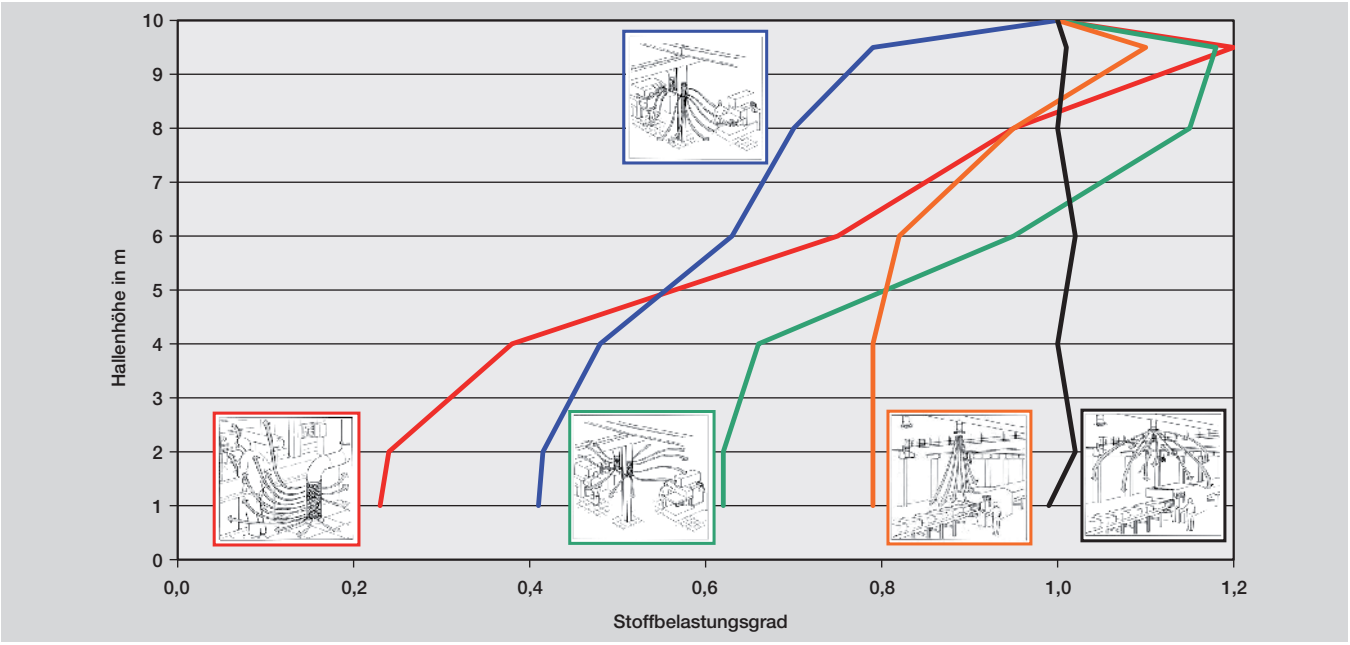
ϑ_{Ra} = Raumlufttemperatur (°C)
ϑ_{Zu} = Zulufttemperatur (°C)
ϑ_{Ab} = Ablufttemperatur (°C)

Dazu zeigt Bild **5** eine Übersicht der Systeme. Die turbulente Mischlüftung weist aufgrund der hohen Induktion in der gesamten Halle und in der Abluft etwa die gleichen Temperaturen auf. Der Wärmebelastungsgrad ergibt sich hier zu 1,0. Bei der Verdrängungslüftung mit den Luftdurchlässen in 3 m Höhe sinkt dieser auf 0,67 und bei der Schichtlüftung mit Luftzufuhr auf Bodenniveau beträgt der Belastungsgrad nur noch 0,5. Bei der Schichtlüftung wird also etwa die Hälfte der freigesetzten Wärme nicht als Temperaturerhöhung im Aufenthaltsbereich wirksam.

Alternativ kann man die drei Luftführungssysteme auch auf Basis der erforderlichen Zuluft-Volumenströme bei gleichen gewünschten Raumtemperaturen im Aufenthaltsbereich vergleichen. Es ergeben sich dann bei einer spezifischen Kühllast von 120 W/m² die in Tabelle 1 aufgeführten Verhältnisse, wenn im Aufenthaltsbereich bei allen Systemen eine Temperatur von 26 °C herrschen soll. Man erkennt, dass im Vergleich zur Mischlüftung der Zuluft-Volumenstrom bei der Verdrängungslüftung um 30 % und bei der Schichtlüftung sogar um 50 % verringert werden kann.

System	Zuluft-temperatur	Temperatur im Aufent-haltsbereich	Wärme-belastungs-grad	Abluft-temperatur	Zuluft-Volumen-strom
	°C	°C	–	°C	$m^3/(h \cdot m^{2)}$
Turbulente Mischlüftung	18	26	1,0	26	44,6
Verdrängungs-lüftung	18	26	0,67	30	29,8
Schichtlüftung	18	26	0,5	34	22,3

Tabelle 1
Erforderlicher spezifischer Zuluft-Volumenstrom im Systemvergleich



6 Die lokalen Stoffbelastungsgrade der drei Luftführungssysteme im Vergleich

Vergleich der Systeme

Das zweite wichtige Kriterium ist der lokale Stoffbelastungsgrad, der wie folgt definiert ist:

$$\mu_S = \frac{c_{Ra}}{c_{Ab}}$$

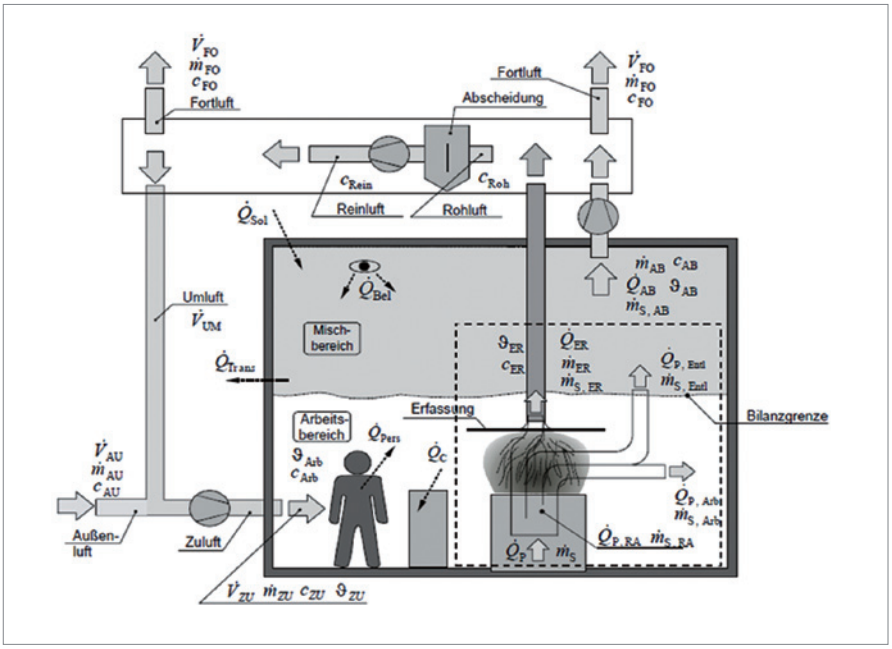
c_{Ra} = Stoffkonzentration im Aufenthaltsbereich

c_{Ab} = Stoffkonzentration in der Abluft

Bei der turbulenten Mischlüftung stellt sich aufgrund der hohen Induktionswirkung überall im Raum ein Stoffbelastungsgrad von etwa 1 ein. Die Systeme der Verdrängungslüftung und der Schichtlüftung sind hier wesentlich effektiver **6**.

Generell steigt bei diesen Systemen der Stoffbelastungsgrad von unten (Boden) nach oben (Hallendecke) an. Die Abluft wird dabei immer unterhalb der Hallendecke abgesaugt. Die Verdrängungslüftung aus ca. 3 m Höhe erreicht je nach Einstellung der Luftdurchlässe im Aufenthaltsbereich einen Wert von 0,4 bis 0,6. Bei der Schichtlüftung mit bodenstehenden Luftdurchlässen können Werte von etwa 0,25 erzielt werden.

Dies bedeutet, dass die gleiche Luftqualität im Aufenthaltsbereich von Personen mit nur einem Viertel des Außenluft-Volumenstroms gegenüber der turbulenten Mischlüftung erreicht werden kann. Zwei weitere Aspekte, die in den nächsten Kapiteln behandelt werden, sind hierbei jedoch nicht außer Acht zu lassen.



7 Volumen- und Stoffströme in Industriehallen mit Absaugeinrichtungen

Luftbilanz zwischen Zuluft- und Abluft-Volumenstrom

Ein wesentliches Planungsziel ist die Erfassung und Absaugung von luftfremden Stoffen bereits an der Entstehungsstelle. Dies ist insbesondere beim Einsatz von Kühlschmierstoffen bei der Bearbeitung von Werkstücken bzw. bei Freisetzen von Schweißrauch der Fall. Die nachströmende Luft kommt hier in der Regel aus dem Aufenthaltsbereich der Halle. Die Summe der dezentralen Absaugungen kann durchaus das Volumen der Zuluft erreichen und durch nachträglich installierte Absaugungen sogar höher sein. In der Halle ergibt sich dann ein Unterdruck, sodass unkontrolliert Außenluft oder Luft aus anderen angeschlossenen Hallen einströmt.

Ein zu hoher Anteil der dezentralen Maschinenabluft im unteren Hallenbereich an der Gesamtabluft führt dazu, dass nicht genügend Abluft unter der Hallendecke abgesaugt wird. Dadurch treten Rückströmungen von schadstoffbelasteter Hallenluft aus den oberen Bereichen in den Aufenthaltsbereich auf. Es sollte daher darauf geachtet werden, dass mindestens 50 % der Zuluft als Abluft im oberen Höhenbereich der Halle entnommen werden.

Leider stehen bei der Planung einer Halle oft die genaue Maschinenausstattung und die entsprechenden dezentralen Maschinenabsaugungen noch nicht fest. Um für diesen Fall und auch bei späteren Änderungen keine Probleme der beschriebenen Art zu bekommen, empfiehlt es sich, die RLT-Anlage in der Luftleistung mit einer Reserve auszustatten. Da heute der Einsatz von drehzahlgeregelten Ventilatoren Stand der Technik ist, kann im späteren Betrieb die Anlage an den lokalen Bedarf angepasst betrieben werden.

8 Schichtlüftung im Kühlfall

9 Schichtlüftung im Heizfall

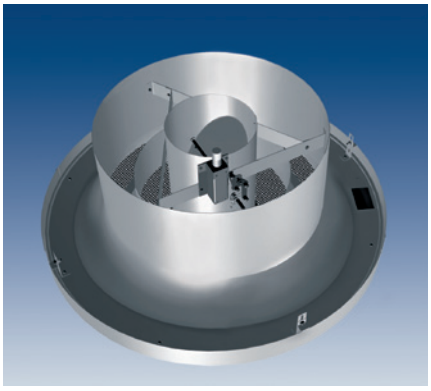
Anpassung an den thermischen Lastfall

Die Anpassung an den thermischen Lastfall, also an den Heiz- oder Kühlbedarf, kann auf verschiedene Weise erfolgen. Von den Komponentenherstellern werden hierzu unterschiedliche Mechanismen im Luftdurchlass eingebaut. Im Kühlfall geht es darum, die Zuluft bei möglichst geringer Raumluftgeschwindigkeit in die Arbeitsbereiche zu leiten 8. Der Heizfall benötigt dazu einen stärkeren, gegen den Auftrieb gerichteten Impuls der warmen Luft nach unten 9.

Die Verstellung des Luftdurchlasses in Abhängigkeit von Heiz- oder Kühlbetrieb kann manuell oder automatisch erfolgen. Bei der manuellen Verstellung, z. B. mit einem Verstellhebel 10, obliegt es dem im Einflussbereich des jeweiligen Luftdurchlasses tätigen Mitarbeiter, die Einstellung zu verändern. Dies erhöht sicherlich die Akzeptanz bei den Mitarbeitern. Jedoch ist aus Sicht des optimalen Energieeinsatzes, insbesondere wenn ein Heizfall vorliegt, die automatische Verstellung empfehlenswerter.

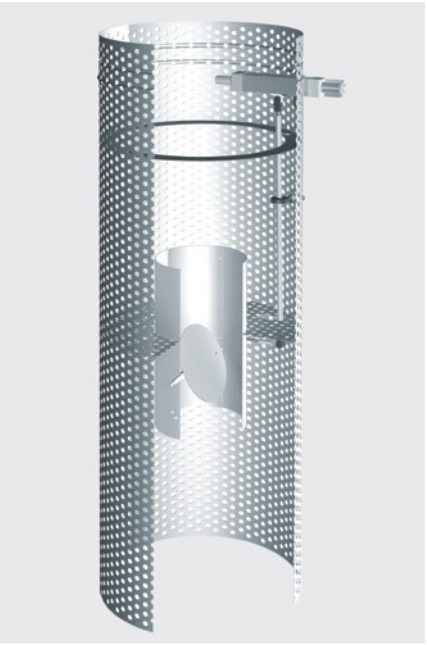
Die automatische Verstellung kann mit einem elektrischen Stellantrieb oder mit einem thermischen Antrieb erfolgen. Der Vorteil bei der Verstellung mit einem thermischen Antrieb ist, dass dieser keine elektrischen Zuleitungen und Regler benötigt. Er bezieht die Antriebsenergie direkt aus der Zuluft, wobei eine spezielle, auf den geforderten Temperaturbereich angepasste Wachsmischung den Kolbenhub für den Verstellmechanismus liefert. Dabei kann entweder nur die Zulufttemperatur 11 oder auch die Zu- und die Raumlufttemperatur (Pfeil in 2 Seite 2) als echte Temperaturdifferenzsteuerung eingesetzt werden. Letzteres hat Vorteile, wenn die Raumlufttemperatur in einem größeren Temperaturbereich schwanken kann, insbesondere wenn keine mechanische Kälteanlage vorhanden ist.

10 Manuell verstellbarer Luftdurchlass für Schichtlüftung



11 Thermostatische Verstellung Beispiel: Radialer Verdrängungsauslass

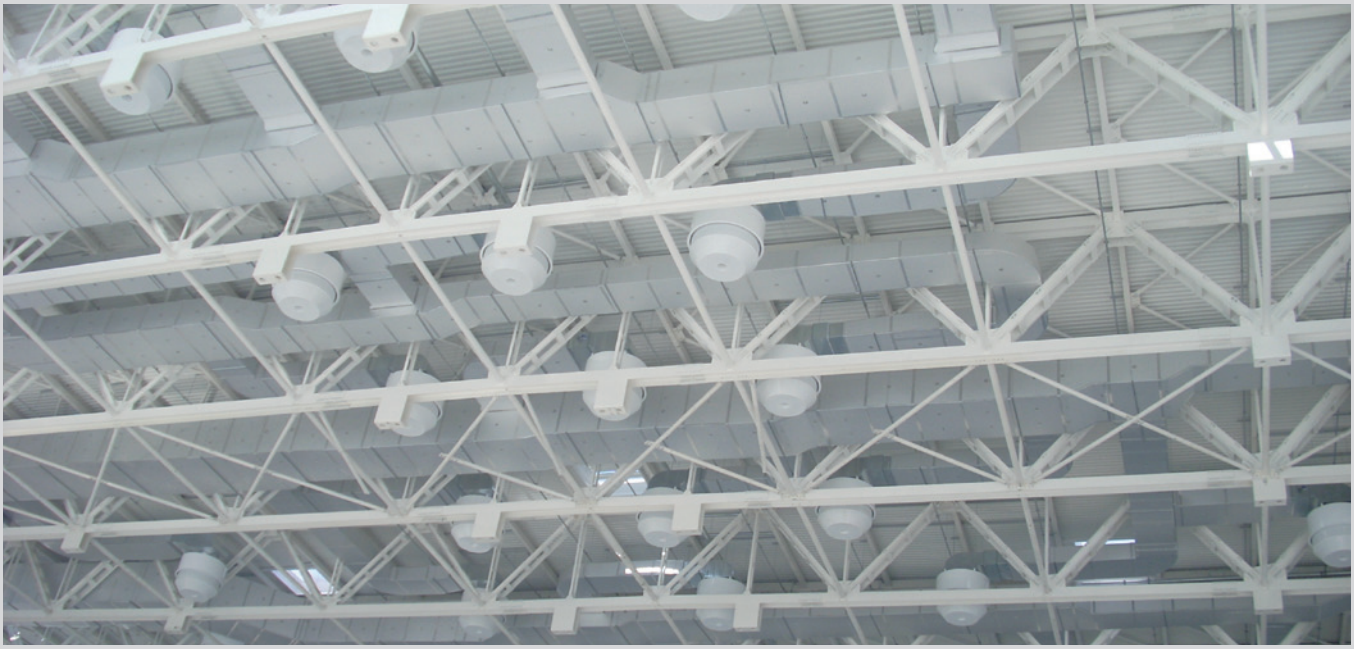
12 Nicht verstellbarer Textilluftdurchlass im Heizfall



13 Schematische Darstellung eines thermostatisch auf Basis der Temperaturdifferenz verstellbaren Schichtluftdurchlasses

Anpassung an den thermischen Lastfall

Manchmal werden bei der Schichtlüftung die Luftdurchlässe nicht verstellbar ausgeführt. Dieses ist aber nur dann möglich, wenn durch eine Kälteversorgung sichergestellt werden kann, dass die Zulufttemperatur immer unterhalb der Raumlufttemperatur liegt. Ferner muss sicher sein, dass kein Heizfall auftritt. Da diese Konstellation recht selten ist, sollten insbesondere Schichtlüftungssysteme mit einer Verstellung der Luftausblascharakteristik versehen werden. Diese Systeme reagieren sehr nachteilig, wenn bei einer Zulufttemperatur über der Raumlufttemperatur keine Verstärkung des Zuluftimpulses nach unten stattfindet. Aufgrund der geringen Luftaustrittsgeschwindigkeit würde die wärmere Zuluft direkt zur Hallendecke aufsteigen und von der Abluft erfasst werden. Der Vorteil des geringen Stoffbelastungsgrades wäre ins Negative umgeschlagen. Wenn keine Kälteanlage zur Luftkühlung vorhanden ist, kann auch im Sommer eine Zulufttemperatur oberhalb der Raumlufttemperatur auftreten. Dies ist der Fall, wenn z. B. durch eine Nachtauskühlung mit Außenluft die Halle am Vormittag noch recht kühl ist und die Außenlufttemperatur schnell ansteigt. Dazu addiert sich die Ventilatorwärme mit ca. 2 K in der Zuluft. Auch hier würde die thermische Verstellung dafür sorgen, dass die Zuluft verstärkt in den Aufenthaltsbereich gerichtet zugeführt wird und nicht vorzeitig nach oben steigt.



14 Kegelförmige Verdrängungsauslässe in einer Flugzeug-Lackierhalle

Zusammenfassung

Bei der Planung von Lüftungssystemen für Industriehallen ist bei der Systemauswahl in erster Linie die Belastung durch Wärme und luftfremde Stoffe zu betrachten. Ferner muss die ausgeglichene Bilanz zwischen Zu- und Abluft insbesondere bei dezentralen Abluftabsaugungen sichergestellt sein. Die Anpassung der Zuluftströmung an die unterschiedlichen thermischen Lastfälle kann wirtschaftlich mit thermischen Antrieben erfolgen, die keine externe Hilfsenergie benötigen. Durch die Projektierung des für den jeweiligen Anwendungsfall geeignetsten Lüftungssystems lassen sich die Arbeitsplätze effektiv und energiesparend mit der erforderlichen Außenluft versorgen.

Dipl.-Ing. Detlef Makulla 27.03.2014

Krantz GmbH
Uersfeld 24, 52072 Aachen Tel.:
+49 241 441-1
Fax: +49 241 441-555
info@krantz.de
www.krantz.de