

VERDRÄNGUNGSLÜFTUNG ZUR ENERGIEEINSPARUNG



Dipl.-Ing. (FH) Hans-Joachim Socher
VDI, München

Bei der Klimatisierung von Räumen werden im Prinzip zwei Raumluft-Strömungsarten unterschieden:

1. die turbulente Mischströmung (Verdünnungsprinzip) in unterschiedlichen Ausführungsformen und
2. die turbulenzarme Verdrängungsströmung (laminar flow).

Das zweite, aus der Reinraumtechnik bekannte, Verfahren weist bestimmte Vorteile gegenüber der üblichen Mischströmung hinsichtlich des Belüftungswirkungsgrades auf und beeinflusst daher auch den Energiebedarf einer Klima-(Lüftungs-)Anlage.

Einleitung

Die Klagen über Klimaanlage aus dem Kreis der Nutzer werden größer. Untersucht man die Klagen der Betroffenen, so beziehen sie sich überwiegend auf:

- zu hohe oder zu niedere Raumtemperatur,
- unzureichende Luftfeuchte,
- Zugerscheinungen,
- hohe Energiekosten,
- unangenehmen Geräuschpegel.

Die letzten drei Beschwerden findet man immer dort, wo eine Klimaanlage in erster Linie die Aufgabe hat, produktionstechnische Einrichtungen zu schützen, Überschuwärme abzuführen oder MAK-Werte einzuhalten. Hier wird bereits bei der Planung dem Menschen und seinem Wohlbefinden zu wenig Augenmerk geschenkt. Vor allem bei der Auswahl der Luftführung im Raum werden immer wieder Fehler begangen. Doch gerade die Luftführung im Raum entscheidet wesentlich über das physiologische Empfinden des Menschen und dem energetischen Verbrauch der Anlage.

Die Gliederung zeigt die Einteilung in verschiedene Raumströmungsformen,

Verdünnungsströmung (Mischströmung)

Die Verdünnungsströmung ist die am meisten angewandte Luftführung in der Lüftungs- und Klimatechnik. Die in den Raum eingeführte Luft wird mit hoher Luftgeschwindigkeit und häufig auch hoher Temperaturdifferenz zur Raumluft (positiver oder negativer) eingeblasen. Durch die der Zuluft mitgegebenen dynamischen Einblasenergie vermischt sie sich mit der vorhandenen Raumluft. Bei der idealen Mischströmung geschieht die Vermischung mit der Raumluft so vollkommen, daß an jeder

Stelle des Raumes gleiche Zustände herrschen. Die Temperaturdifferenz der Zuluft zur Raumluft wird abgebaut und ein möglichst gleichmäßiges Temperaturniveau im ganzen Raum erreicht, so daß im Idealfall die Raumlufttemperatur gleich der Ablufttemperatur ist. Durch diesen Energieaustausch werden die thermischen Raumlasten abgebaut. Es ist verständlich, daß die Betrachtung der vollständigen Vermischung bei der Verdünnungsströmung nicht nur auf das Angleichen der Temperatur zutrifft. Alle

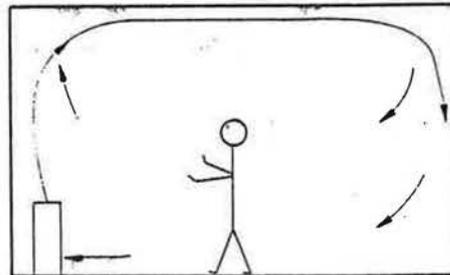
im Raum entstehenden Luftbelastungen in Form von Staubteilchen, Gasen und Keimen unterliegen der gleichen Vermischung mit der eingeführten, möglichst unbelasteten Zuluft.

Innerhalb der Verdünnungsströmung unterscheidet man noch in zwei Luftführungssysteme:

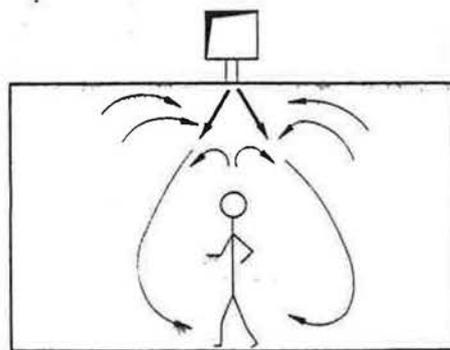
- die tangentielle und
- die diffuse Luftströmung.

Unter einem tangentialen Luftführungssystem versteht man die Anlehnung des Zuluftstromes unmittelbar nach seinem Austritt aus der Zuluftöffnung an Wände, Fensterflächen und Decke. Diese Luftführung trifft man immer bei Induktionsgeräten an (Bild 1).

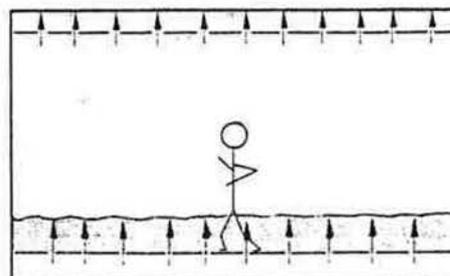
Bei der diffusen Luftführung wird die Zuluft unmittelbar in den Aufenthaltsbereich über Strahl- und Drallauslässe geführt. Durch hohe Induktionswirkung wird eine schnelle, frühzeitige Vermischung mit der Raumluft angestrebt (Bild 1).



1 Tangentiales Luftführungssystem



2 Diffuse Luftführung



3 Verdrängungsströmung von unten nach oben

Verdrängungsströmung

Unter Verdrängungsströmung ist eine plan- und flächenmäßige Luftführung, vergleichbar mit dem Kolbenprinzip, zu verstehen. Die einströmende Luft schiebt die gesamte Raumluft mit allen Verunreinigungen und der im Raum freigeordneten thermischen Belastung in Richtung des Abluftsystems vor sich her. Bei der idealen Verdrängungsströmung findet keine Vermischung der Zuluft mit der Raumluft statt (Bild 3).

Da kaum thermische Unterschiede und großflächig eine gleichmäßige Luftgeschwindigkeit auftritt, wird Zugerscheinung vermieden. Dadurch sind Luftgeschwindigkeiten bis zu 0,5 m/s erlaubt. Als Luftführungsrichtungen sind möglich:

- horizontal,
- von oben nach unten,
- von unten nach oben.

Bevorzugt wird, da energetisch vorteilhaft, die Luftführung von unten nach oben. Entscheiden muß jedoch immer der individuelle Fall, wie aus den Anwendungsbeispielen ersichtlich wird.

Verdrängungsluftdurchlässe

In der Praxis werden unterschiedliche Methoden zur Erzeugung einer Verdrängungsströmung ausprobiert und angewendet.

Der Einsatz von einem oder mehreren hintereinander angeordneten Lochblechen bringt häufig nicht den erwünschten Erfolg der über die gesamte Fläche gleichmäßigen Abströmung der Zuluft. Durch die alleinige Anordnung



von Lochblechen gelingt es meistens nicht, die tangential zu den Löchern anströmende Luft richtungs- und mengenmäßig in eine homogene und laminare Luftströmung zu wandeln. Geräuschbildung und turbulente Rückströmungen sind die Regel.

Gute Erfolge werden durch Filter- oder Gewebeluftauslässe erreicht. Als Luftausblaselement dient dünn-schichtiges Filtermaterial oder mehrschichtiges Gewebematerial. Je nach Anordnung im Raum wird zum mechanischen Schutz ein Lochblech oder Drahtgeflecht nachgeordnet.

Filter und Gewebeluftauslässe erzeugen eine homogene, laminare Luftströmung, sind leicht an vorgegebene örtliche Verhältnisse anzupassen und lassen sich mit integrierter Beleuchtung bei Deckenanordnung ausrüsten. Nachteilig wirkt sich der allmählich ansteigende Druckverlust durch Verschmutzung der Filterfläche und die labile Ausführung bei Montage im Wandbereich aus.

Eine interessante, neuartige Konstruktion stellt der Luftschirm dar (Bild 4).

Die tangential zur Luftaustrittsrichtung einströmende Luft wird durch eine schräge, mit Schalldämmmaterial verklebete Fläche gleichmäßig in einen schmalen Korridor hinter ein Luftverteilblech geleitet. Das Luftverteilblech ist mit geometrisch angeordneten Düsen mit angeformten Schöpfzungen versehen (Bild 5). Jede dieser Düsen »schöpft« aus dem vorbeiströmenden Luftstrom den gleichen Volumenstrom und teilt so den Gesamtluftstrom in eine Vielzahl von identischen Teilluftströmungen auf. Wenn die Teilluftströmungen anschließend an der perforierten Frontwand des Luftauslasses ankommen, an der ein weiterer erheblicher Teil der kinetischen Energie vernichtet wird, ergibt sich eine laminare Endströmung mit geringer Austrittsgeschwindigkeit. Der Luftschirm ist geeignet für hohe Volumenströme. Sein Druckverlust ist gering und bleibt über die gesamte Betriebszeit konstant. Edeldahlstahlausführungen und Luftschirme zum leichten Öffnen, erlauben auch den Einsatz in Laboratorien, der pharmazeutischen Industrie und in Großküchen.

Energieeinsparung durch Verdrängungslüftung; Abführen von Wärmelasten

Bei der Abführung von Wärmelasten hat sich in der Praxis die Luftführung von unten nach oben als besonders geeignet erwiesen. Hierbei wird die Luft über einen Doppelboden (Rechenzentren) oder über bodennahe Wandluft-

auslässe in den Raum eingeführt. Die kühlere und spezifisch schwerere Zuluft füllt den Raum, ähnlich wie eine Flüssigkeit von unten her auf. Die warme und spezifisch leichtere Luft folgt ihrer Tendenz nach oben, wo sie durch das Abluftgitter abgesaugt wird. Die Wärmelast wird erst am Ort der Entstehung von der Zuluft aufgenommen. Dadurch wird die

Temperatur der Abluft größer sein als die mittlere Raumlufttemperatur in der Aufenthaltszone (Bild 6). Die Wärmelast von Lichtquellen wird am geeignetsten direkt am Entstehungsort durch Abluftleuchten erfaßt.

Bereits bei der Auslegung der Klimaanlage kann dieser Vorteil der Luftführung von unten nach oben durch Reduktionsfaktoren μ_R in der Kühllastberechnung nach VDI 2078 berücksichtigt werden.

$$\mu_R = \frac{t_R - t_{ZU}}{t_{AB} - t_{ZU}}$$

Es bedeuten:

- t_R = mittlere Raumlufttemperatur
- t_{ZU} = Temperatur der Zuluft
- t_{AB} = Temperatur der Abluft

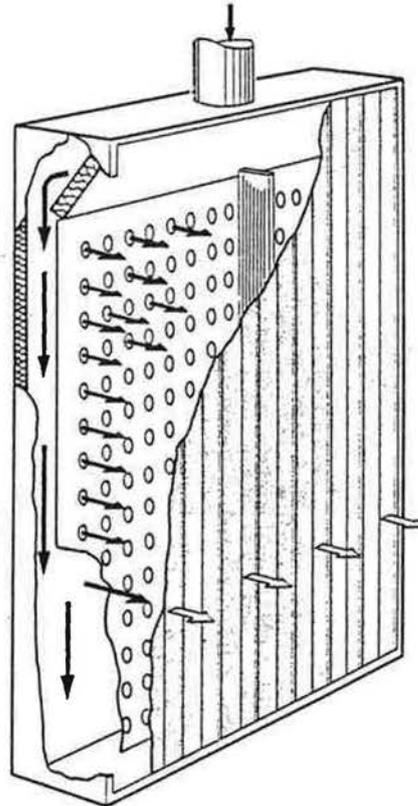
In der Praxis lassen sich beim Einsatz der Verdrängungslüftung mit einer Luftführung von unten nach oben Reduktionsfaktoren $\mu_R = 0,65 - 0,85$ erreichen (1). Sämtliche im Raum anfallende Wärmelasten wie äußere Lasten, Personen-, Maschinen- und Beleuchtungslasten werden um diesen Faktor reduziert. Im Gegensatz dazu ist der Reduktionsfaktor beim reinen Verdünnungsprinzip $\mu_R = 1$.

Die Folge aus dem Vorteil der Verdrängungslüftung von unten nach oben ist somit eine Reduzierung des zur Abfuhr der Wärmelast notwendigen Volumenstromes. Hieraus resultieren wiederum niedrigere Anlagen- und Betriebskosten.

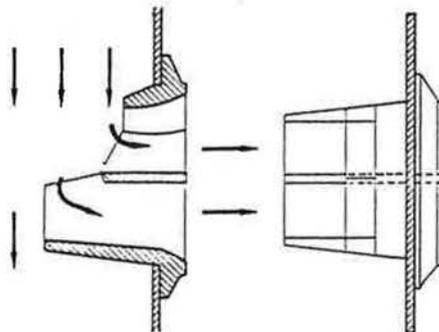
Noch deutlicher wird die Energieeinsparung durch Verdrängungslüftung bei der sogenannten Arbeitsplatzkühlung (-belüftung). Durch die niedrige Austrittsgeschwindigkeit und geringe Vermischung der Zuluft mit der Raumluft kann der Luftauslaß unmittelbar an einem Arbeitsplatz mit hohem Wärmefall montiert werden. Die Wärmelast wird an der Entstehungsstelle erfaßt und aus dem Aufenthaltsbereich transportiert. Es muß folglich nicht ein Vielfaches an Luftvolumen, z. B. in einer Werkshalle, gekühlt werden, um nur an ein paar Arbeitsplätzen einwandfreie Bedingungen zu schaffen. Auch hierbei ist wieder die Luftführung von unten nach oben bevorzugt anzuwenden, da mit einer Untertemperatur zur Raumtemperatur bis ca. 10 K eingeblasen werden kann. Wird die Luftstromrichtung nach unten gewählt, sollte die Zuluft mit ca. -4 K zur Raumtemperatur aufgrund des Beschleunigungseffektes einströmen.

Abführen von Stofflasten

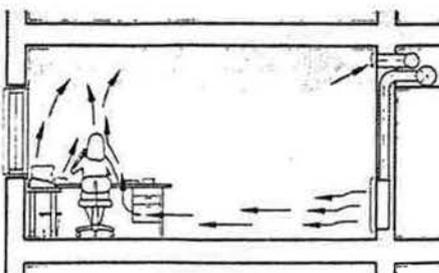
Außer Wärmelasten muß ein Luftsystem auch im Raum entstehende Stofflasten abführen. Es gilt Stäube, Gase und



4 Funktion eines Luftschirmes



5 Düsen mit Schöpfzungen



6 Verdrängungslüftung. Abführen von Wärmelasten



Keime aus der Atmungszone zu entfernen und die MAK-Werte (Maximale Arbeitskonzentration gesundheitsschädlicher Stoffe) einzuhalten.

Der Wirkungsgrad eines Belüftungssystems läßt sich berechnen:

Wenn die Konzentration der Luftverschmutzung am Arbeitsplatz (c_w) der durchschnittlichen Konzentration im Raum (c_A) entspricht, beträgt der Belüftungswirkungsgrad (η) 100%.

Die durchschnittliche Stofflast (c_A) im Raum kann berechnet werden, wenn die stündlich anfallende Belastungsmenge (Q_E) und die Zuluftmenge (V) bekannt sind:

$$c_A = \frac{Q_E}{V}$$

Falls eine Arbeitsplatzabsaugung vorhanden ist, muß die Belastungsmenge (Q_E) mit dem zusätzlichen Wirkungsgrad (d) mit dem Benutzungsgrad (B) multipliziert werden:

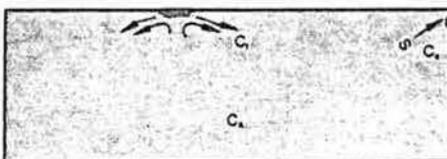
$$c_A = \frac{Q_E \times d \times B}{V}$$

Es bedeuten:

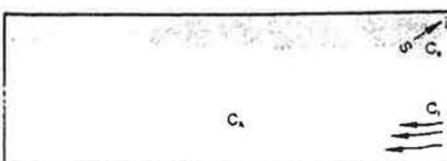
- c_w = Stoffbelastung am Arbeitsplatz
- c_A = durchschnittliche Stoffbelastung des Raumes
- η = Belüftungswirkungsgrad
- Q_E = stündlich anfallende Belastungsmenge
- V = Volumenstrom
- d = Wirkungsgrad der Absaugung
- B = Benutzungsgrad.

Wenn die Stoffbelastung am Arbeitsplatz der durchschnittlichen Belastung im Raum entspricht, dann ist der Belüftungswirkungsgrad $\eta = 100\%$ und man spricht von einer Gesamtverdünnung.

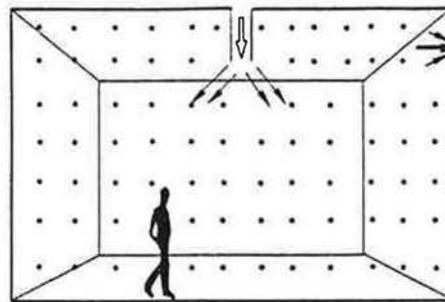
Bei der Mischströmung wird dem Raum eine ausreichende Menge Frischluft zugeführt, um die Gesamtbelastung auf ein vertretbares Maß zu verdünnen. Bei der Tangentialströmung wird die Außenluft zuerst den Fenster- oder Wandbereich durchströmen, um anschließend aus der schadstoffreichen Deckenzone



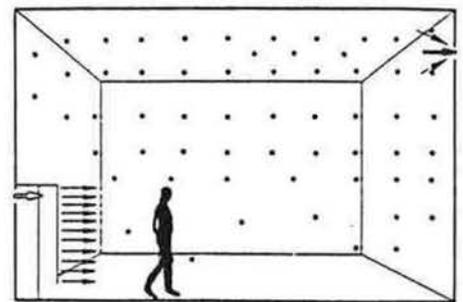
7a Mischströmung (Verdünnungsprinzip)



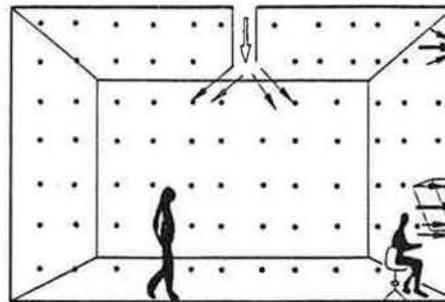
7b Verdrängungsprinzip



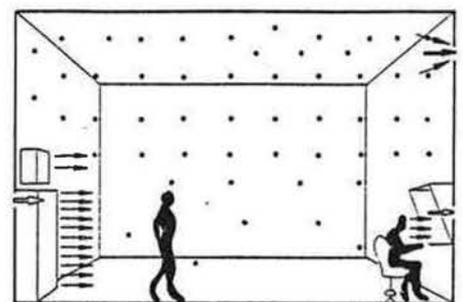
gute Vermischung $\eta = 100\%$



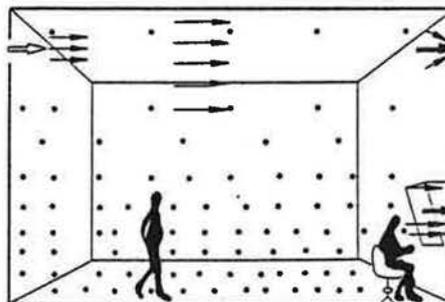
$\eta = 200\%$



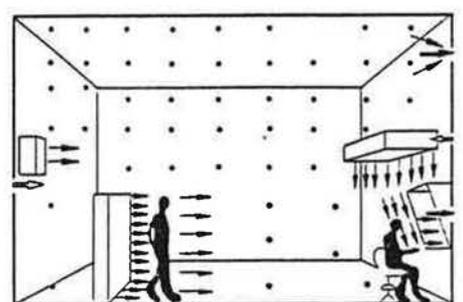
gute Vermischung



$\eta = 200-300\%$



schlechte Vermischung $\eta < 100\%$



Arbeitsplatzbelüftung $\eta = 200-1000\%$

Ⓐ

Ⓑ

8 Schadstoffkonzentration; a) Verdünnungslüftung, b) Verdrängungslüftung

in den Aufenthaltsbereich zu gelangen (Bild 1). Die Durchmischung mit der belasteten Luft ist danach abgeschlossen. Es ist eine entsprechend große Luftmenge erforderlich, um nach der Verdünnung eine durchschnittliche Stoffbelastung innerhalb der zulässigen MAK-Werte zu erreichen.

Anders verhält es sich bei der Verdrängungslüftung (Bild 7, Gegenüberstellung Verdünnungsprinzip/Verdrängungsprinzip). Die Zuluft wird bodennah laminar in die Aufenthaltszone geführt. Dabei soll die Zulufttemperatur geringfügig unter der Raumlufttemperatur sein, um der konvektiven Tendenz entgegenzuwirken. Außerdem wird durch die Unterschiede der spezifischen Gewichte ein Vermischen der kühleren Zuluft mit der verunreinigten, wärmeren Raumluft weitgehend vermieden. Die belastete Raumluft wird nach oben streben, wo sie abgesaugt werden kann, während sich in der Aufenthaltszone eine Schicht von 2 bis 3 m Höhe mit unbelasteter Luft bildet. Beim Verdrän-

gungssystem wird somit die Zuluft wirkungsvoller genutzt als bei der Mischströmung. Der erwähnte Belüftungswirkungsgrad beträgt normalerweise 200 bis 1000% (Bild 8). Dadurch kann häufig der Zuluftvolumenstrom im Vergleich zur Verdünnungslüftung halbiert werden.

Hohe Gebäudekomplexe, wie z. B. Schweißhallen und Gießereien, eignen sich besonders gut für die Anwendung des Verdrängungssystems, da das Reservoir für die belastete Luft oberhalb der Aufenthaltszone häufig ein mehrfaches zum Volumen der Aufenthaltszone darstellt.

Damit das System zufriedenstellend arbeitet, ist eine niedrige Raumluftaustrittsgeschwindigkeit (ca. 0,25 m/s) und ein laminarer Luftstrom notwendig, der sich über die vorgesehene Fläche in eine Schichthöhe von mind. 2 m ausbreitet. Die Schichthöhe wird über die Zuluftmenge bestimmt (Bild 9). Sollen nur einzelne Zonen innerhalb einer Werkshalle mit Frischluft beschickt werden, so ist es



notwendig, diese durch Stellwände zu begrenzen, um ein »Abfließen« der Zuluft zu vermeiden. Man denke dabei immer an das Beispiel, daß sich die kühlere Zuluft ähnlich wie eine Flüssigkeit verhält und den Raum von unten her »aufüllt«.

Die Beheizung muß bei der Verdrängungslüftung vom Luftsystem getrennt werden (Bilder 10 und 11). Hierzu bieten sich bekannte Systeme wie Strahlungsheizung oder Umluftdeckenheizgeräte an.

Anwendungsbeispiel

In einer Druckerei, 58 m lang, 21,5 m breit, 9,5 m hoch, wurden 2 Druckmaschinen mit je ca. 50 m Länge aufgestellt (Bild 12). Die installierte Klimaanlage hatte die Aufgaben

- Abführen von Wärmelasten
- Abführen von Stofflasten.

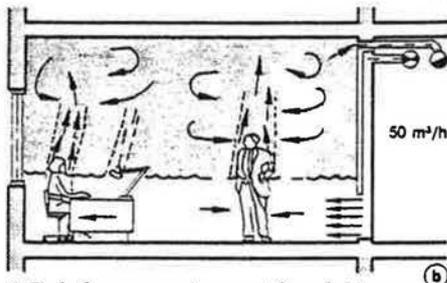
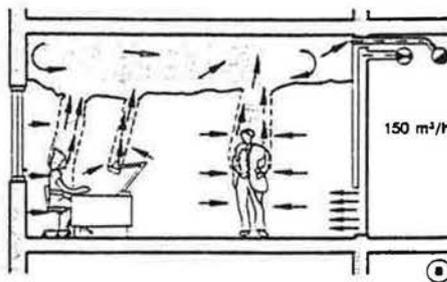
Es galt in erster Linie den zulässigen MAK-Wert für Toluol im Aufenthaltsbereich einzuhalten und dafür ein geeignetes Luftführungsprinzip zu finden.

Als Nachweis für die Eignung des entsprechenden Belüftungsprinzips wurden

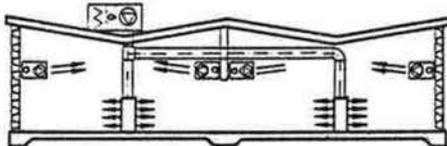
- Messungen und Kontrollen der Funktion der Hallenbelüftung und der Luftbewegung in der Halle durchgeführt;
- Die Toluol-Konzentration in der Druckereihalle mit einem direkt anzeigenden Fotoionisationsgerät und über die Anreicherung von Aktivkohle nachgewiesen.

Erster Schritt: Es wurde eine Verdünnungslüftung (Bild 13) installiert. Hierbei wurden Luftauslässe mit hoher Austrittsgeschwindigkeit eingesetzt, so, wie sie heute am meisten verbreitet sind. Die Zuluft wurde zwischen die beiden Druckmaschinen in ca. 4 bis 5 m Höhe ausgeblasen. Bei Stillstand der Maschinen wurde die Luft oberhalb, während des Betriebes direkt an den Druckmaschinen abgesaugt. Die Messungen ergaben eine hohe, gleichmäßig verteilte Toluol-Konzentration in der ganzen Halle und somit auch im Aufenthaltsbereich. Eine Erhöhung des Zuluftvolumenstromes hatte Zegerscheinungen zur Folge.

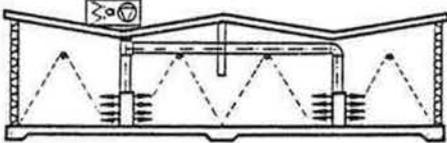
Zweiter Schritt: Die Luftführung sollte durch Abschotten der Druckmaschinen verbessert werden (Bild 14). Hierzu wurde eine Glaswand vor jede Druckmaschine, 2,5 m über dem Fußboden beginnend, bis zur Hallendecke hinauf montiert. Dadurch sollte verhindert werden, daß Toluol in die Mitte der Halle, die überwiegend als Aufenthaltszone gilt, gelangt und sich mit der Zuluft vermischt. Die Toluol-Konzentration in der Arbeitszone konnte durch diese



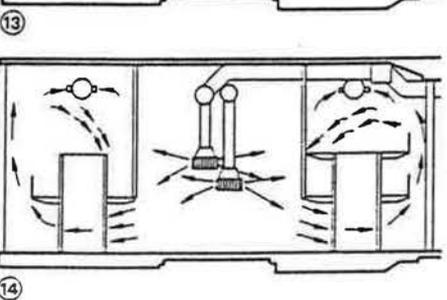
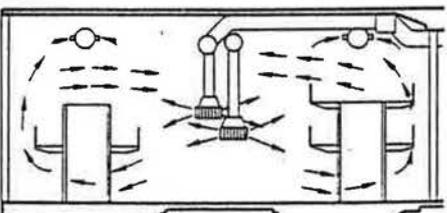
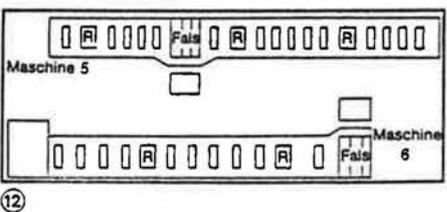
9 Zuluftmenge; a) ausreichend, b) zu gering



10 Verdrängungslüftung, Beheizung durch Umluft-Deckenheizgeräte

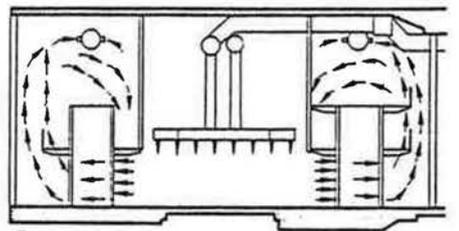


11 Verdrängungslüftung, Beheizung durch Strahlungsdecke

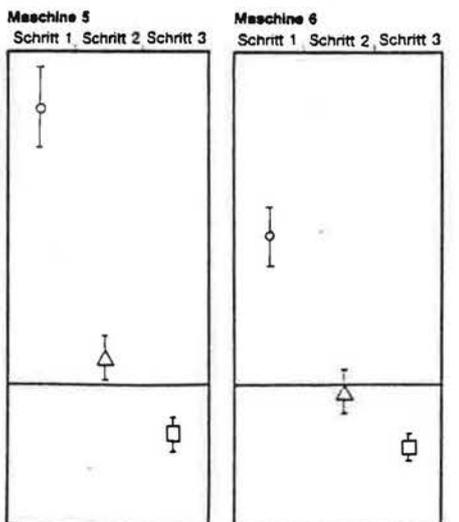


Maßnahme erheblich herabgesetzt werden, überstieg jedoch noch die erwünschten Werte.

Dritter Schritt: Es wurde eine Luftführung nach dem Verdrängungsprinzip gewählt. Die Luftauslässe mit hoher Luftaustrittsgeschwindigkeit wurden ersetzt durch Auslässe mit geringem laminaren Luftaustritt über eine große Fläche. Es wurden Luftschirme mit den Abmessungen 6 x 1,2 m und einer Austrittsgeschwindigkeit von 0,25 m/s eingesetzt (Bild 15). Aufgrund der niedrigen Austrittsgeschwindigkeit konnten die Luftauslässe tiefer installiert werden. Sie mußten jedoch, um die Gabelstapler in der Halle nicht zu behindern, auf mind. 3,8 m Höhe montiert werden.



Durch die Luftschirme wurde ein Vermischen verunreinigter Luft durch Induktion in die Zone reiner Luft vermieden. Bei gleichem Volumenstrom konnte durch die Wahl der Verdrängungslüftung die Toluol-Konzentration zu jeder Zeit weit unter dem erwünschten Wert gehalten werden (Bild 16). Das Beispiel zeigt deutlich, daß durch die Wahl der geeigneten Raumluftströmung sowohl das Wohlbefinden des Menschen gesteigert, als auch Energie eingespart werden kann.



16 Meßergebnisse

Literatur
[1] Brockmeyer, H.: Raumströmung und ihr Einfluß auf die Wirtschaftlichkeit der Klimatisierung