

# VERDRÄNGUNGSSTRÖMUNG

Diese Aufgabe soll die Zuluft ohne unangenehme Nebenwirkungen, wie Zugerscheinungen oder hohe Geräusche, erfüllen.

Die Wirkung der eingebrachten Zuluft hängt im wesentlichen von dem Ort der Einbringung und dem Turbulenzgrad der Luftstrahlen ab.

Nach dem Ort der Einbringung teilt man die Luftführungssysteme in:

- Deckenluftauslässe,
- Wandauslässe,
- Bodenauslässe und
- Tischauslässe ein.

Die wichtigsten physikalischen Kriterien für die richtige Platzierung der Luftauslässe sind:

- Wärmelast im Raum,
- Schadstoffentstehung.

Für hohe spezifische Wärmelasten ( $\geq 150 \text{ W/m}^2$ ) ist es auf jeden Fall effektiver [1], die Zuluft aus dem Boden oder der Bodennähe auszublasen und die verbrauchte Raumluft oberhalb des Aufenthaltsbereiches abzusaugen. Die starke thermische Kraft, die stets von unten nach oben wirkt, unterstützt dabei die Luftströmung. Für geringere Wärmelasten kann die Zuluft durch Decken- oder Wandauslässe eingeblasen werden.

Sind Schadstoffe schwerer als die Luft – und darunter gehören alle festförmigen Schadstoffe (Stäube) – so ist die Zuluft oberhalb des Aufenthaltsbereiches einzublasen und die Raumluft in Bodennähe abzusaugen.

In Räumen mit Schadstoffen, die leichter als die Luft sind, ist die Zuluft in Bodennähe auszublasen und die Raumluft oberhalb des Aufenthaltsbereiches abzusaugen.

Nach dem Turbulenzgrad unterscheidet man zwischen turbulenten und turbulenzarmen Luftstrahlen. Turbulente Luftstrahlen haben eine höhere In-

Dr. Franz Sodec, Aachen

Mit der Zuluft, die über die RLT-Anlage in den Raum eingeblasen wird, sollen die Raumluftkonditionen in behaglichen Grenzen eingehalten werden. Darunter sind vor allem eine ausreichende Frischluftzufuhr, eine geeignete Raumtemperatur und eventuell ein gewünschter Bereich der Raumluftfeuchte zu verstehen. Darüber hinaus sollen Schadstoffe, die im Raum entstehen, effektiv abgeführt werden. Dieser letztere Aspekt ist vor allem in Industrieanlagen von Bedeutung.

duktionswirkung und vermischen sich stärker mit der Raumluft. Sie erzeugen eine Mischlüftung mit dem Verdünnungseffekt. Die turbulenzarmen Luftstrahlen haben eine geringere Induktionswirkung und mischen sich weniger mit der Raumluft. Die verbrauchte Raumluft wird mehr verdrängt als vermischt. Man spricht von einer Verdrängungsströmung (Bild 1).

## Charakteristik der Verdrängungsströmung

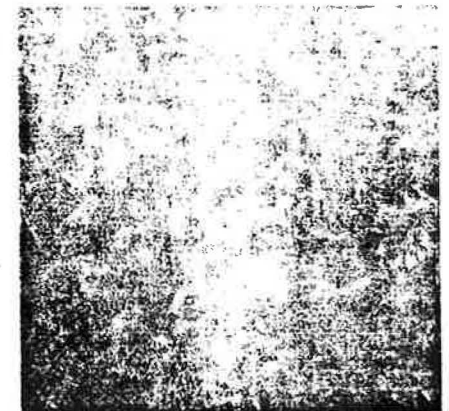
Für die Erzeugung der Verdrängungsströmung sind drei Voraussetzungen zu erfüllen:

- niedrige Austrittsgeschwindigkeit,
- geringe Turbulenz der Zuluftstrahlen.

- Bündel vieler benachbarter dünner Zuluftstrahlen.

Diese Voraussetzungen werden meistens dadurch erfüllt, daß als Luftaustrittsfläche Lochblech oder Sieb benutzt werden. Je kleiner der Lochdurchmesser für einen einzelnen Strahl ist, und je geringer der Abstand zwischen den Strahlen ist, desto turbulenzärmer ist das Strahlbündel [2]. Die Einzelstrahlen des Bündels können nur wenig die Raumluft beimischen, außer am Rand des Gesamtbündels (Bild 2). Vielmehr induzieren sich die Einzelstrahlen gegenseitig. Der wesentliche Anteil der Strahlgeschwindigkeit wird durch die Diffusorwirkung und nicht durch den Energieaustausch mit der Umgebung abgebaut. Die Raumluft wird vom Zuluft-Strahlbündel verdrängt.

Bild 3 verdeutlicht die Reduzierung der Strahlerturbulenz mit geringerem Lochdurchmesser [3]. Die Luftströmung aus dem feinmaschigen Gewebe ist beinahe laminar.



Luftströmung unter einem Lochblech ( $d = 1,2 \text{ mm}$ ,  $t = 2,4 \text{ mm}$ )

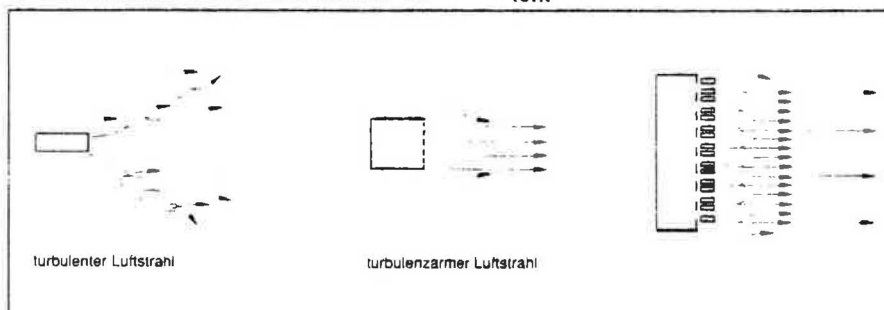


Bild 1 und 2: Links Luftstrahlen unterschiedlicher Turbulenzgrade, rechts: Strömung aus einer Lochblechfläche

Luftströmung aus einem Gewebe (Maschenweite  $70 \mu\text{m}$ )

Bild 3: Einfluß des Lochdurchmessers auf die Strahlcharakteristik

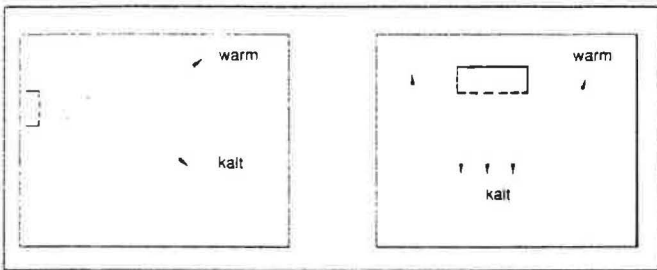


Bild 4: Einfluß der Temperaturdifferenz auf den Strahlverlauf

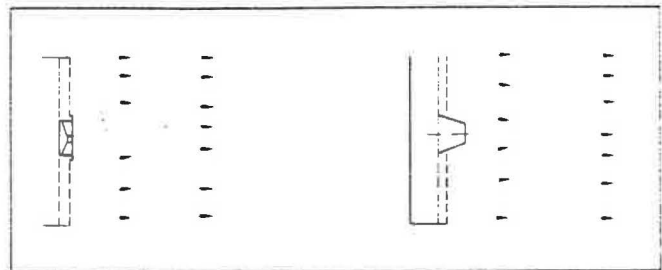


Bild 5: Stützstrahlen zur Erhöhung der Stabilität

Wegen der Verstopfungsgefahr kann man nicht beliebig kleine Lochdurchmesser wählen, und es haben sich folgende Ausführungen in der Praxis bewährt:

- Verdrängungsströmung in Produktionsstätten (außer Reinraumtechnik):  
Lochdurchmesser 5 – 10 mm
- Verdrängungsströmung in Komfortanlagen:  
Lochdurchmesser 2 – 5 mm
- Verdrängungsströmung in der Reinraumtechnik:  
Lochdurchmesser < 2 mm.

Die Luftaustrittsgeschwindigkeiten werden relativ niedrig gewählt, da der Geschwindigkeitsabbau wegen der geringen Induktion der Raumluft nur langsam vor sich geht. Es gelten folgende Orientierungswerte:

- in Produktionsstätten (außer Reinraumtechnik): 0,4 – 1 m/s
- in Komfortanlagen: 0,1 – 0,2 m/s
- in der Reinraumtechnik: 0,2 – 0,5 m/s.

Zur Erzeugung einer Verdrängungsströmung wählt man also Luftstrahlen mit niedrigem Impuls und mit geringer Induktion. Solche Luftstrahlen neigen jedoch zur Instabilität, und deren Ausblasrichtung reagiert empfindlich auf die Temperaturdifferenz zwischen Raum- und Zuluft. Nach Bild 4 werden die Luftstrahlen, wenn sie wärmer als die Raumluft sind, nach oben umgelenkt; wenn sie kälter als die Raumluft sind, tendieren sie frühzeitig nach unten abzufallen.

Diese Tendenz zur Instabilität läßt sich durch den Einsatz von Stützstrahlen vermindern. Zu diesen Zwecke können in die großflächige Ausblasfläche Düsen oder Drallauslässe mit höherem Impuls eingebaut werden. Einige prinzipielle Beispiele zeigt Bild 5. Die Stützstrahlen induzieren die benachbarten Zuluftstrahlen aus dem Lochblech und erhöhen sowohl die Stabilität der Luftstrahlen als auch deren Eindringtiefe.

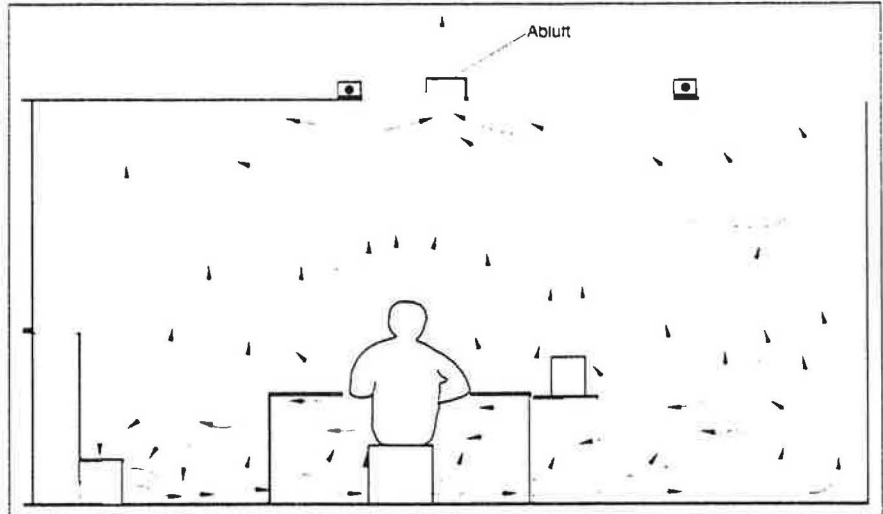


Bild 6: Quelllüftung

Sind die Verdrängungsauslässe nahe am Arbeitsplatz aufgestellt, könnten Stützstrahlen mit deren höherer Luftgeschwindigkeit störend auf die Behaglichkeit wirken. Solche Beispiele sind Verdrängungsauslässe im Komfortbereich oder Luftauslässe in OP-Räumen. In diesen Fällen ist dafür zu sorgen, daß die Luftströmung ohne Stützstrahlen stabil bleibt. Das erreicht man dadurch, daß die Zuluft stets etwas kühler als die Raumluft ist (1 – 3 K); ansonsten würde sie nutzlos zur Decke entweichen.

### Verdrängungsströmung in Komforträumen

Die Verdrängungsströmung in Komforträumen bezeichnet man auch als Quelllüftung [5, 6] und sie wird momentan in der Bundesrepublik Deutschland viel diskutiert. Überwiegend sind dabei Brüstungsauslässe im Gespräch, bei denen die Zuluft turbulenzarm mit Ausblasgeschwindigkeiten  $\leq 0,20$  m/s dem Raum zugeführt wird. Die Charakteristik der Raumluftströmung zeigen die Bilder 6 und 7 [4].

Gleich nach dem Austritt aus dem Quellauslaß legt sich der Luftstrahl, weil er kälter ist als die Raumluft und

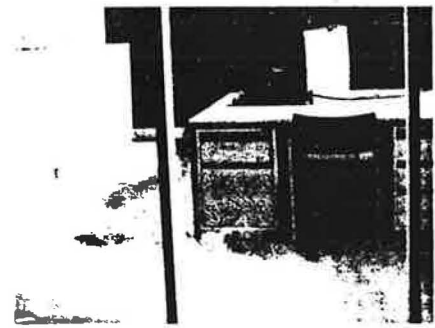


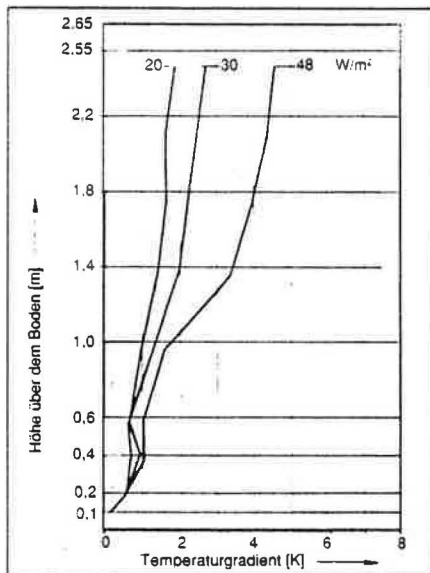
Bild 7: Strahlausbreitung bei der Quelllüftung

mit wenig Impuls behaftet ist, auf dem Boden und strömt in einer dünnen Grenzschicht von einigen Zentimetern Dicke bis zur gegenüberliegenden Wand. An den Wärmequellen, wie Personen, Maschinen und an den geometrischen Hindernissen, wie Tischbeine, Wände, Personen steigt die Luft nach oben und entweicht zur Decke, wo sie abgesaugt wird. Es treten auch Rückströmungen auf, vor allem im unteren Bereich des Raumes (am intensivsten im ersten Meter Raumhöhe). Diese Rückströmung ist hauptsächlich auf die zwar geringe, aber noch immer vorhandene Induktion der austretenden Luftstrahlen zurückzuführen.



Der Vorteil der Quelllüftung ist unbestritten eine höhere Lüftungseffektivität, d. h. eine wirksamere Abfuhr der luftfremden Stoffe aus dem Aufenthaltsbereich zur Decke, wo sie abgesaugt werden [5].

Die Nachteile bzw. die Grenzen des Systems stellen die Einschränkungen hinsichtlich



**Bild 8: vertikaler Temperaturverlauf bei der Quelllüftung**

- der abführbaren Raumkühlleistung und
- der Regelungsmöglichkeiten für die Raumtemperatur

dar. Die aus Behaglichkeitsgesichtspunkten maximal abführbare spezifische Raumkühlleistung liegt bei ca. 40 W/m<sup>2</sup>. Bei höherer Kühlleistung treten nach Bild 8 vertikale Temperaturunterschiede im Aufenthaltsbereich von über 3 K auf [4].

Die Zulufttemperatur ist in engen Grenzen zu halten: Die Zuluft soll kälter als die Raumluft sein, um eine genügende Wurfweite der über dem Boden verlaufenden Luftströmung zu erreichen. Bei zu kühler Luft wäre jedoch die Temperatur über dem Boden unbehaglich.

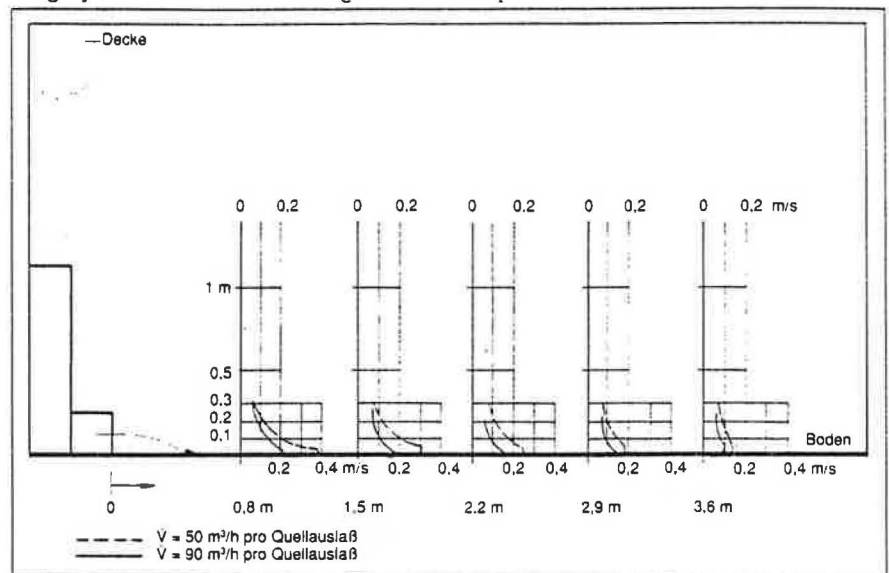
Für die Praxis bedeutet dies, daß die Zulufttemperatur 1–3 K unter der Raumlufttemperatur liegen sollte, d. h. in einem sehr engen Bereich, was die Raumtemperaturregelung erschwert.

Der Luftvolumenstrom muß sorgfältig ausgelegt werden, um zu hohe Luftgeschwindigkeiten in den ersten 4–6 cm über dem Boden in der Ausblashöhe zu verhindern [4, 6]. Den typischen Verlauf der Geschwindigkeitsverteilung im Raum zeigt Bild 9.

Werden die Grenzen der Quelllüftung eingehalten, so ist sie eine durchaus denkbare Luftführungsart in Komfortbereichen. Inwieweit sich die Akzeptanz in der Praxis durchsetzen wird, müssen noch die Erfahrungen in der Zukunft zeigen. Es läßt sich nämlich mit dem turbulenten, diffusen Luftführungssystem in Komfortanlagen bei

drängungsauslasses in Produktionsstätten deutlich größer und liegt in der Größenordnung von 2 000–10 000 m<sup>3</sup>/h.

Die Luftauslässe werden entweder auf dem Boden aufgestellt oder oberhalb des Aufenthaltsbereiches in 3–4 m Ausblashöhe (Bild 10). Größere Ausblashöhen sind zu meiden, da die impuls- und induktionsarmen Luftstrah-



**Bild 9: Geschwindigkeitsverteilung bei der Quelllüftung**

richtiger Auslegung der Luftauslässe eine sehr hohe Behaglichkeit und damit eine hohe Zufriedenheitsrate bei noch höheren spezifischen Raumkühlleistungen erzielen.

Als eine interessante Erweiterung der Einsatzgrenzen der Quelllüftung bietet sich die Kombination der Quelllüftung mit einer Kühldecke an. Hier übernehmen die mit Wasser durchströmten Kühlelemente in der Decke die Kühlleistung, und die Quelllüftung dient lediglich der Frischluftzufuhr [7].

## Verdrängungsströmung in Produktionsstätten

In Produktionsstätten ist die Verdrängungsströmung zweifellos überall dort vorzuziehen, wo beim Prozeß Schadstoffe entstehen, die zur Belästigung des Personals oder zur Störung der Produktion führen würden. Solche Produktionsstätten sind z. B. Gießereien, Preßwerke, Spinnereien, Lackierhallen, Wäschereien.

Während im Komfortbereich pro Luftauslaß Luftvolumenströme von ca. 50–200 m<sup>3</sup>/h ausgeblasen werden, ist der Luftvolumenstrom eines Ver-

drängungsströmungsauslasses in Produktionsstätten deutlich größer und liegt in der Größenordnung von 2 000–10 000 m<sup>3</sup>/h.

Die Aufstellung über den Fußboden wird dann bevorzugt, wenn entweder hohe spezifische Wärmelasten (> 150 W/m<sup>2</sup>) abzuführen sind, oder leichte Schadstoffe freigesetzt werden. Die Strömungsrichtung unterstützt hier den thermischen Auftrieb bzw. sie verstärkt die Abfuhr leichter Schadstoffe hin zu den Abluftkanälen.

Beispiel einer solchen Anordnung in einer Gießerei zeigt Bild 11. Es muß hier ein gewisser Mindestabstand zwischen dem Luftauslaß und dem festen Arbeitsplatz eingehalten werden, da die Ausblasgeschwindigkeiten zwischen 0,4 und 0,8 m/s ausgelegt werden. Durch die radiale Ausbreitung der Luftstrahlen nimmt jedoch die Strömungsrichtung mit der Entfernung rapide ab, so daß Abstände zwischen 1–2 m zum nächsten Arbeitsplatz durchaus ausreichen.

In Räumen mit geringen spezifischen Wärmelasten, oder dort, wo schwere Schadstoffe anfallen, werden die Luftauslässe vorzugsweise oberhalb des Aufenthaltsbereiches angeordnet. Hier ist es sinnvoll, die Strahlrichtung verstellbar zu gestalten, vor allem dann,



wenn mit der Zuluft auch geheizt werden muß. Im Kühlfall wird die Zuluft mehr oder weniger waagrecht ausgeblasen, im Heizfall schräg oder steil nach unten. Diese unterschiedlichen Strahlrichtungen zeigen die Bilder 12 und 13. Die Verstellung kann manuell oder mit Stellmotor erfolgen. Die nach unten gerichtete Luftströmung eignet sich nicht nur bei Heizlasten, sondern auch, um vor Arbeitsbeginn in Pausen den Aufenthaltsbereich verstärkt mit frischer Luft zu durchspülen. Verdrängungsauslässe in einer Halle der mechanischen Fertigung zeigt Bild 14. Es werden Ausblasgeschwindigkeiten zwischen 0,4 und 1 m/s gewählt.

Ein wichtiger Einsatzbereich der Verdrängungsströmung sind Textilbetriebe, vor allem Spinnereien. Durch die steigende Produktionsleistung in den letzten Jahren hat sich der Staubabfall erhöht. Dies führt sowohl zu Störungen an den Spinnmaschinen als auch zum Unbehaglichkeitsempfinden des Bedienungspersonals. Hier haben sich Luftauslässe bewährt, die die Zuluft aus 3 - 4 m Höhe turbulenzarm mit Verdrängungseffekt gleichmäßig von waagrecht bis senkrecht nach unten ausblasen. Der Fasenstaub wird zu den Abluftkanälen unter den Maschinen hin abgedrängt, wo er abgesaugt wird. Die Charakteristik der Raumluftrömung zeigt Bild 15, einen Luftauslaß für diesen Einsatz Bild 16.

Besonders hohe Anforderungen werden an Luftauslässe gestellt, die eine Verdrängungsströmung in Flugzeug-Lackierhallen erzeugen sollen. Hier wird die Zuluft aus 20 - 26 m Höhe ausgeblasen. Die Schadstoffe, wie Lösungsmitteldämpfe, Lackaerosole, Schleifreste u. ä. sollen nach unten bis zum Boden verdrängt werden, ohne daß sie sich wesentlich mit der Zuluft vermischen. Am Boden werden sie durch die hier vorhandenen Abluftöffnungen

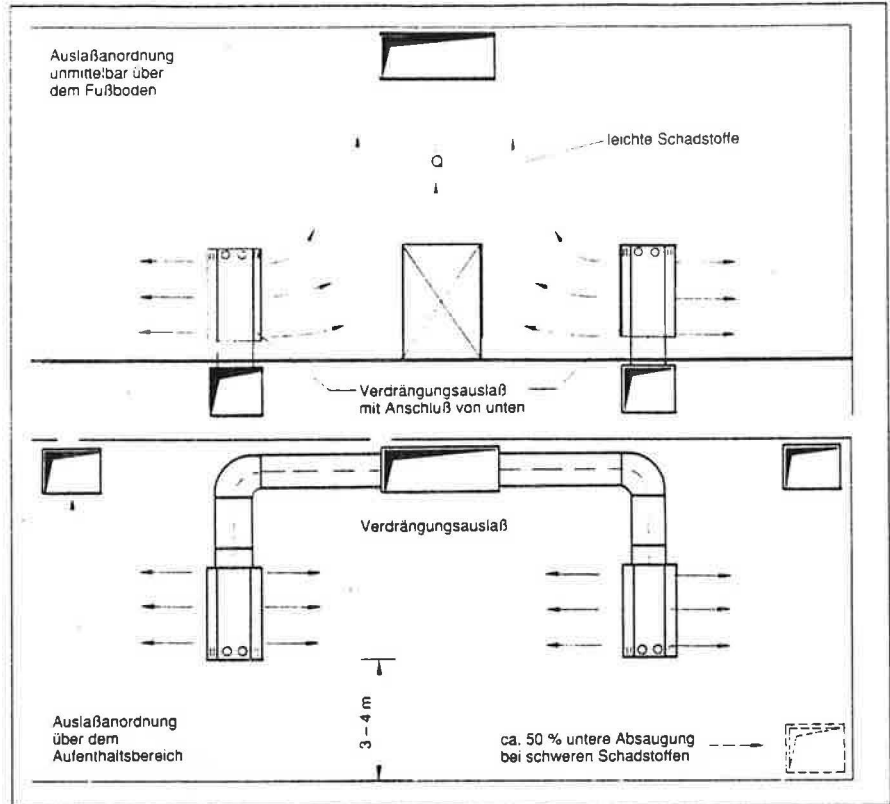


Bild 10: Anordnung der Verdrängungsauslässe in Produktionsstätten

abgesaugt. Je nach dem Arbeitsvorgang und den Witterungsbedingungen werden verschiedene Zulufttemperaturen benötigt. Die Zuluft kann kühler oder wärmer als die Raumluftr sein. Außerdem befindet sich die Arbeitsebene je nach dem Flugzeugtyp in verschiedenen Höhen. Die turbulenzarme Verdrängungsströmung muß stabil bleiben bei allen diesen Lastbedingungen, und sie muß verschiedene Eindringtiefen der Zuluftstrahlen ermöglichen. Dies läßt sich nur mit einem verstellbaren Luftauslaß mit großer Wurfweite realisieren. Einen Luftauslaß für diesen Einsatzbereich zeigt Bild 17. Die Zuluft wird im Kühlfall großflächig aus einem Lochblechmantel waagrecht, schräg

und senkrecht nach unten geblasen. Durch die Schwerkraft der kühleren Zuluft bildet sich eine großflächige, nach unten gerichtete Raumluftrömung aus.

Im Heizfall wird die Stabilität der Zuluftstrahlen und deren Eindringtiefe durch die in der Mitte und an der Peripherie des Luftauslasses erzeugten Stützstrahlen erhöht. Den charakteristischen Strahlverlauf zeigt Bild 18. Der starke Einfluß der Temperaturdifferenz zwischen Raum- und Zuluft auf die Eindringtiefe des Zuluftstrahles bei unveränderter Stellung des Luftauslasses ist dem Bild 19 zu entnehmen. Durch die Verstellung des Luftauslasses läßt sich dieser Einfluß voll kompensieren.

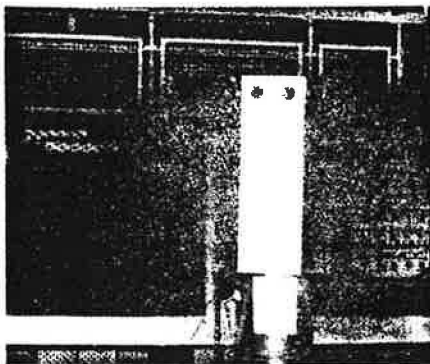


Bild 11: Verdrängungsauslaß in einer Gießerei

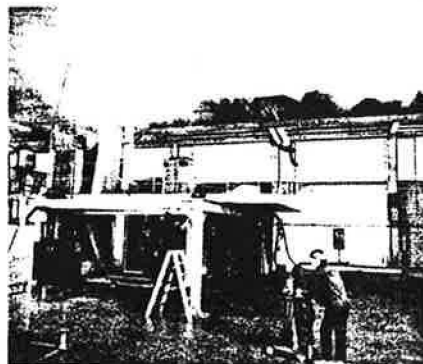


Bild 12: Strahlverlauf im Kühlfall

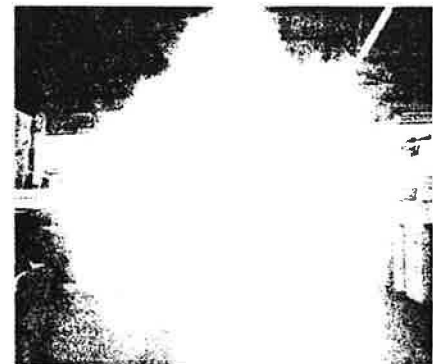


Bild 13: Strahlverlauf im Heizfall



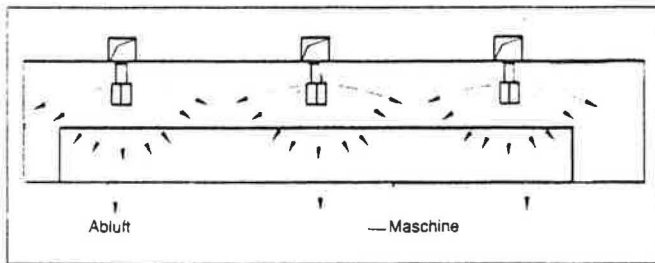


Bild 14: Verdrängungsauslässe in der mechanischen Fertigung

Bild 15: Verdrängungsströmung in der Spinnerei

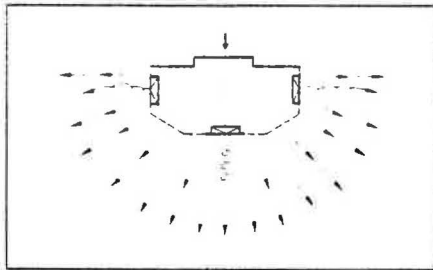


Bild 16: Verdrängungsauslaß für Textilbetriebe

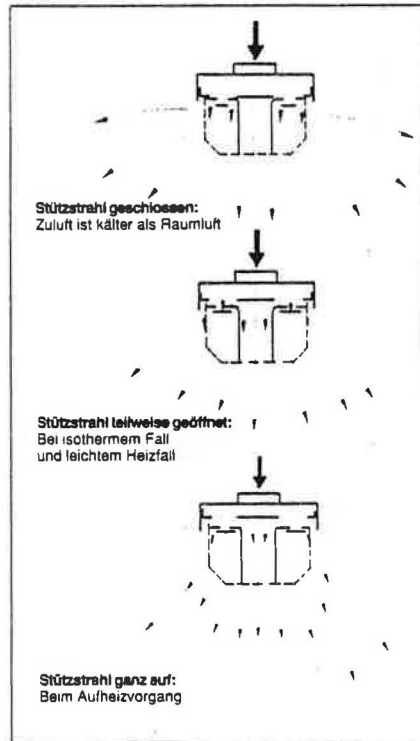


Bild 17: Verdrängungsauslaß für Flugzeug-Lackierhallen

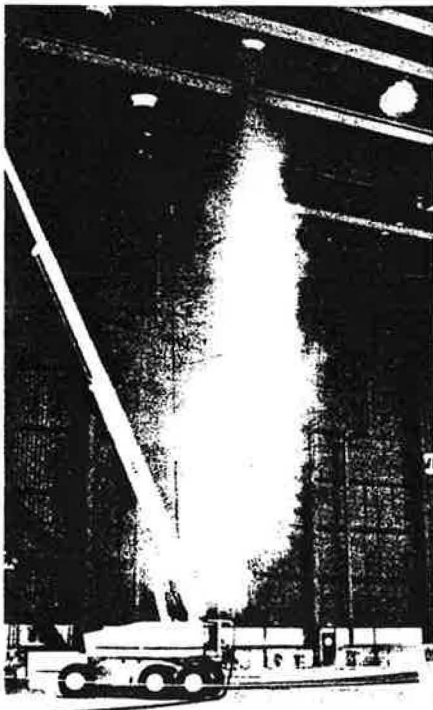


Bild 18: turbulenzarmer Luftstrahl in einer Flugzeug-Lackierhalle

### Zusammenfassung

Die Verdrängungsströmung ist vorzugsweise dort einzusetzen, wo Schadstoffe entstehen, die entweder von den Personen oder dem Produkt fern sind. Die Zuluft soll sich dabei möglichst wenig mit der Raumluft vermischen. Sie hat vielmehr die Aufgabe, die verbrauchte bzw. mit Schadstoffen behaftete Raumluft zu den Abluftöffnungen zu verdrängen, wo sie abgesaugt wird. Man erreicht auf diese Weise eine bes-

sere Ausnutzung der zugeführten Zuluft als mit der turbulenten Mischlüftung.

Sind in Räumen Schadstoffe nicht nennenswert vorhanden, so läßt sich mit der turbulenten Mischlüftung eine wirkungsvolle und gleichmäßige Durchspülung des Aufenthaltsbereiches sehr gut erzielen.

Während in Komforträumen die Quelllüftung ihre Bewährungsprobe in der Praxis noch bestehen muß, da Langzeiterfahrungen über die Akzeptanz noch fehlen, sind die Vorteile der Verdrängungsströmung in Produktionsstätten mit Schadstoffanfall unstrittig.

Die turbulenzarmen Luftstrahlen mit dem geringen Impuls neigen grundsätzlich stärker zur Instabilität als die turbulenten Luftstrahlen. Deshalb verlangt die Auslegung der Luftauslässe für eine turbulenzarme Verdrängungsströmung eine noch höhere Sorgfalt als bei den Luftauslässen für die turbulente Mischlüftung. In Komfortbereichen ist vor allem auf die zulässige Temperaturdifferenz zwischen Raum- und Zuluft zu achten, in Produktionsstätten auf die erforderliche Eindringtiefe, die Verstellbarkeit und die Anordnung der Luftauslässe (in Bodennähe oder über dem Aufenthaltsbereich).

Die Verdrängungsströmung wird die turbulente Mischlüftung keinesfalls vom Markt verdrängen. Beide Strömungsarten haben ihre Berechtigung, beide haben ihre bevorzugten Einsatzbereiche. Es kommt darauf an, im konkreten Fall die Vor- und Nachteile beider Systeme abzuwägen und das vorteilhaftere einzusetzen.

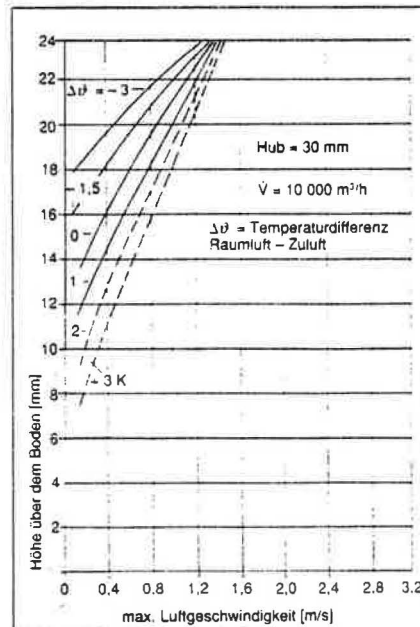


Bild 19: Einfluß der Temperaturdifferenz auf die Eindringtiefe

### Literatur

- [1] Moog, W.: Dimensionierung von Luftführungssystemen. Fortschritt-Berichte der VDI-Zeitschriften, Reihe 6, Nr. 48, 1977.
- [2] Regenscheid, B.: Beitrag zur isothermen Lochdecken- und Lochplattenströmung. Gesundheits-Ingenieur, H. 7, 1972.
- [3] Sodec, F. und Schierp, W.: Strömungsverhältnisse in Räumen unterschiedlicher Reinheitsklassen. Ki Klima - Kälte - Heizung, Nr. 2, 1989.
- [4] Sodec F.: Untersuchungen der Quelllüftung. Hausbericht der Fa. Krantz Nr. 3732.
- [5] Fitzner, K.: Impulsarme Luftzufuhr durch Quelllüftung. HLH 39, Nr. 4, 1988.
- [6] Nielson, P. V.: Displacement Ventilation in a Room with Low-Level Diffusers. Institutet for Bygningsteknik, Universität Aalborg, Dänemark, 1988.
- [7] Reichel, W., F. Sodec u. W. Veldboer: Gebaufassade und Decke als Klimakomponente. HLH, Nr. 6, 1990.