

IMPULSARME LUFTZUFUHR DURCH QUELLÜFTUNG



In Räumen, in denen sich Wärmequellen befinden und die von unten nach oben belüftet werden, entsteht eine besondere Art von Verdrängungsströmung, die als Quelllüftung bezeichnet wird. Die Strömung und ihre Besonderheiten werden beschrieben, ebenso die Luftdurchlässe, mit denen sie erzeugt werden kann. Bedenken, die in hygienischer Sicht bestehen, werden diskutiert.

Dr.-Ing. K. Fitzner,
Betzdorf (Sieg)

Quelllüftung ist eine spezielle Form der Verdrängungsströmung. Sie entsteht, wenn Luft impulsarm in Bodennähe in einen Raum eingebracht wird und gleichzeitig Wärmequellen im Raum sind, die durch ihren Auftrieb mehr Luft nach oben fördern als Zuluft in den Raum eintritt.

Luftführungen von unten nach oben in dieser Art sind im Prinzip nicht neu, neu ist nur die impulsarme Einbringung der Luft von einer Raumseite aus. Die sich einstellende Strömung ist vollkommen anders, als sie in den meisten klimatisierten Räumen mit einer Mischungsströmung auftritt. Zum Vergleich und zum besseren Verständnis sollen noch einmal die prinzipiellen Unterschiede zwischen einer Verdrängungs- und einer Mischungsströmung dargestellt werden.

Mischungsströmung

Bild 1 zeigt das qualitative Bild der Mischungsströmung, die am weitesten verbreitet ist. Ein Luftauslaß an der Decke, er könnte genauso gut auch oben an den Seitenwänden oder an der Fensterbrüstung angebracht sein, bläst Luft mit verhältnismäßig großem Impuls in den Raum ein. Es tritt eine schnelle Vermischung mit der umgebenden Luft ein, wodurch ein schneller Temperatur- und Luftgeschwindigkeitsabbau längs des Luftweges er-

reicht wird. Die Vermischung der gesamten Luft im Raum ist so perfekt, daß abgesehen von der näheren Umgebung des Auslasses Temperatur und Konzentration von Gasen und Partikeln im ganzen Raum ungefähr gleich sind. Die Luftqualität wird durch Verdünnung mit frischer Luft erreicht, im ganzen Raum herrscht also Abluftqualität.

Für die Mischungsströmung zeigen die gestrichelten Linien den prinzipiellen Verlauf der Temperaturen in Bild 2, der Konzentrationen in Bild 3 und Geschwindigkeiten in Bild 4 über der Raumhöhe. Wie schon gesagt, sind Temperaturen und Konzentrationen von Schadstoffen im ganzen Raum nahezu konstant. Die Luftgeschwindigkeit liegt außerhalb des Aufenthaltsbereiches, vor allem in der Nähe der Auslässe, in der Größenordnung von 1 bis 3 m/s. Außerhalb des Aufenthaltsbereiches stört diese hohe Geschwindigkeit natürlich nicht, obwohl sie von vielen Nutzern von RLT-Anlagen häufig falsch interpretiert wird. Wer hat nicht schon die verschiedenen Windmühlen und Fahnen an der Fensterbrüstung und an Decken von klimatisierten Räumen bewundert. Der eigentliche Nachteil der Mischungsströmung ist die Tatsache, daß die Mindestluftgeschwindigkeiten nicht beliebig klein eingestellt werden können. Sie sind abhängig von der einzu-

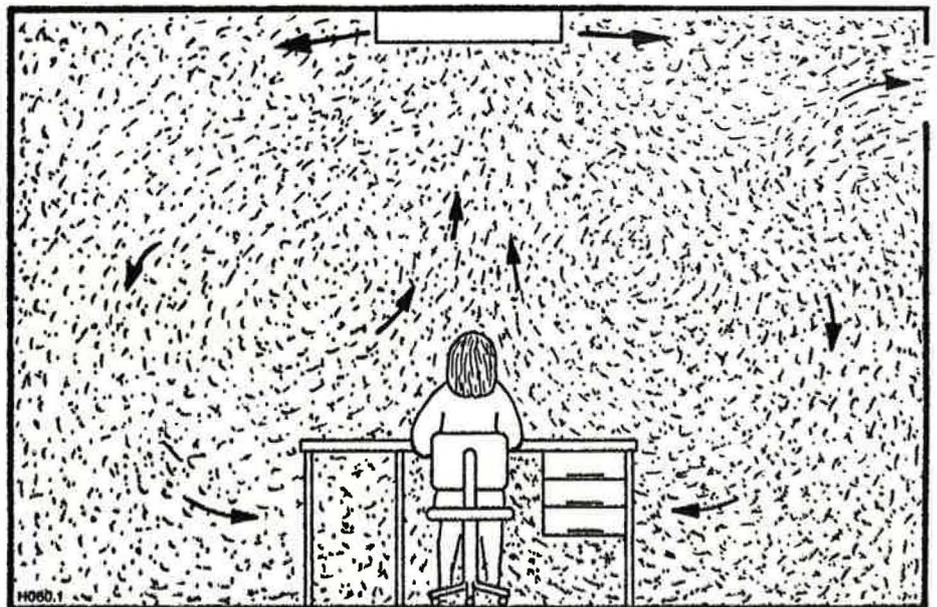
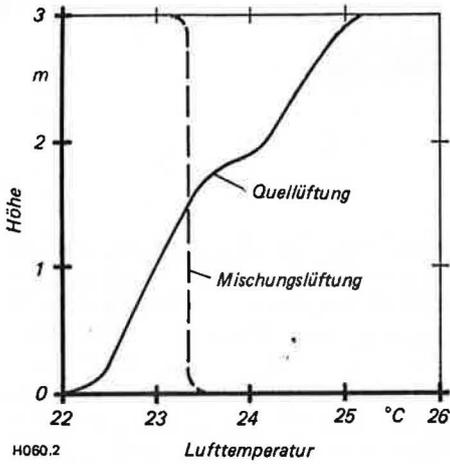
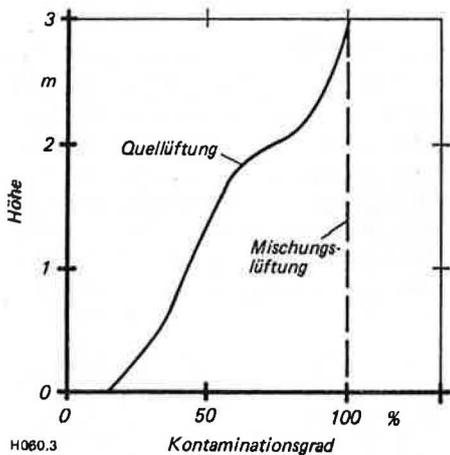


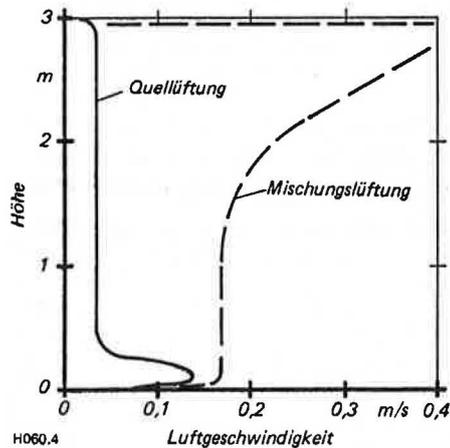
Bild 1: Mischungsströmung



H060.2
Bild 2: Vertikale Temperaturprofile (schematisch)



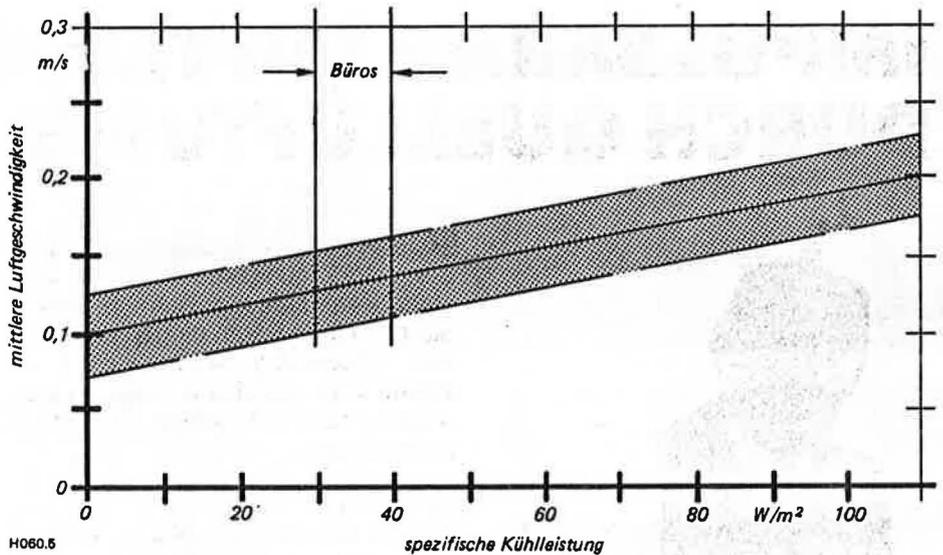
H060.3
Bild 3: Vertikale Profile der Schadstoff- und Partikelkonzentration



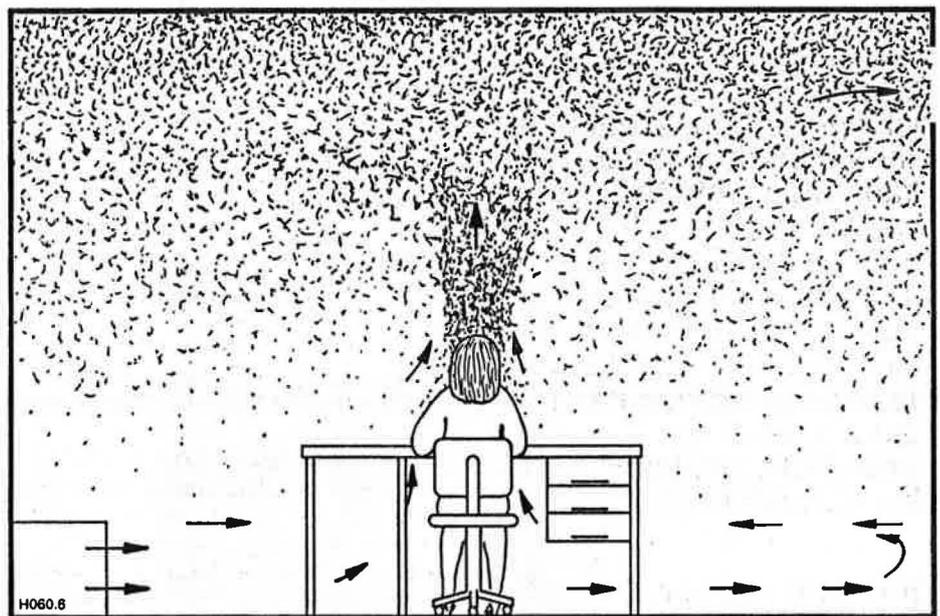
H060.4
Bild 4: Vertikale Geschwindigkeitsprofile

bringenden Kühlleistung und liegen innerhalb der in Bild 5 dargestellten Bandbreite in Abhängigkeit von der auf die Fläche bezogenen Kühlleistung im Raum [1]. Die aus zahlreichen Messungen in Labors und Anlagen ermittelten Minimalwerte werden jetzt auch von anderen Labors im Prinzip bestätigt, z.B. [2].

Der Bereich der thermischen Lasten, der in Büroräumen am häufigsten auftritt, liegt zwischen 30 und 40 W/m². Man erkennt, daß in diesem Bereich



H060.5
Bild 5: Luftgeschwindigkeit im Aufenthaltsbereich bei Mischungslüftung



H060.6
Bild 6: Quelllüftung

Mischungslüftungen anwendbar und mit den Behaglichkeitsanforderungen noch in Einklang zu bringen sind.

Verdrängungsströmung

Nun zur Quelllüftung. Bild 6 zeigt eine qualitative Darstellung der Strömung bei der Quelllüftung. Bei kleineren Räumen an einer Seite, am besten der Flurseite, bei größeren Räumen auf zwei oder mehreren Seiten oder über den Boden verteilt, tritt die Luft durch großflächige Auslaßgitter mit niedriger Geschwindigkeit in den Raum ein und verteilt sich am Boden. Von dort gleicht das Strömungsbild der bekannten Verdrängungsströmung, wie sie sich etwa einstellt, wenn die Luft gleichmäßig über den Boden verteilt durch den Teppich in den Raum eintritt [3]. Bevorzugt an Wärme-

quellen aufsteigend durchströmt die Luft den Raum von unten nach oben. Temperatur und Gas- sowie Partikelkonzentration steigen von unten nach oben an, wie in den Bildern 2 bis 4 (durchgezogene Linie) skizziert. Die Luftgeschwindigkeiten sind mit Ausnahme des Nahbereiches um den Auslaß extrem niedrig, mit den meisten Meßgeräten gar nicht meßbar, so daß Zugserscheinungen kein Grund zu Klagen sein können. Auch vor den Luftauslässen wird die Geschwindigkeit so eingestellt, daß sie unter den behaglichen Grenzwerten bleibt. Da die Konzentration von Schadstoffen vom Boden zur Decke hin ansteigt und an der Decke den Wert erreicht, den die Mischungslüftung dort auch haben würde, läßt sich leicht schlußfolgern, daß die Luftqualität im Aufenthaltsbereich besser sein muß als in einer Mi-

schungsströmung. Hinweise darauf ergaben sich schon früher [4], als Gas-konzentrationsmessungen mit verschiedenen Auslaßarten durchgeführt wurden, wobei der untersuchte Bodenluftauslaß aber noch keine reine Verdrängungsströmung, sondern im Aufenthaltsbereich eine Mischungsströmung erzeugte.

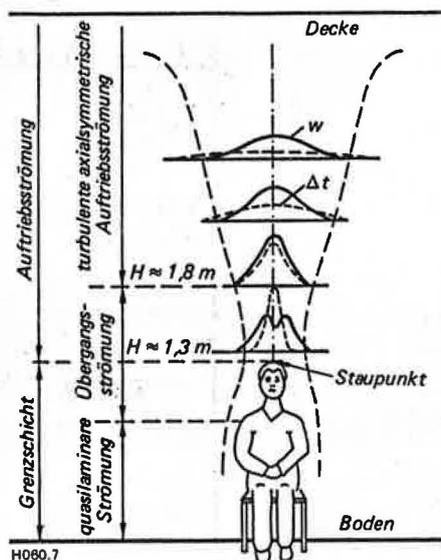
Die charakteristischen Temperatur- und Geschwindigkeitsprofile (Bilder 2 und 4) sind mit der Strömungsform der Quelllüftung fest verknüpft. Beim Konzentrationsprofil muß das nicht unbedingt der Fall sein, wenn Sekundärluftkühlung im Raum stattfindet.

Die charakteristische Luftbewegung an einer Person zeigt Bild 7 [nach 23, 24]. Um den Körper bildet sich eine Grenzschicht mit höherer Temperatur als die Umgebung. In etwa 1 m Höhe wird die zunächst laminare Grenzschicht turbulent, über dem Kopf bildet sich eine Auftriebsfahne, die schließlich einen Freistrahл nach oben bildet.

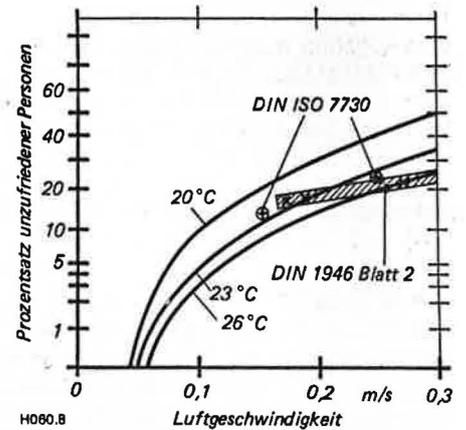
In Skandinavien wurden in letzter Zeit zahlreiche Versuche durchgeführt [5, 6, 7, 8], die mit Spurengasmessungen und theoretischen Betrachtungen über die Verweilzeit und das mittlere Alter der Luft im Raum die Vorteile der Verdrängungsströmung belegen [9 bis 14]. In zwei Arbeiten [9 und 10] wird auch schon über ausgeführte Anlagen nach dem Prinzip berichtet.

Thermische Behaglichkeit

Die Frage, ob dieses Luftführungssystem der Mischungsströmung vorgezogen wird oder nicht, wird jedoch nicht nur von der Luftqualität entschieden, sondern auch von der Beantwortung der Frage abhängen, wieviel Grad Temperaturdifferenz im Aufenthaltsbereich auftreten und ob diese Temperaturdifferenz besser oder schlechter zu ertragen ist als die höheren Luftgeschwindigkeiten, die bei der Mischungsströmung unvermeidbar sind. Eine erste Antwort auf diese Frage können Versuchsergebnisse aus der Literatur geben. In Bild 8 ist nach [15] die Zahl der unzufriedenen Personen über der mittleren Luftgeschwindigkeit bei verschiedenen Lufttemperaturen aufgetragen. Zusätzlich sind die nach geltender Norm [16] zulässigen Werte eingetragen. Man muß danach mit mehr als 5% unzufriedenen Personen rechnen, wenn die Luftgeschwindigkeiten höher als 12 cm/s sind. Bei den nach [16] zulässigen Geschwindigkeiten liegt der Prozentsatz der Unzufriedenen sogar bei 20%. Daß trotzdem die Zahl der Unzufriedenen im allgemeinen nicht so hoch ist, läßt



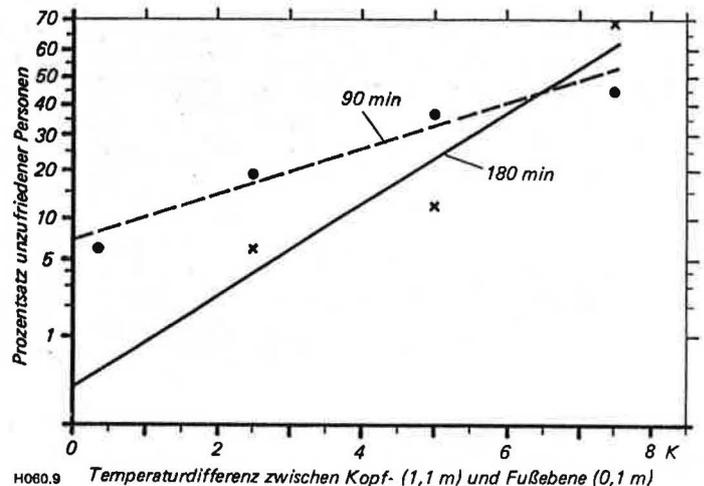
H080.7



H080.8

Bild 8: Prozentsatz unzufriedener Personen durch Luftbewegung im Kopfbereich [15]

Bild 7: Schematischer Verlauf der Strömung an einer Person [24]



H080.9

Bild 9: Prozentsatz unzufriedener Personen bei unterschiedlichen Temperaturdifferenzen

sich dadurch erklären, daß etwa nur auf 10% der Fläche eines Raumes diese relativ hohen Werte auftreten.

Ein entsprechendes Bild mit dem Prozentsatz der unzufriedenen Personen bei unterschiedlichen Temperaturdifferenzen im Aufenthaltsbereich gibt Bild 9 wieder [17]. Bei längerer Versuchsdauer werden 2,5 K Temperaturdifferenz zwischen 0,1 und 1,1 m Höhe nur von 5% der Versuchspersonen als unangenehm empfunden. Entsprechend empfiehlt auch eine internationale Norm [18], 3 K Temperaturdifferenz und eine Luftgeschwindigkeit von 25 cm/s im Sommer und 15 cm/s im Winter im Aufenthaltsbereich nicht zu überschreiten. Legt man die Meßwerte der Bilder 8 und 9 zugrunde, so müßte bei gleicher Zahl unzufriedener Personen die Geschwindigkeit sogar noch niedriger begrenzt werden.

Vorstellungsschwierigkeiten

Die prinzipielle Schwierigkeit, die jeder Klimaingenieur beim Vergleich der beiden Systeme zunächst überwinden muß, ist die fest verankerte Gewohnheit, in Begriffen der Mischungsströmung zu denken.

Er weiß, daß ein Mensch bei geringster Tätigkeit etwa 80 W an sensibler Wärme abgibt. Wenn nun 40 m³/h an Zuluft zur Verfügung stehen, um diese Wärme abzuführen, so ergibt sich eine Temperaturerhöhung von 6 K, wenn die Wärme mit der Luft allein abgeführt wird. Das wäre im Aufenthaltsbereich zu viel, wie die vorangegangenen Erläuterungen zeigen. Bekannte Beispiele von Verdrängungsströmungen in Theatern, in Räumen mit luftdurchlässigem Doppelboden [3], mit Luftauslässen im Doppelboden [19, 20] ermutigten zu Versuchen, herauszufinden, welche Temperaturdifferenzen im Aufenthaltsbereich wirklich auftreten. Die oben aufgestellte einfache Berechnung der Temperaturdifferenzen kann offenbar nicht die ganze Wahrheit darstellen. Es muß sogar zugegeben werden, daß allein das Suchen nach dem Temperaturanstieg im Aufenthaltsbereich bereits einen Rückfall in die Denkgewohnheiten der Mischungsströmung darstellt, denn bei der Quelllüftung gibt es keine einheitliche Temperaturerhöhung im Raum. Sie hängt von der Höhe ab und außerdem müssen die

Luftführung

Grenzschichten um die Person herum zwangsläufig ausgeklammert werden. Wie in [3] schon abgeschätzt, gibt eine Person in einer Verdrängungsströmung selbst in dicht belegten Sälen noch etwa 30% der Wärme durch Strahlung ab, in einem weniger dicht belegten Raum dürfte sich der Wert auf 50% erhöhen. Der übrigbleibende konvektive Anteil strömt zur Hälfte oberhalb des Kopfes aus dem Aufenthaltsbereich hinaus und wird hier also nicht mehr wirksam, falls die erwärmte Luft nicht in den Aufenthaltsbereich zurückströmt. Bild 10 zeigt ein Beispiel, daß auch schon früher [20] prinzipielle Überlegungen zum Thema Verdrängungsströmung oder Mischungsströmung angestellt wurden. Allerdings sollte die Verdrängungsströmung hier durch „hochinduktive Luftauslässe“ am Boden erzeugt werden. Der Zuluftstrom ist, wie man an dem Geschwindigkeitsprofil erkennt, außerdem so groß, daß auch zwischen den Wärmequellen eine Aufwärtsströmung eintritt. Das ist bei der Quelllüftung nicht der Fall.

Raumströmungsversuche mit Büro- und Besprechungsraum

Um die sich einstellende Strömung und die Temperaturverteilung im Raum zu ermitteln, wurden inzwischen zahlreiche Raumströmungsversuche für Büro-, Versammlungs- und Fabrikationsräume im klimatechnischen Laboratorium Betzdorf und in anderen Raumströmungslabors unternommen. Am Beispiel des Büroraumes sollen zunächst das Strömungsbild und die Verteilungen von Temperatur und Konzentration dargestellt werden. Die Abmessungen zeigt Bild 11. In einem Versuchsraum von 4,2 m x 7 m mit drei Luftauslässen mit Laminarisorator wurden entweder zwei bis drei Personen und zwei Terminals untergebracht (Büroraum) oder zehn Personen (Besprechungsraum). Die thermische Belastung wurde variiert in einer Bandbreite von 30 bis 45 W/m² bezogen auf die Grundfläche des Raumes. Der Zuluftstrom wurde zwischen 3 und 12 m³/h/m² variiert. Bild 12 zeigt das Strömungsbild in einem Querschnitt durch den Raum. Für alle, die einen solchen Versuch zum ersten Mal sehen, ist das Strömungsbild wohl das Überraschendste. Die Luft verteilt sich vom Auslaß aus mit geringer Geschwindigkeit (5 bis 8 cm/s) gleichmäßig über den gesamten Boden. Die zunächst am Boden liegende Schicht wird nur langsam entsprechend dem Luftwechsel verdrängt, der einer Geschwindigkeit von 3 bis 12 m/h (0,08 bis 0,3 cm/

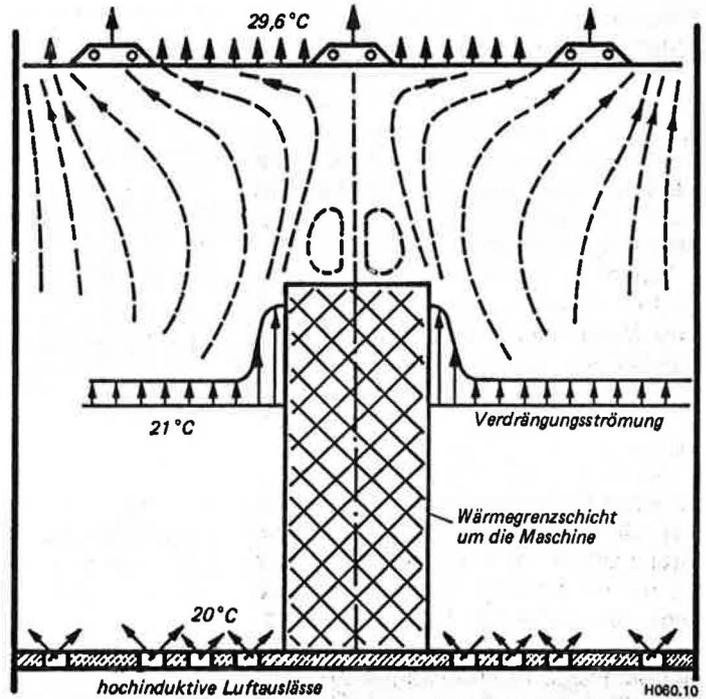


Bild 10: Luftströmung von unten nach oben nach [20]

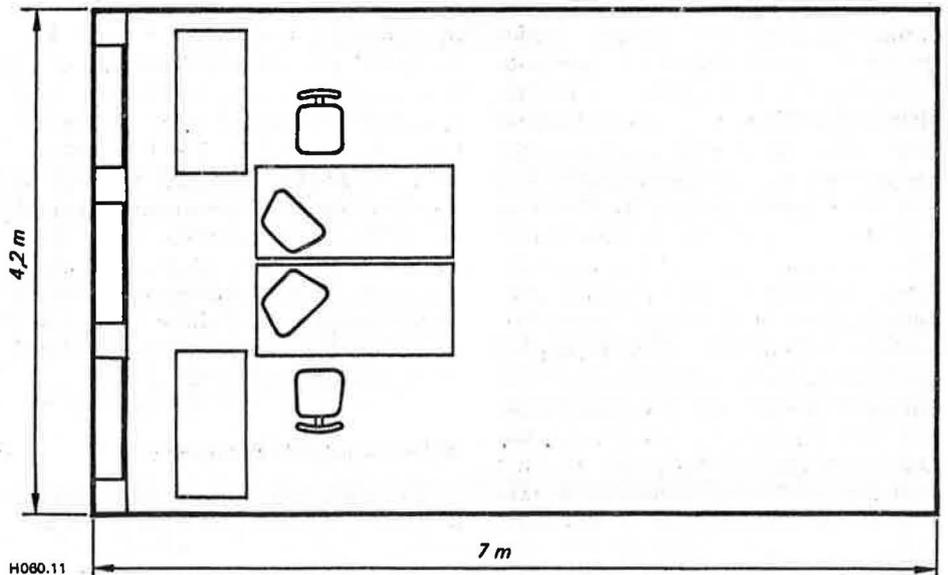
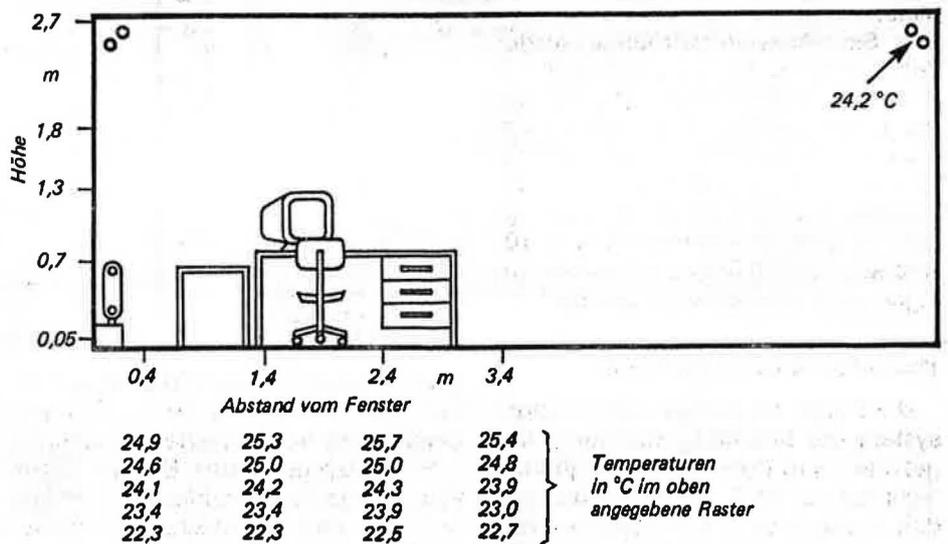


Bild 11: Abmessungen des Versuchsraumes und eine typische Temperaturverteilung

s) entspricht. Dieser Verdrängungsprozeß setzt sich aber nicht über die gesamte Raumhöhe fort, weil durch die Wärmequelle lokal sehr viel Luft nach oben befördert wird. Die Beheizung der Attrappe beträgt in diesem Fall 80 W, und sie entspricht der Wärmeabgabe einer Person. Wie *Bild 13* zeigt, erzeugt eine sitzende Person das gleiche Strömungsbild. Der Auftrieb an der Person ist so groß, daß dadurch mehr Luft nach oben befördert als Frischluft in den Raum eingebracht wird.

Der nach oben geförderte Volumenstrom wächst von null am Boden auf etwa $100 \text{ m}^3/\text{h}$ in Kopfhöhe an. Bei einem Zuluftstrom von $40 \text{ m}^3/\text{h}/\text{Person}$ entsteht so das Strömungsbild der Quelllüftung. Unterhalb einer unteren Trennschicht strömt alle Luft zur Wärmequelle, hier zu der Person hin, und so entsteht das auf der Skizze (*Bild 14*) gezeigte Strömungsverhalten im Raum. Die Höhe dieser Frischluftschicht ergibt sich aus dem Volumenstrom der Zuluft und dem Förderprofil der Wärmequelle. Die Obergrenze stellt sich dort ein, wo der von der Wärmequelle nach oben geförderte Volumenstrom dem Zuluftstrom je Wärmequelle gleicht.

Daraus folgt eine weitere wichtige Erkenntnis. Wenn der Luftauslaß niedriger als die Schichthöhe ist, wird die Luftgeschwindigkeit hinter dem Auslaß im allgemeinen nicht beschleunigt, die Luft fällt vom Auslaß nicht zum Boden. Weiterhin ist zu beachten, daß Schadstoffe, die von der Person im Auftriebsstrom freigesetzt werden, nicht in die untere Luftschicht gelangen können. Die Luftschicht füllt den ganzen Boden im Raum aus.

Es tritt noch ein weiterer interessanter Effekt auf. Die Tischplatte hat durch die absorbierte Strahlung und durch den Wärmestrom aus dem Beinbereich der Person eine geringe Über-temperatur gegenüber der Umgebung. Dadurch setzt sich eine Strömung vom Rand der Tischplatte aus in Bewegung, die aber nur etwa 30 cm hoch aufsteigt, weil ihr Impuls und ihre Über-temperatur zu gering sind. Sie steigt ungefähr solange nach oben, bis sich ihre Temperatur der Umgebung angeglichen hat. Die Luft breitet sich horizontal im Raum aus und wird anschließend wieder von den stärkeren Wärmequellen zurückgesaugt, so daß auf diese Weise eine Trennschicht entsteht, die nur vom Auftrieb der stärkeren Wärmequellen durchbrochen wird. Durch die Wärmequellen ergeben sich also zwei charakteristische Strömungsformen im Raum:



Bild 12: Strömungsbild der Quelllüftung mit behetzter Attrappe

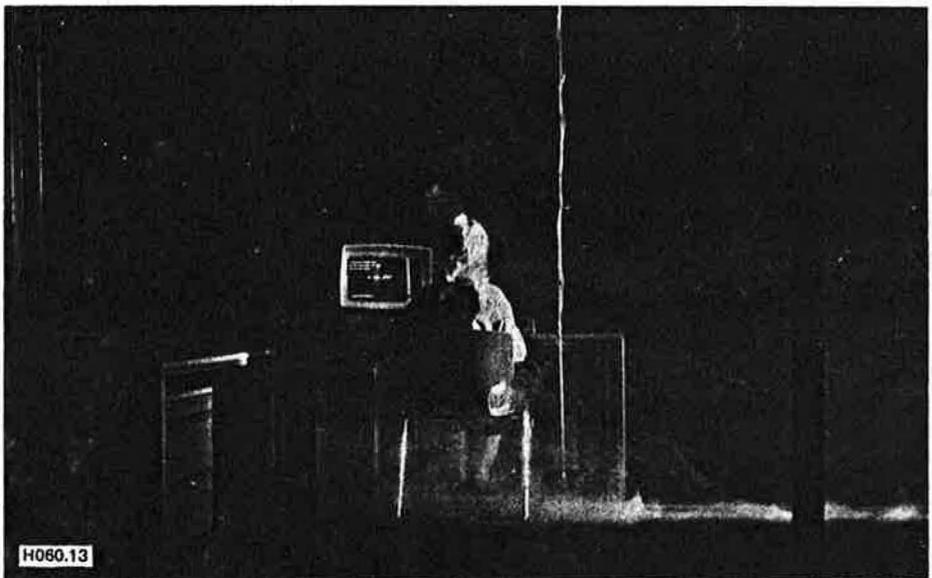


Bild 13: Strömungsbild der Quelllüftung mit einer Person

1. Auftriebsfahnen über Quellen mit starkem Auftrieb, Strömung bis zur Decke (Personen, Computer-Terminals) und
2. Schichtenströmung über Quellen mit schwachem Auftrieb.

Beide Strömungsformen überlagern sich im Raum.

Solange die Schadstoffquellen gleichzeitig an die starken Wärmequellen gekoppelt sind, entweichen die Schadstoffe aus dem Aufenthaltsbereich, und die Luftqualität wird in diesem Bereich verbessert.

Um den Einfluß der Strömung auf die Luftqualität zu quantifizieren, wurde an einer Attrappe einer Versuchsperson Lachgas als Spurengas eingebracht, an der anderen gegenüber sitzenden Person wurde die Kon-

zentration gemessen. Der Abstand der Personen betrug ungefähr 2 m.

Die örtliche Konzentration, bezogen auf die mittlere Abluftkonzentration, kann hier als Kontaminationsgrad bezeichnet werden. Von Mischungsströmungen ist bekannt, daß der Kontaminationsgrad im ganzen Raum ungefähr 100% [4] beträgt. Hier wurden für den Normalfall 10% gemessen, was, etwas vereinfacht gesagt, einer Verbesserung der Luftqualität um den Faktor 10 entspricht, und zwar die Luftqualität im Hinblick auf die untersuchte Quelle. Ein ähnlicher Versuch wurde für den Konferenzraum gemacht. Trägt man die Konzentrationen, die an den Tisch sitzenden Personen gemessen wurden, über dem Abstand auf, so ergibt sich das in *Bild 15* gezeigte Verhalten.

Bei den anderen Betriebszuständen, etwa dem Sommerfall mit warmer Fensterscheibe (5 K über Raumtemperatur) oder Winterfall mit Kaltluftabfall an der Scheibe und Heizkörper (Leistung 450 W) verschlechtert sich der Kontaminationsgrad auf 20% und in einem Fall auf 40% für das Beispiel der beiden Personen, die in 2 m Entfernung voneinander im Büroraum sitzen. Das bedeutet jedoch immer noch, daß die Luftqualität um den Faktor 5 bzw. 2,5 besser ist. Dieser Maßstab zur Beurteilung gibt zugegebenermaßen ein sehr günstiges Bild, er dürfte aber vor allem für Einzelbüros mit zwei bis drei Personen gut geeignet sein und immer dann, wenn der Einfluß einzelner Schadstoffquellen beurteilt werden soll.

Wie aufgrund der Schichtenströmung zu erwarten ist, stellt sich eine fast vollkommen horizontale Temperaturverteilung im Raum ein. Ein Beispiel für die gemessene Temperaturverteilung ist in Bild 11 wiedergegeben.

Die vertikale Temperaturverteilung hängt natürlich von der Art und Verteilung der Wärmequellen ab, sie läßt sich in erster Näherung gut durch einen linearen Verlauf über der Höhe annähern. Damit läßt sich auch abschätzen, wieviel der konvektiv abgegebenen Wärme ungefähr im Aufenthaltsbereich abgegeben wird. Sie beträgt etwa 50%, wenn die Aufenthaltszone etwa 50% der Raumhöhe einnimmt. Ein weiterer Effekt ist bemerkenswert: Durch die geringe Luftgeschwindigkeit reduziert sich der konvektive Wärmeübergang an der Oberfläche der Wärmequellen, und dadurch wird ein größerer Teil der Wärme durch Strahlung abgegeben. Wenn die Umgebungflächen etwa mittlere Raumtemperatur haben (23 °C), wird ungefähr die Hälfte der Personenwärme durch Strahlung abgegeben. Deshalb ist der Temperaturanstieg im Aufenthaltsbereich kleiner als er aufgrund der Wärmequellen zu erwarten wäre. Nur bei lang anhaltender hoher thermischer Belastung kann die gesamte Wärmelast in der Temperaturerhöhung der Luft wiedergefunden werden, nämlich dann, wenn die Wände bei der Temperatur der Abluft und der Oberflächentemperatur der Wärmequellen liegen. Das sind etwa 28 °C bei Personen.

Raumströmungsversuche mit thermisch hoch belasteten Räumen

Die Hauptvorteile der Quelllüftung liegen natürlich überall dort, wo neben der thermischen Last Schadstofflasten

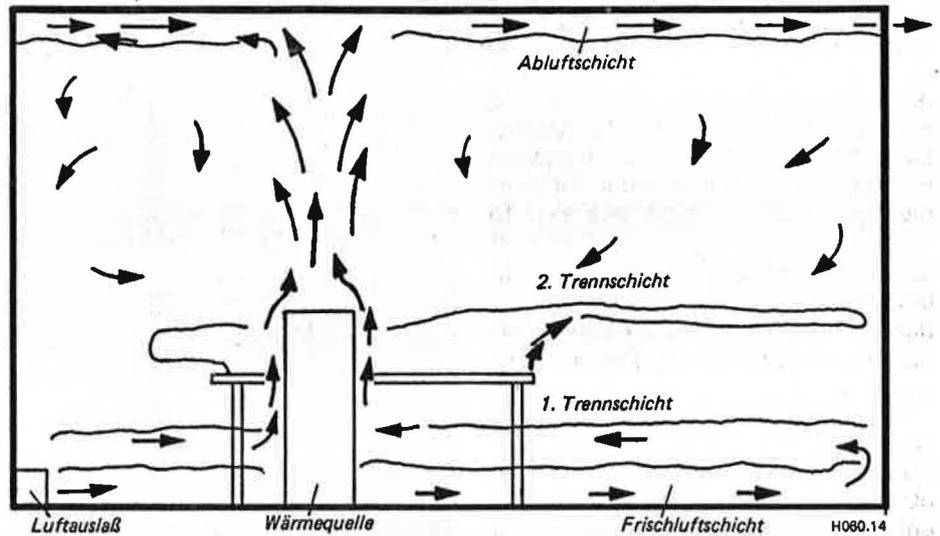


Bild 14: Skizze des Strömungsbildes der Quelllüftung

anfallen, und das ist in vielen Fertigungshallen der Fall. Um Zugerscheinungen zu vermeiden, muß die Luft auch hier mit kleiner Geschwindigkeit über großflächige Auslässe und so niedrig in den Raum eingebracht werden, daß die Frischluftschicht höher als der Auslaß ist. Da Maschinen und Ausrüstungen von Fertigungshallen selten ihre Wärmelast nur am Boden freisetzen, ist das im allgemeinen unproblematisch. Es ergibt sich im Raum qualitativ das gleiche Strömungsverhalten, wie es oben schon beschrieben wurde. Eine Begrenzung in der thermischen Last ist nicht gegeben, wenn der Zuluftstrom entsprechend hoch gewählt werden kann.

Auslaßarten

Ähnlich wie es für Mischungsströmungen eine Vielzahl von Luftauslässen gibt, ist auch für die Quelllüftung eine große Zahl von Auslaßvarianten erforderlich.

Als grobe Unterteilung sind folgende Auslaßarten zu unterscheiden:

1. Wandauslaß in Bodennähe,
 - 1.1 für Nur-Luftsysteme,
 - 1.2 für Induktionsgeräte.
2. Bodenluftauslaß,
 - 2.1 Einzelauslässe,
 - 2.2 großflächige Auslässe.
3. Wandauslaß in einer bestimmten Höhe über dem Boden.

Wandauslaß

Diese Auslaßart wird die häufigste Anwendungsform sein, weil sie am preiswertesten ist. Es handelt sich um einen großflächigen Auslaß in Bodennähe an der Innen- oder Außenwand eines Raumes oder in Sonderfällen auch an einer beliebigen Trennwand

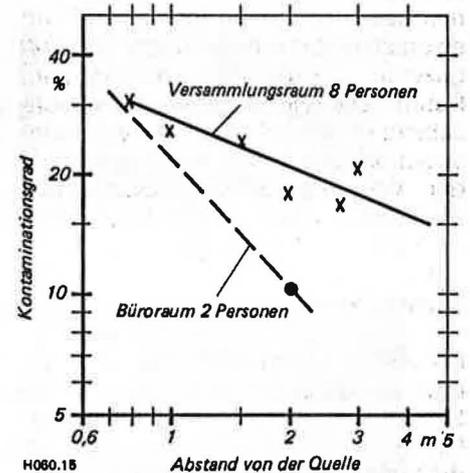


Bild 15: Kontamination durch eine Quelle für Büro- und Versammlungsraum

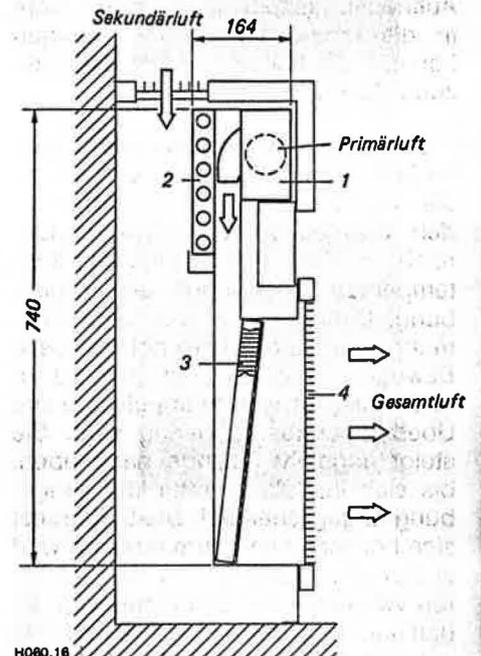


Bild 16: Schnitt durch das Quellluftinduktionsgerät Rox KVG (1 Primärluftverteiler, 2 Wärmeaustauscher zum Heizen und Kühlen, 3 Gleichrichter, 4 Austrittsgitter)

dem Boden und beeinflussen deshalb die Frischluftschicht am Boden nicht. Der von einer Person nach oben geförderte Luftstrom wächst von null am Boden auf etwa $100 \text{ m}^3/\text{h}$ in Kopfhöhe an. Den prinzipiellen Verlauf des Förderprofils zeigt *Bild 17*. Man beachte, daß der Mensch in einer Stunde mehr als sein eigenes Gewicht an Luftmasse nach oben bewegt. Der Verlauf des Förderprofils über der Höhe kann gut durch eine Gerade angenähert werden. Ungefähr $0,3 \text{ m}$ oberhalb des Kopfes wird die höchste vertikale Geschwindigkeit erreicht, wie *Bild 7* veranschaulicht, und von dort breitet sich die Luft weiter wie ein isothermer Freistrahl aus, da der Temperaturabbau bis dahin nahezu abgeschlossen ist.

Bei einem 3 m hohen Raum wächst der geförderte Volumenstrom noch einmal etwa auf den doppelten Wert an, wenn nur ein geringer Temperaturanstieg im Raum vorliegt. Messungen und Berechnungen der Auftriebsfahne für isotherme Umgebungsbedingungen sind in [23] zu finden.

Aus Kontinuitätsgründen muß natürlich genau so viel Luft aus dem Deckenbereich nach unten strömen wie zu viel nach oben strömt. Dabei wird erwärmte Luft und kontaminierte Luft nach unten gelangen. Das Konzentrations- und Temperaturprofil, das sich infolge der Rückströmung im Raum einstellt, läßt sich näherungsweise aus dem in *Bild 17* dargestellten Überschubprofil errechnen. In dem Bild ist der von einer Person nach oben geförderte Auftriebsstrom als Funktion der Höhe dargestellt, wie er sich bei geringem Temperaturanstieg im Raum ergibt. Wenn $50 \text{ m}^3/\text{h}$ als Zuluftstrom in den Raum strömen, bildet sich eine Verdrängungsschicht bis zu einer Höhe von etwa einem halben Meter.

Der gute Antriebsmotor für die Raumströmung wird allerdings schlechter, wenn im Raum ein Temperaturanstieg auftritt. Mit zunehmendem Temperaturgradienten verzögert sich der nach oben geförderte Volumenstrom. Dieser Effekt wird bei [7] eingehend beschrieben. Er hat zunächst eine positive Seite. Wenn weniger Luft nach oben gefördert wird, wächst die Höhe der Frischluftschicht am Boden an, und außerdem wird die Rückströmung der kontaminierten Luft aus dem Deckenbereich reduziert, im Aufenthaltsbereich werden Temperatur- und Konzentrationsanstieg kleiner. Die zukünftige Entwicklung der Quellluftsysteme muß darauf abzielen, hier ein Optimum zu finden.

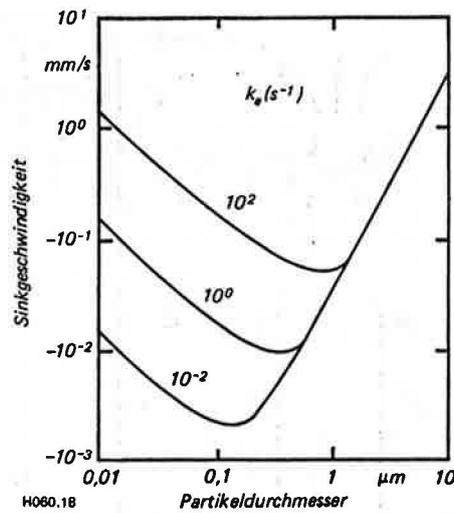


Bild 18: Sinkgeschwindigkeit kleiner Partikel nach [27]

Strahlung von der Decke

Neben dem Einfluß der Wärmequellen auf die Strömung muß aber noch ein weiterer wichtiger Einfluß erwähnt werden. Es ist der Einfluß der Strahlung zwischen den Wänden, vor allem zwischen Decke und Boden.

Zunächst die senkrechten Wände: Die Wärmequellen im Raum geben etwa die Hälfte ihrer Wärme durch Strahlung an die Umgebung ab, davon je nach Raumkonfiguration bis zu $\frac{2}{3}$ an die Seitenwände. Die Fläche der Seitenwände eines 10 m^2 Raumes ist etwa 20mal so groß wie die Oberfläche der sich darin befindenden Person. Die absorbierte Wärmestromdichte muß daher etwa 20mal kleiner als die von der Körperoberfläche der Person abgegebene sein. Selbst wenn die Wand vollkommen wärmegeleitet ist, kann das zunächst keine große Temperaturerhöhung bewirken. Nach entsprechend langer Zeit wird die Wand allerdings theoretisch die gleiche Temperaturverteilung von unten nach oben annehmen wie die Luft im Raum. Wegen der Transmission und der Speicherwirkung von Wänden wird dieser endgültige Zustand im normalen Büroraum nie erreicht werden, aber er stellt den ungünstigsten Fall dar und sollte deshalb nicht unbeachtet bleiben. Entsprechend wird auch die Decke des Raumes am Ende Ablufttemperatur annehmen. Falls die sich so einstellende Übertemperatur groß genug ist, bleibt der Strahlungsaustausch zwischen der oberen und unteren Raumhälfte nicht mehr vernachlässigbar. Bei einer Übertemperatur von 10 K wird immerhin etwa ein Wärmestrom von 50 W/m^2 von der Decke zum Boden abgestrahlt. Vorausgesetzt, der Boden ist ebenfalls gut gedämmt, dann wird dieser Wärme-

strom schließlich konvektiv an die Luft abgegeben. Das führt, wenn der Weg der Luft längs des Bodens lang ist, zu einem erhöhten Temperaturanstieg in der Frischluftschicht am Boden. Dieser Anstieg ist dann unproblematisch, wenn die Auslässe ungefähr gleich weit von den Personen im Raum entfernt sind. Die Lufteinbringung von der Flurseite kann deshalb vorteilhaft sein. Wenn der Abstand groß ist, kann mit entsprechend tieferer Temperatur eingeblasen werden. Bei permanent thermisch hoch belasteten Räumen ist aber die Temperaturdifferenz zwischen Zu- und Abluft im Raum begrenzt, besonders wenn die Entfernungen zwischen den Auslässen groß sind und die Personen unterschiedlich weit von den Auslässen entfernt sitzen. In Büroräumen aber, die täglich nur 8 bis 10 h benutzt werden, dürfte dieser Zustand bei normaler Wandkonstruktion nicht auftreten.

Sollte das doch zu befürchten sein, so gibt es zwei Maßnahmen zur Abhilfe. In [13, 28] wird empfohlen, daß Quelllüftung sinnvollerweise mit Deckenkühlung kombiniert werden sollte. Es wird sicherlich einzelne Fälle geben, in denen dieser Mehraufwand angebracht ist. Eine weitere Möglichkeit, die diskutiert werden sollte, besteht darin, die Decke nach unten metallisch glänzend auszuführen und dadurch die Strahlung erheblich zu reduzieren.

Natürlich setzt diese Lösung eine Abstimmung mit der Innenarchitektur voraus. An der Deckenunterseite ist die Gefahr gering, daß die metallisch glänzende Fläche durch Verschmutzen ihre positiven Eigenschaften verliert. Wenn ein Doppelleben vorhanden ist, besteht eine weitere Möglichkeit darin, die Zuluft im Boden so zu führen, daß die Bodentemperatur abgesenkt und die Luft dabei vorgewärmt wird.

Hygiene

Luftführung von unten nach oben hat es in Räumen mit Fensterlüftung früher schon immer gegeben. Die Klimatechnik ist in ihrer Entwicklung bewußt davon weg zur Mischungsströmung gegangen, und man kann annehmen, daß ein starkes subjektives Element dazu beigetragen hat. Es ist die hygienische Seite. Fast jeder, der zum ersten Mal mit der Luftführung von unten konfrontiert wird, denkt daran, daß am Boden eines Raumes im allgemeinen Schmutz in konzentrierter Form lagert, und er befürchtet, daß dieser Schmutz bevorzugt durch das Lüftungssystem von unten aufge-

wirbelt wird und in den Aufenthaltsbereich gelangt. Dieses Argument ist in den vergangenen zehn Jahren aber glücklicherweise vollkommen entkräftet worden, nachdem man sich genauer mit dem Flugverhalten von Partikeln, insbesondere von Keimen, beschäftigt hat [4, 25]. Es ist deshalb verwunderlich, daß es immer noch Fachleute in der Branche gibt, die mit dem Hygieneargument gegen die Lüftung von unten polemisieren [26]. Keime sind so klein, daß sie sich praktisch ohne Differenzgeschwindigkeit zur Luft im Raum bewegen. Das läßt sich an der Sinkgeschwindigkeit (Bild 18 nach [27]) der Teile in Luft vielleicht am besten erklären. Bakterien liegen im Durchmesserbereich 1 bis 8 µm, ihre Sinkgeschwindigkeit ist deshalb kleiner als 1 mm/s. Sporen, Pilze, Viren sind noch erheblich kleiner, Viren sogar um den Faktor 10. Ihre Sinkgeschwindigkeit ist also noch viel kleiner als die der Bakterien. Sie folgen also praktisch jeder konvektiven Luftbewegung. Bei Quelllüftung sind die Luftgeschwindigkeit und der Wirbeldiffusionskoeffizient k_w viel kleiner als bei der Mischungsströmung. Deshalb passiert folgendes: Zunächst sollen die Partikel, die am Boden liegen oder von dort aufgewirbelt werden können, betrachtet werden. Eine Ablösung der Partikel vom Boden findet wegen der kleinen Geschwindigkeiten (kleiner 10 cm/s) durch die Luft nicht statt, oder wenn sie schon stattfände, wäre sie kleiner als bei der Mischungsströmung. Unabhängig von der Luftführung können durch das Begehen des Bodens lokal Partikel aufgewirbelt werden. Sie sinken, wenn sie groß genug sind, bei der Quelllüftung schneller zu Boden als bei der Mischungsströmung. Die kleineren Partikel dagegen werden mit der Luft abtransportiert und ihre Verweilzeit im Raum ist bei der Quelllüftung kleiner als bei der Mischungsströmung. Für Partikel, die vom Boden aufgewirbelt werden, gilt deshalb, daß die Verhältnisse bei einer Quelllüftung gleich oder besser sind als bei der Mischungsströmung. Als ganz krasses Beispiel wird oft der Schmutz an einem Fußbodenauslaß zitiert. Da die Austrittsgeschwindigkeit am Auslaß immerhin 1,5 m/s beträgt, wäre ein solcher Ablösemechanismus denkbar. Sollten aber wirklich auf diese Weise Partikel fortgeblasen werden, so gelangen sie bis maximal zur Eindringhöhe des Strahles (bei Quelllüftung etwa 60 cm Höhe) in den Raum und fallen dann, wie oben schon erwähnt, zu Boden, wenn sie groß genug sind, oder werden vom Luftstrom fortgetragen. Die Chancen, die Partikel haben,

auf diese Weise aufgewirbelt zu werden, sind aber durch die gegebenen Flächenverhältnisse sehr niedrig. Auf eine Bodenfläche von etwa 10 m² entfallen ein bis zwei Bodenluftauslässe mit einer Austrittsfläche von etwa 0,02 m². Schon vom Flächenverhältnis liegt die Wahrscheinlichkeit bei 1 : 500, daß Partikel durch Luft statt durch Füße aufgewirbelt werden. Das Beispiel zeigt, daß das Aufwirbeln von Staub kein ernsthaftes Argument gegen den Fußbodenauslaß sein kann. Man müßte höchstens das Herumlafen verbieten!

Im Hinblick auf Partikel, die von den Personen selbst abgegeben werden, ist die Quelllüftung natürlich erheblich günstiger als die Mischungsströmung. Da die Partikel direkt in die Auftriebsströmung gelangen, werden sie nach oben transportiert. Ihre Konzentration steigt ähnlich wie die Schadgaskonzentration vom Boden zur Höhe hin an, und da am Auslaß an der Decke die Konzentrationen beider Lüftungssysteme die gleichen sind, liegen die Werte bei der Quelllüftung im Aufenthaltsbereich niedriger. Und zwar in einer Größenordnung von 50% bei halber Raumhöhe.

Schlußbetrachtung

Quelllüftung ist ein Luftführungssystem, das sich in letzter Zeit verstärkt ausbreitet. In vielen Fällen hat dieses System große Vorteile gegenüber der Mischungsströmung. Trotzdem müssen die einzelnen Anwendungsfälle vorher gründlich überprüft werden. Die Anwendung erfordert sehr viel gründlichere Kenntnisse der Wärmeaustauschvorgänge im Raum, als es bei der Mischungsströmung nötig war.

Ein großes Anwendungsgebiet werden Fertigungshallen sein, hier liegen aber bis jetzt die wenigsten Erfahrungen vor. [H 060]

Literaturangaben

- [1] *Fitzner, K.*: Quelllüftung. Forschungsberichte aus dem Gebiet für Luft- und Trocknungstechnik, Heft 16, Mai 1986. Forschungsvereinigung für Luft- und Trocknungstechnik e.V., Lyoner Str. 18, 6 Frankfurt/M.
- [2] *Lärkfeldt, B.*: Full-Scale Tests for Determining Air Movements and Temperature Distributions, Roomvent -87, Stockholm June 1987.
- [3] *Fitzner, K.*: Luftführung in klimatisierten Sälen, Kl 1986, Heft 3.
- [4] *Fitzner, K.*: Schadstoffausbreitung in belüfteten Räumen bei verschiedenen Arten der Luftführung, HLH 32 (1981) Nr. 8, Seite 316/26.
- [5] *Sandberg, M., u. M. Sjöberg*: The Use of Moments for Assessing Air Quality in Ventilated Rooms. The National Swedish Institute for Building Research Vol. 18, No. 4, 1983.
- [6] *Helenius, T., O. Seppänen, A. Majanen u. J. Palonen*: Measurement of Air-Exchange Efficiency and Ventilation Effectiveness, Roomvent -87, Stockholm June 1987.
- [7] *Danielson, P.*: Convective Flow and Temperature in Rooms with Displacement Systems, Roomvent -87, Stockholm June 1987.
- [8] *Holmberg, R. B., K. Folkesson u. L.-G. Stenberg*: Experimental Analysis of Office Room Climate using various Air Distribution Methods, Roomvent -87, Stockholm June 1987.
- [9] *Socher, H.-H.*: Verdrängungslüftung zur Energieeinsparung, TAB 4/1985.
- [10] *Flathelm, G.*: Airconditioning without Draft and Noise, Indoor Air, 1984, Stockholm.
- [11] *Skåret, E.*: Ventilation Efficiency - A Guide to efficient Ventilation, ASHRAE Transaction 1983, V. 89.
- [12] *Sandberg, M., u. S. Lindström*: A Model for Ventilation by Displacement, Roomvent -87, Stockholm June 1987.
- [13] *Esdorn, H., H. Knebel u. R. Külpmann*: Air-Conditioning, New Horizons-New Opportunities, Indoor Air '87 Berlin, August 1987.
- [14] *Sandberg, M., u. M. Sjöberg*: A Comparative Study of the Performance of General Ventilation Systems in Evacuating Contaminants, Indoor Air, Stockholm, 1984.
- [15] *Christensen, N. K., O. Albrechtsen u. P. O. Fanger*: Air Movement and Draught, Indoor Air 1984, Stockholm.
- [16] DIN 1946 Teil 2: Raumluftechnik, Gesundheitstechnische Anforderungen, Januar 1983.
- [17] *Olesen, B. W., M. Scholer u. P. O. Fanger*: Discomfort Caused by Vertical Air Temperature Differences, Indoor Climate Copenhagen 1978.
- [18] DIN ISO 7730, Gemäßigtes Umgebungs-klima, Entwurf Oktober 1987.
- [19] *Fitzner, K.*: Luftströmungen in Räumen mittlerer Höhe bei verschiedenen Arten von Luftauslässen, Gesundheits-Ingenieur GI 97 (1976) Heft 12.
- [20] *Regenschait, B.*: Der Einfluß von Wärmequellen auf die Strömung im Reinraum mit turbulenzarmer Verdrängungsströmung, Reinraumtechnik I, 1973, Schweizerische Gesellschaft für Reinraumtechnik.
- [21] *Laux, H.*: Der Weg zum Quellluftinduktionsgerät für optimale Luftnutzung, HLH 39, (1988) Nr. 4.
- [22] *Dittes, W., u. R. Mangelsdorf*: Der Wärmetransport im Raum bei Luftführung von unten nach oben - theoretische Ansätze und experimentelle Überprüfung, HLH 32 (1981) Nr. 7, S. 265/71.
- [23] *Mierzwinski, S.*: Air Motion and Temperature Distribution above a Human Body in Result of natural Convection, Royal Inst. Technol. Stockholm, Nr. 45, (1980).
- [24] *Popiolek, K. Z.*: Problems of Testing and Mathematical Modelling of Plumes above Human Body and other Extensive heat Sources, Kungl. Tekniska Högskolan, Stockholm, A 4-Serien Nr. 54.
- [25] *Beckert J., u. R. Keller*: Spurengaskonzentrationsmessungen zur Untersuchung der Raumlüftströmungen in Operationsräumen, in Leistungsfähigkeit und Wirtschaftlichkeit von Krankenhaus und Umwelthygiene, Medizinische Hochschule Lübeck 1984, Rohrberg und Mildner Verlag.
- [26] *Adam, J.*: Beschwerdefreie Büroraumlüftung, TAB 3/87.
- [27] *Fißan, H.*: Partikeltransport zu Produktionsflächen, VDI-Bericht Nr. 654 (1987).
- [28] *Skåret, E.*: Displacement Ventilation, Roomvent -87, Stockholm June 1987.