



Klaus Fitzner

## Förderprofil einer Wärmequelle bei verschiedenen Temperaturgradienten und der Einfluß auf die Raumströmung bei Quelllüftung\*

*Der Luftvolumenstrom, der von einer Wärmequelle bei freier Konvektion nach oben gefördert wird, ist der entscheidende Antrieb der Raumströmung bei der Quelllüftung. Dieser Volumenstrom wurde deshalb unter verschiedenen Bedingungen gemessen.*

### **Airflow moved by buoyancy for various temperature gradients and its impact on the flow pattern of source flow.**

*The quantity of air carried toward the ceiling by natural convection from a warm body is the decisive impulse for room currents when ventilation is based on source flow. For this reason a series of measurements of airflow volumes under different conditions was conducted.*

### **Profil de transport d'une source de chaleur pour différents gradients de température et l'influence sur les courants d'air d'une ventilation forcée**

*Le volume d'air qui est déplacé par une source de chaleur par effet de convection libre représente le moteur essentiel du courant d'air d'une courant de source. A cet effet, on a mesuré ce volume sous différentes conditions.*

#### **Einleitung**

Über das Thema Quelllüftung ist in den vergangenen Jahren sehr viel veröffentlicht worden. Das qualitative Verhalten der Strömung kann als weitgehend bekannt betrachtet werden. Die Quelllüftung ist eine spezielle Form der Verdrängungsströmung von unten nach oben, bei der die Wärmequellen im Raum mehr Luft nach oben fördern, als Zuluft in den Raum gelangt.

Das Strömungsbild ist vollkommen anders als bei der Mischungsströmung, die bisher überwiegend in belüfteten Räumen angewendet wurde. Die Strömung hat aber auch nur wenig mit einer Verdrängungsströmung zu tun.

Die prinzipiellen Unterschiede zwischen Quelllüftung und Mischungsströmung sind bekannt [1], [2], [3]. Sie lassen sich am einfachsten durch die vertikalen Profile der Temperatur, der Konzentration und der Geschwindigkeit darstellen. Während bei der Mischungsströmung die gesamte Luft im Raum dauernd mit der Zuluft vermischt wird und dadurch im ganzen Raum nahezu konstante Temperatur- und Konzentrationsverteilung auftritt, steigen bei der Quelllüftung Temperatur und Konzentration im Raum von unten nach oben an. Während bei der Mischungsströmung im wesentlichen die Lufteinlässe die Strömung bestimmen, sind es bei der Quelllüftung die Wärmequellen. Die Mischungsströmung wird bestimmt vom hohen Impuls der Strömung am Einlaß, bei der Quelllüftung ist es der Impuls der Wärmequelle. Das Verhältnis von thermischen zu dynamischen Kräften ist bei der Quelllüftung um den Faktor 100 größer als bei der Mischungsströmung.

#### **Aufgabenstellung**

Bei der Quelllüftung bildet sich im Raum eine charakteristische Frischluftschicht am Boden aus. In dieser Schicht bildet sich je nach Verteilung der Zuluftdurchlässe eine Verdrängungsströmung oder eine horizontale Schichtenströmung aus, häufig mit entgegengesetzter Strömungsrichtung an der Unter- und Oberseite dieser Schicht. Die Höhe dieser Schicht ist von besonderem Interesse. Die Strömung oberhalb dieser Frischluftschicht wird bestimmt von den Wärmequellen im Raum. Typische Wärmequellen, wie Personen, fördern nämlich mehr Luft nach oben als an Zuluft in den Raum strömt. Sie bestimmen also das Strömungsbild. Deshalb ist es für das Verständnis der Strömung besonders wichtig zu wissen, wieviel Luft sie nach oben fördern.

Um die Gesetzmäßigkeit der Quelllüftung besser zu verstehen, wurde deshalb die Strömung an Wärmequellen im Raum untersucht. Im folgenden soll über zwei Teiluntersuchungen berichtet werden:

1. Ermittlung der Förderkennlinie einer Wärmequelle, die einer Person entspricht, und der Höhe der Frischluftschicht am Boden als Funktion des Förderprofils, des Zuluftstromes und des Temperaturgradienten im Raum.
2. Einfluß des Luftauslasses auf die Höhe der Frischluftschicht bei horizontaler und vertikaler Lufteinbringung.

Das Förderprofil über einer Person wurde experimentell und theoretisch unter anderem von [4], [5] untersucht. Während dieser Arbeit wurden auch Ergebnisse über den Einfluß des Temperaturgradienten [6] und inzwischen auch weitere experimentelle Ergebnisse über die vertikalen Volumenströme über Wärmequellen mitgeteilt [8], [9].

#### **Versuchsaufbau und -durchführung**

Ein Grund, weshalb erst jetzt Versuche unternommen werden, den Fördervolumenstrom von Personen zu ermitteln, liegt sicher auch darin, daß es verhältnismäßig schwierig ist, verlässliche Meßwerte zu bekommen. Es wurde deshalb hier versucht, das Förderprofil einer Person oder einer vergleichbaren Wärmequelle auf drei verschiedene Arten zu bestimmen:

1. Durch Integration der Geschwindigkeitsprofile an und über der Wärmequelle,
2. durch Volumenstrommessung nach der Nullmethode über der Wärmequelle und
3. indirekt durch Ermittlung der Frischluftschichthöhe in Abhängigkeit vom Zuluftstrom.

Die Versuche wurden im Originalmaßstab und im verkleinerten Maßstab (1:3) durchgeführt. Bei der Nullmethode wurde die Luft mit einer Absaughaube oberhalb der Wärmequelle mit einem Hilfsgebläse so abgesaugt, daß am Rand der Absaughaube keine Querströmung und neben der Absaughaube keine Auf- oder Abwärtsströmung eintrat. Die Temperaturprofile im Raum wurden durch Zusatzheizung so eingestellt, daß sie möglichst proportional zur Höhe verliefen.

#### **Ergebnisse**

Bild 1 zeigt das charakteristische Strömungsbild. Am Boden bildet sich bei horizontaler Lufteinbringung eine horizontale Luftschicht aus. Die Wärmequelle, ein beheizter Zylinder, fördert Luft nach oben. In halber Höhe ist am Umfang der Wärmequelle ein Turbu-

\* Manuskript eingereicht im Mai 1989  
Als Beitrag erweiterter Vortrag, gehalten auf dem XXII. Internationalen Kongreß für Technische Gebäudeausrüstung Berlin 1988

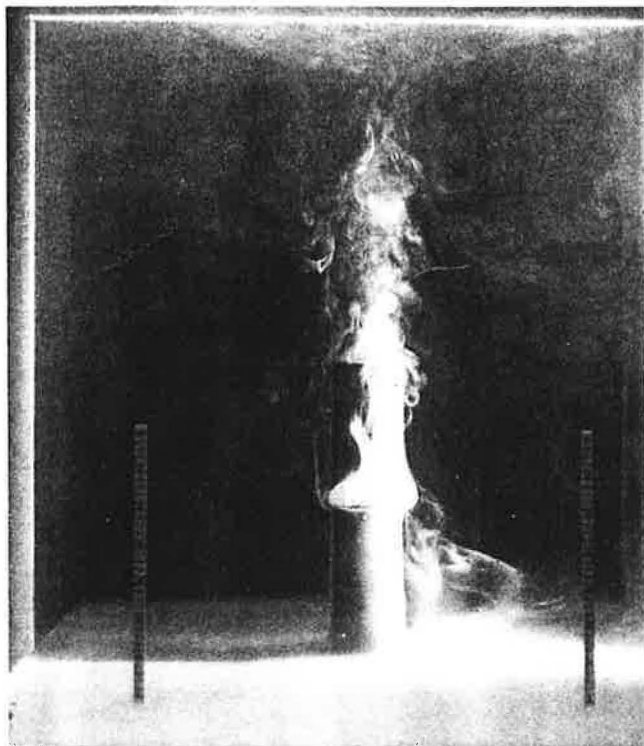


Bild 1 Typisches Strömungsbild der Quelllüftung

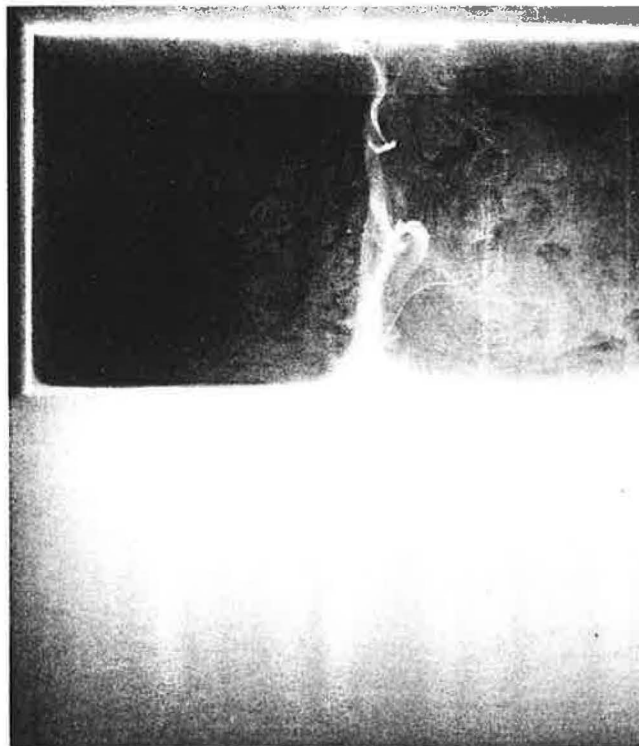


Bild 3 Die Frischluftschichthöhe erreicht die Höhe der Wärmequelle

lenzring angebracht, um den Umschlag der laminaren in die turbulente Strömung hervorzurufen.

Ändert sich der Zuluftstrom bei konstanter Heizung, so ändert sich die Höhe der Bodenschicht ungefähr proportional zum Volumenstrom, wie auf Bild 2 dargestellt. Beim entsprechendem Zuluftstrom kann die Wärmequelle auch in der Frischluftschicht versinken, wie auf Bild 3 gezeigt.

Das Ergebnis von Bild 2 wurde in einem verkleinerten Modell im Maßstab 1:3 gemessen. Zum Umrechnen auf den Maßstab 1:1 sind die Längen mit drei und die Volumenströme mit neun zu multiplizieren.

Bild 2 verdeutlicht, daß die Meßergebnisse, die nach verschiede-

nen Methoden (1 und 3) im Originalmaßstab und im Modell ermittelt wurden, gute Übereinstimmung zeigen. Wie die späteren Ergebnisse zeigen, liegt hier aber nur ein Spezialfall für einen bestimmten Temperaturgradienten vor.

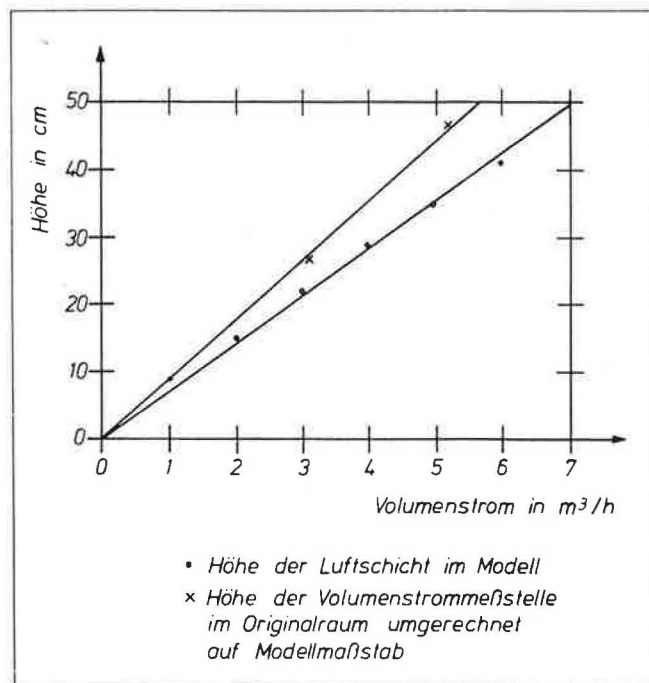


Bild 2 Höhe der Frischluftschicht als Funktion des Zuluftstromes

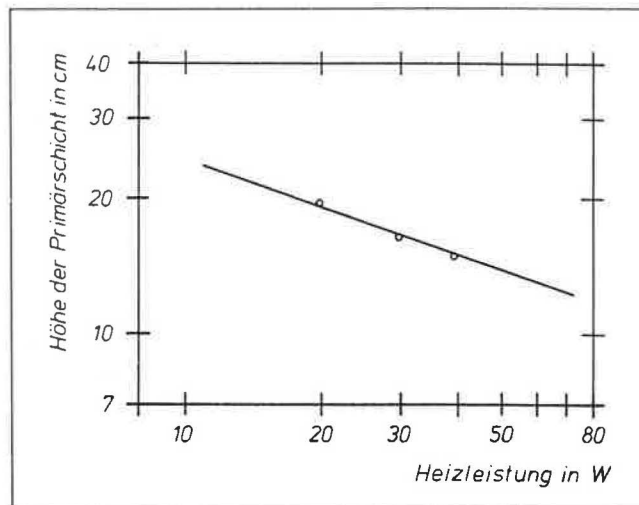


Bild 4 Frischluftschichthöhe bei variiert Heizleistung

In einem weiteren Versuch im Modell wurde bei konstantem Volumenstrom die Leistung der Wärmequelle variiert. Bild 4 zeigt als Ergebnis die Änderung der Frischluftschichthöhe. Sie nimmt wie erwartet mit der Leistung ab und zwar mit

$$H \sim Q^{1/3} \tag{1}$$

Das entspricht der erwarteten Änderung, denn nach [7] gilt folgender Zusammenhang für den von einer Wärmequelle geförderten Volumenstrom:

$$V_z = 5 \cdot 10^{-3} \cdot Q^{1/3} \cdot z^{5/3} \text{ l/s} \tag{2}$$

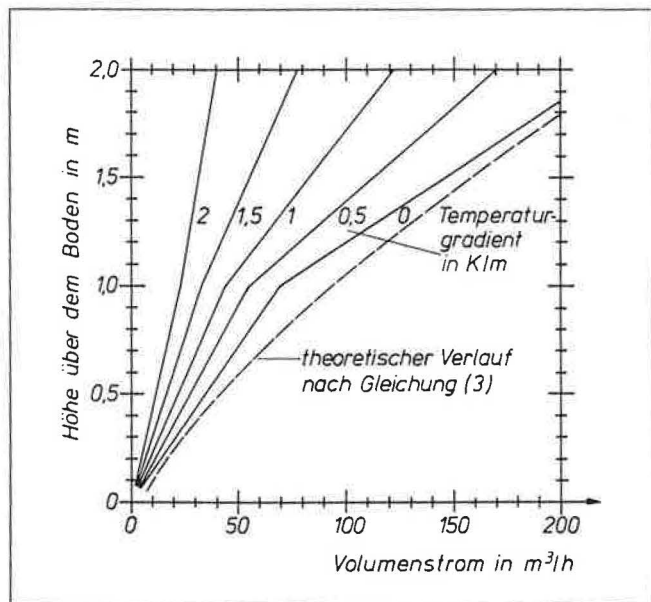
Q konvektive Wärmeleistung in W  
z Höhenkoordinate, bei einer Person ungefähr Höhe in m über dem Boden.

Formel (2) wird ebenfalls gut bestätigt durch neuere experimentelle Ergebnisse [8], [9], die als zusätzlichen Parameter den Durchmesser  $d$  der Wärmequelle enthalten:

$$V_z = 5 \cdot 10^{-3} \cdot Q^{1/3} (z + d)^{2/3} \quad (3)$$

Die Werte in Bild 4 geben nur die Änderung der Schichthöhe wieder. Wie die späteren Meßergebnisse zeigen, hat bei dem Modellversuch ein bestimmter Temperaturgradient vorgelegen. Die geringe Abhängigkeit des Fördervolumenstromes oder der Frischluftschichthöhe von der Leistung hat einen großen Vorteil für die Durchführung der Versuche. Bekanntlich geben die Wärmequellen ungefähr 50 % der Wärme konvektiv und 50 % durch Strahlung ab und zwar dann, wenn die Lufttemperatur ungefähr gleich der Temperatur der Raumwände ist. Unterschiede in den Temperaturen verändern das Verhältnis von Konvektion zu Strahlung. Wegen des geringen Einflusses einer Leistungsänderung auf die Schichthöhe sind die bei Temperaturabweichungen entstehenden Fehler verhältnismäßig gering.

Während der Einfluß der Leistung der Quelle auf den Volumenstrom gering ist, gibt es einen anderen Parameter, der einen ganz erheblichen Einfluß auf den Fördervolumenstrom einer Person hat. Auf Bild 5 sind die Ergebnisse aus verschiedenen Meßreihen gemittelt für verschiedene vertikale Temperaturgradienten im Raum wiedergegeben. Der Volumenstrom über dem Kopf einer Person beträgt etwa 100 m<sup>3</sup>/h und ist in 2 m Höhe etwa doppelt so hoch, bei einem Gradienten von 0 K/m. Er sinkt etwa auf die Hälfte bei einem Gradienten von 1 K/m. Die Ergebnisse in Bild 5 stimmen verhältnismäßig gut überein mit den Werten aus [6].



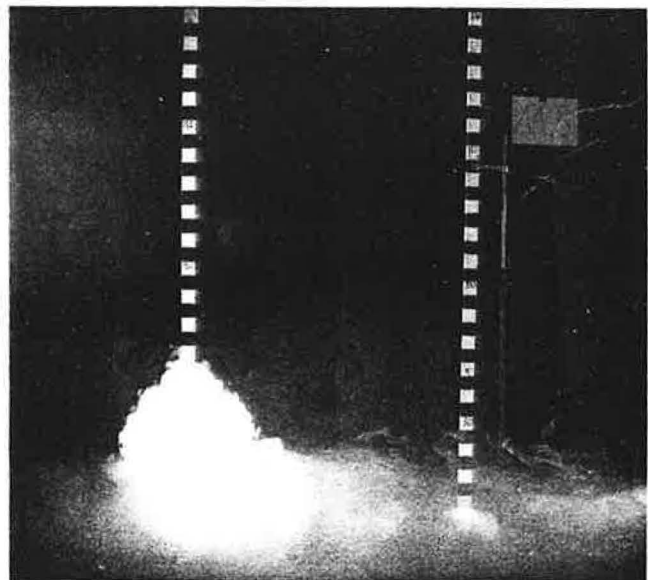
**Bild 5** Vertikaler Fördervolumenstrom einer Person bei unterschiedlichen Temperaturgradienten im Raum

Ebenfalls paßt der rechnerische Verlauf nach Formel (3) gut zu den Ergebnissen für den Gradienten null. Gerechnet wurde mit einer konvektiven Heizleistung von 37 W und einem Durchmesser der Quelle von  $d = 0,3$  m. Die Folge aus der Volumenstromabnahme bei höherem Temperaturgradienten ist, daß die Höhe der Frischluftschicht bei steigender thermischer Last im Raum nicht abnimmt, sondern sogar zunehmen kann. Das mag auch eine Erklärung dafür sein, weshalb bei stärkeren thermischen Lasten der Temperaturanstieg im Raum nicht mehr linear verläuft. Die Abnahme des Fördervolumenstromes hat eine reduzierte Rückströmung aus dem Deckenbereich zur Folge. Das führt zu erhöhtem Temperaturanstieg im Deckenbereich und damit zu einem nichtlinearen Temperaturanstieg, der dann vermutlich auch wieder das Förderprofil entsprechend verformt.

Ein Temperaturanstieg, vor allem im Deckenbereich, kann wünschenswert sein, um die Luftbewegung dort zu reduzieren. Im günstigsten Falle wird dort wieder eine Verdrängungsströmung erreicht, und die Schadstoffe werden nicht in den Aufenthaltsbereich zurückgeführt. Im Hinblick auf die Lüftungswirksamkeit wird es einen bestimmten optimalen Temperaturanstieg im Raum geben. Ein Nachteil ist zweifellos bei stärkerem Temperaturanstieg im Deckenbereich, daß die Decke selbst erwärmt wird und dadurch eine Wärmestrahlung von der Decke zum Boden einsetzt. Um diesen Effekt zu reduzieren, empfiehlt sich bei thermisch hoch belasteten Räumen, eine metallisch glänzende Decke zu verwenden, die etwa nur 10 % der Wärme des grauen Strahlers zurückstrahlt, oder eine Deckenkühlung vorzusehen, mit der sich der Bereich der thermischen Leistung des Gesamtsystems erheblich ausweiten läßt. Für kombinierte Systeme aus Quellluft und Deckenkühlung läßt sich aus den Ergebnissen auch schon ableiten, daß die Deckenkühlung so eingestellt werden sollte, daß ein bestimmter Temperaturgradient im Raum erhalten bleibt. Wenn 50 m<sup>3</sup>/h an Zuluft in den Raum eingebracht wird, sollte der Gradient etwa 1 K/m betragen. Es wird dadurch ungefähr der Anteil an Wärme konvektiv aus dem Raum gefördert, den die Person konvektiv einbringt.

Der zweite Teil der Untersuchung beschäftigt sich mit der Frage der Eindringhöhe eines vertikalen Luftstromes und der Ausbildung der Frischluftschichthöhe.

Bei der Lufteinbringung von unten stellt sich die Eindringhöhe entsprechend der Archimedeszahl ein, und sie ist unabhängig von der Höhe der Frischluftschicht, die durch den Zuluftstrom und die Wärmequellen bestimmt wird. Bild 6 zeigt ein Strömungsbild, bei dem die Eindringhöhe höher als die Frischluftschicht ist. In Bild 7 ist für den gleichen Strömungszustand der Verlauf der Isothermen dargestellt. Der schraffierte Bereich stellt die Frischluftschicht dar, deren Obergrenze im dargestellten Fall mit der 21°C-Isothermen zusammenfällt.



**Bild 6** Strömungsbild über einem Bodenluftauslaß mit der umgebenden Frischluftschicht

Die Lufteinbringung von unten stellt technisch einen interessanten Fall dar, weil mit verhältnismäßig tiefer Temperatur eingeblasen werden kann und dadurch die mit einem bestimmten Luftstrom einzubringende Kühlleistung erhöht wird.

Das wird jedoch erkauft durch stärkere Bewegung in der Frischluftschicht. Die Geschwindigkeit der bodennahen Schicht weg vom Auslaß vergrößert sich und an der Oberseite der Frischluftschicht setzt eine verstärkte Rückwärtsströmung ein.

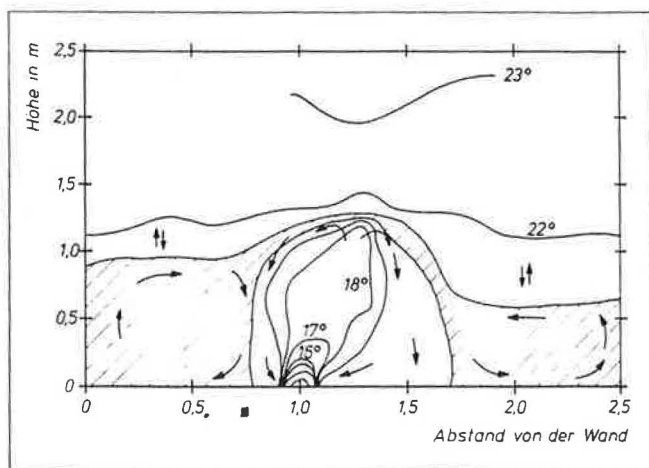


Bild 7 Isothermen bei Quelllüftung mit Bodenluftauslaß

### Zusammenfassung

Der Volumenstrom, der durch eine Wärmequelle in einer Quellluftströmung nach oben gefördert wird, wurde gemessen in Abhängigkeit vom Temperaturgradienten im Raum. Im Raum ohne Temperaturanstieg fördert eine Person etwa  $100 \text{ m}^3/\text{h}$  an Luft nach oben. Die Frischluftschichthöhe bei Quelllüftung ergibt sich als Funktion des Fördervolumenstromes der Quelle und des Zuluftstromes. Erheblichen Einfluß auf den Fördervolumenstrom hat der Temperaturgradient im Raum. Die Eindringhöhe von

Luftstrahlen, die von unten in den Raum eingebracht werden, beeinflußt nicht die Frischluftschichthöhe. Die Eindringhöhe ist eine Funktion der Archimedeszahl der Strömung aus dem Auslaß.

### Danksagung

Die hier beschriebenen Ergebnisse wurden zum größten Teil im Rahmen eines Forschungsvorhabens [10] ermittelt, das von der Forschungsvereinigung für Luft- und Trocknungstechnik finanziert wurde. Für diese Unterstützung soll hier gedankt werden.

### Literatur

- [1] Rödahl, E.: Ventilation Effectiveness – Past and Future Indoor Air 87, Berlin, Vol. 4, Institute for Water, Soil and Air Hygiene, Berlin 1987
- [2] Fitzner, K.: Impulsarme Luftzufuhr durch Quelllüftung HLH 39 (1988) Nr. 4
- [3] Laux, H.: Der Weg zum Quellluftinduktionsgerät für optimale Luftnutzung HLH 39 (1988), Nr. 4
- [4] Mierzwinski, S.: Air Motion and Temperature Distribution above a Human Body in Result of Natural Convection Royal Inst. Technol., Stockholm Nr. 45 (1980)
- [5] Popiolek, K. Z.: Problems of Testing and Mathematical Modelling of Plumes above Human Body and other Extensive Heat Sources Kungl. Tekniska Höskolan, Stockholm A-4 Serien Nr. 54
- [6] Danielsson, P.-O.: Convective Flow and Temperature in Rooms with Displacement-Systems Roomvent -87, Stockholm 1987
- [7] Nauck, H.: Grundlagen für die Beurteilung der Lüftung in wärmeintensiven Betrieben Luft- und Kältetechnik 1981/3
- [8] Kofoed, P.: P. V. Nielsen: Thermal Plumes in Ventilated Rooms. 3<sup>rd</sup> Seminar on „Application of Fluid Mechanics in Environmental Protection 88“ Silesian Techn. University, Gliwice
- [9] Nielsen, P. V.: Indoor Environmental Technology, DKV-Tagung München 1980
- [10] Fitzner, K.: Quelllüftung, Forschungsberichte aus dem Gebiet für Luft- und Trocknungstechnik, Heft 16, Mai 1986, Forschungsvereinigung für Luft- und Trocknungstechnik e. V. Lyoner Str. 186, Frankfurt/M.

# DAS FITNESS-CENTER FÜR IHR BUSINESS

Wer auf der Höhe der Zeit sein will, muß zur SHK – dem Treffpunkt der Branche. Haustechnik erleben, begutachten und miteinander darüber reden – das ist das Klima für gute Geschäfte.

Über 100.000 Fachleute und deren Kunden erwarten Sie und Ihr Angebot. Sie sollten also dabei sein.

Herzlich willkommen in Essen!

**MESSE  
ESSEN** 31.1. – 4.2.1990

Informationen: MESSE ESSEN GmbH · Messehaus Norbertstraße · Postfach 100165 · D-4300 Essen 1 · Telefon (0201) 72 44-0 · Telefax (0201) 72 44-4 48

