

Luftgeschwindigkeiten in Räumen mit Kühldecken

Kühldecken sind seit einigen Jahren immer häufiger im Gespräch, wenn es um neue Lösungen im Bereich der Klimatechnik geht, insbesondere wenn das Wohlbefinden der Nutzer, die möglicherweise eine negative Einstellung zu Klimaanlage haben, im Vordergrund steht. In diesem Zusammenhang spielen die Luftgeschwindigkeiten und Turbulenzgrade im Aufenthaltsbereich eine entscheidende Rolle.

Im folgenden wird die Abhängigkeit der Raumluftgeschwindigkeit von der Kühlleistungsdichte, bei vollkommen und nahezu geschlossenen Kühldecken, anhand von experimentellen Ergebnissen dargestellt und analysiert.

Dipl.-Ing. **Martin Behne**, Hermann-Rietschel-Institut für Heizungs- und Klimatechnik, Technische Universität Berlin

Kühldecken und Behaglichkeit

Die thermische Behaglichkeit von Personen in Räumen wird in erster Linie von Luft- und Strahlungstemperaturen sowie Raumluftgeschwindigkeiten und Turbulenzgrad bestimmt.

Glatt geschlossene Kühldecken nehmen etwa 50% der Kühlleistung durch Wärmestrahlung von Wänden, Möbeln und Personen auf, sofern sie eine lackierte oder verputzte Oberfläche haben. Der verbleibende Kühlleistungsanteil wird konvektiv aufgenommen. Die Strahlung bewirkt im Vergleich zur rein konvektiven Kühlung niedrigere Oberflächentemperaturen. Der Mensch empfindet eine solche Umgebung als sehr angenehm, vermutlich weil die konvektive Wärmeabgabe an der Hautoberfläche reduziert werden kann. Kühldecken mit hohem Strahlungsanteil (Strahlungskühldecke) sind daher im Hinblick auf die thermische Behaglichkeit besonders vorteilhaft [10].

Kühldecken kühlen die Raumluft sowohl direkt durch den Konvektivanteil als auch indirekt durch den Strahlungswärmeaustausch mit den Wänden. Die Lufttemperaturen im Aufenthaltsbereich werden dadurch vergleichmäßig, wobei die Anordnung der Wärmequellen von untergeordneter Bedeutung ist, sofern der größte Teil ($> 75\%$) der Raumkühlleistung von einer Strahlungskühldecke abgeführt wird. Bei geringen Raumkühlleistungen (ca. 30 bis 40 W/m^2) ist es sogar problemlos möglich, nur eine Deckenhälfte für die Raumkühlung zu verwenden, ohne daß eine spürbare Verschlechterung der thermischen Be-

haglichkeit (Luft- und Empfindungstemperaturdifferenzen) eintritt [1].

Die Untertemperatur der Oberflächen gegenüber der Raumluft und der Konvektivanteil der Kühldecke erzeugen Abtriebsströmungen [8], die verstärkt am Innenwandbereich eines Raumes auftreten, da die Außenwände infolge der äußeren Lasten höhere Oberflächentemperaturen aufweisen. Falls die Wärmequellen in einer Raumecke konzentriert sind, ist wegen der auftretenden, stark gerichteten Raumströmung („Raumwalze“) mit verstärkten abwärtsgerichteten Luftgeschwindigkeiten in einer gegenüberliegenden Raumecke zu rechnen (Bild 1a) [2].

Ziel der Untersuchung

Anhand von Messungen soll der Einfluß der Kühldeckenleistung auf die maximal im Raum auftretenden Luftgeschwindigkeiten untersucht werden. Hierbei sollen auch die Wirkung einer Wärmedämmung auf der Kühldeckenoberseite sowie der Einfluß des Strahlungsanteiles der Kühldecke berücksichtigt werden.

Da die Auftriebsströmung einer Wärmequelle einen entscheidenden Einfluß auf die Raumströmung hat, ist zu prüfen, inwieweit die Raumluftgeschwindigkeiten von der Kühldecke oder von den Wärmequellen verursacht werden. Hierzu wurden zwei unterschiedliche Kühllastanordnungen untersucht. In einem Fall wurden die Wärmequellen in einer Raumecke aufgestellt („Extremfall“, Bild 1a), während sie im anderen Fall im Raum gleichmäßig verteilt wurden („Normalfall“, Bild 1b).

Experimentelle Voraussetzungen

Die Versuche wurden in einem Modellraum mit Kühldecke durchgeführt (Bild 1a bzw. 1b). Eine Luftversorgung war nicht vorhanden. Die Kühldecke bedeckte ca. 90% der Raumdecke und hatte eine Rohrtteilung von 100 mm. Die Summe aller Fugen zwischen den Kühlpaneelen betrug etwa 10% der Gesamtdeckenfläche.

Die Kühldecke wurde für die ersten beiden Versuchsvarianten mit unlackierten Aluminiumplatten versehen. Dadurch wurde der Strahlungsanteil reduziert und die Luftbewegung im Raum verstärkt. Für die dritte Versuchsreihe wurden lackierte Deckenplatten verwendet, um den Strahlungseinfluß zu ermitteln.

Die gesamte Kühllast wurde durch elektrisch beheizte Wärmequellen, die einen Konvektivanteil von etwa 70% hatten, im Raum freigesetzt. Die Kühldeckenleistung wurde in Anlehnung an DIN 4715 [4] bestimmt. Die Luftgeschwindigkeiten wurden etwa 15 cm unterhalb der Kühldecke, in 1,10 m und 0,10 m Höhe mit Hitzdrahtanemometern gemessen. Die Meßorte sind in den Bildern 1a und 1b eingetragen.

Meßergebnisse

Die Meßergebnisse werden in Diagrammen und einer Tabelle dargestellt, wobei die aufgetragene Kühlleistungsdichte die spezifische Kühldeckenleistung ist, die aus dem Kühlwassermassenstrom und der Temperaturdifferenz zwischen Vor- und Rücklauf bestimmt wurde. Da nur die Luftgeschwindigkeiten im Aufenthaltsbereich für die Behaglichkeit von Bedeutung sind, werden diese grafisch dargestellt.

Einfluß der Wärmequellenanordnung

In Räumen mit Kühldecken, jedoch ohne Luftversorgung, sind die Raumluftgeschwindigkeiten eine Folge der freien Konvektion. Sie werden von der Kühldeckenleistung und den Auftriebsvolumenströmen der Wärmequellen verursacht.

Bild 2 zeigt die Meßergebnisse in einer Raumhöhe von 1,10 m bei asymmetrischer Kühllastanordnung (Bild 1a) sowie gleichmäßig verteilten Wärmequellen (Bild 1b).

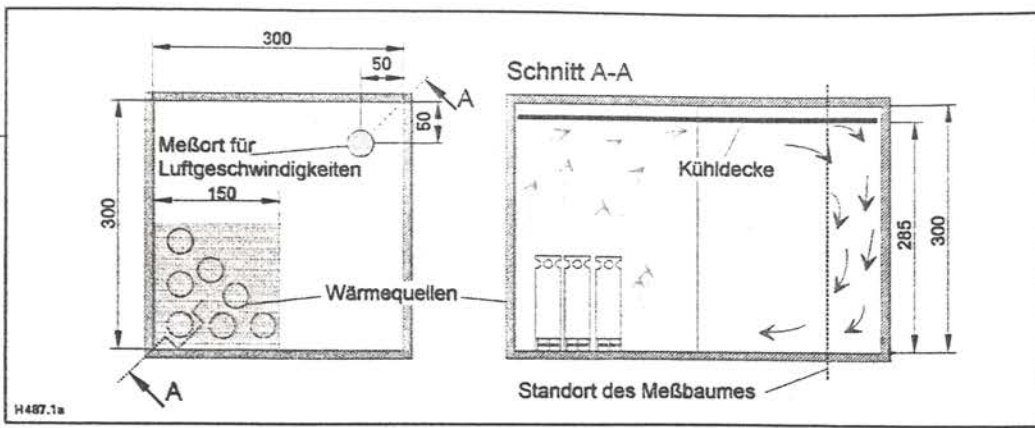


Bild 1a: Grundriß und Querschnitt des Versuchsaufbaus bei asymmetrischer Wärmequellenanordnung (Maße in cm).

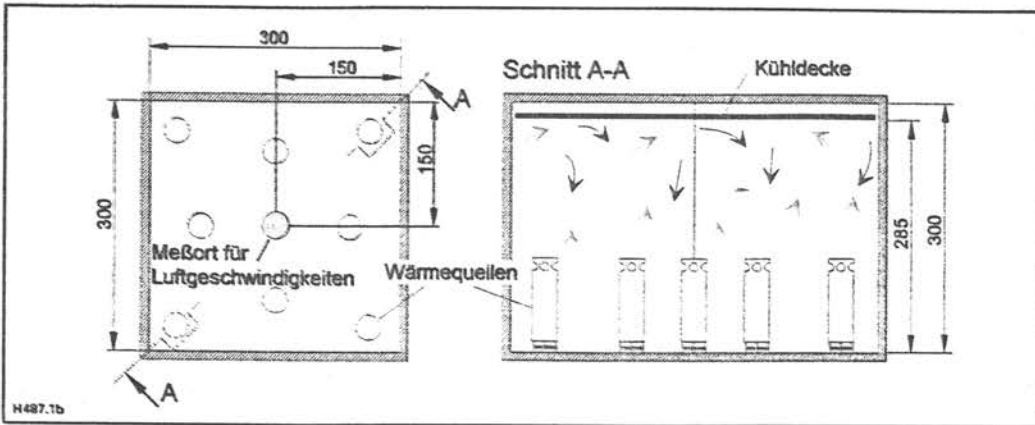


Bild 1b: Grundriß und Querschnitt des Versuchsaufbaus mit gleichmäßig verteilten Wärmequellen (Maße in cm).

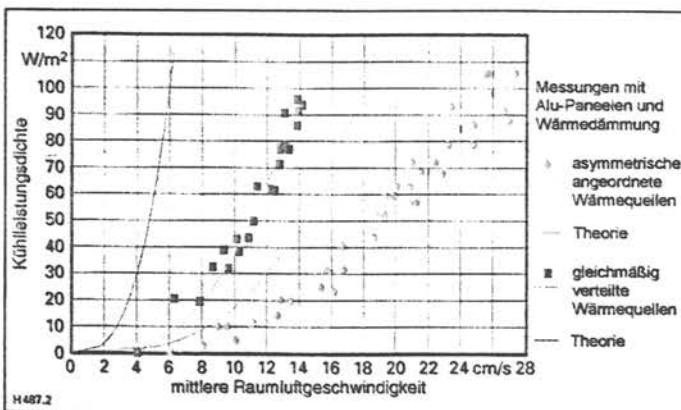


Bild 2: Einfluß der Wärmequellenanordnung auf die Raumluftgeschwindigkeiten (Messung mit Wärmedämmung).

Tabella 1: Kühlleistungsdichten und Raumluftgeschwindigkeiten der untersuchten Kühldecke bei einer Untertemperatur $\Delta\vartheta^*)$ von 10 K.

| | mit Wärmedämmung | | ohne Wärmedämmung (Normfall) | |
|----------------------------------|-------------------------------------|----------------------|-------------------------------------|----------------------|
| | Alu, blank | HK-Lack | Alu, blank | |
| | $\dot{q}_{KD,max}$ W/m ² | \bar{w}_{max} cm/s | $\dot{q}_{KD,max}$ W/m ² | \bar{w}_{max} cm/s |
| Wärmequellen verteilt (Normfall) | 65 | 13 | 70 | 10 |
| Wärmequellen in einer Raumecke | 70 | 25 | 75 | 22 |

$$*) : \Delta\vartheta = \frac{\vartheta_R - \vartheta_V}{\ln \frac{\vartheta - \vartheta_V}{\vartheta - \vartheta_R}} \quad [3]$$

mit:

- ϑ_V Kühldecken-Vorlauftemperatur
- ϑ_R Kühldecken-Rücklauftemperatur
- ϑ Bezugs-Raumtemperatur (gemessen mit einem Globusthermometer)

Die Kühldecke wurde mit einer Wärmedämmung auf der Oberseite sowie mit unbehandelten Aluminium-Paneelen betrieben.

Die in einer Raumecke aufgestellten Wärmequellen erhöhten durch die ver-

stärkte und gerichtete Raumluftströmung die Kühldeckenleistung um etwa 7 bis 12% (Tabella 1) gegenüber gleichmäßig im Raum verteilten Wärmequellen. Die Luftgeschwindigkeiten im Aufenthaltsbereich nahmen im Mittel um 80% zu.

Die Strömungsgeschwindigkeiten werden sowohl von den Wärmequellen als auch von der Kühldecke verursacht. Gut nachvollziehbar sind die geschwindigkeitsbestimmenden Vorgänge bei asymmetrischer Wärmequellenanordnung, da die Hauptraumströmung näherungsweise auf ein zweidimensionales Problem reduziert werden kann. Die über den Wärmequellen aufgestiegene Luft wird an der Decke umgelenkt (Beschleunigung), strömt an der Kühldecke entlang (Coanda-Effekt), wobei sie abgekühlt und nochmals beschleunigt wird. An den gegenüberliegenden Wänden wird sie wieder umgelenkt, strömt dann an diesen entlang und erreicht den Aufenthaltsbereich, wo die Geschwindigkeit gemessen wurde. Durch die Überlagerung mehrerer Mechanismen kann man nur sehr ungenau abschätzen, welchen Anteil an der Luftgeschwindigkeit die Kühldecke bzw. die Wärmequellen ausmachen, zumal der Auftriebsvolumenstrom einer Wärmequelle von einigen Randbedingungen abhängt (z. B. Konvektivanteil der Wärmequelle, Temperaturverteilung der Umschließungsflächen, Abstand zu Wänden oder anderen Wärmequellen).

Dennoch sind zur ersten groben Abschätzung in Bild 2 zusätzlich zwei theoretische Geschwindigkeitskurven eingezeichnet. Diese Kurven basieren auf folgenden Annahmen und Gleichungen:

- Der Auftriebsvolumenstrom mehrerer Wärmequellen sei genauso groß wie der einer Wärmequelle mit einer entsprechend höheren Leistung.
- Die freie Auftriebsströmung werde nicht durch Wände etc. behindert.

RLT/KÜHLDECKEN

- Die Wärmequellenleistung entspricht der Kühldeckenleistung.
- Die maximale Auftriebsgeschwindigkeit tritt unterhalb der Decke auf.

$$w_{\text{Auftrieb}} = \frac{\dot{V}_{\text{Auftrieb}}}{A_{\text{Wärmequelle}}} \quad (1)$$

mit:

$$\dot{V}_{\text{Auftrieb}} = K \cdot \dot{Q}_{\text{Wärmequelle}}^{1/3} \cdot h^{5/3} \quad (2)$$

$A_{\text{Wärmequelle}}$ Fläche, auf der die Wärmequellen stehen in m^2
 $\approx 1,5 m^2$ bei asymmetrischer Anordnung; $= 4,5 m^2$ bei symmetrischer Anordnung, da die Wärmequellen zwar auf der gesamten Fußbodenfläche ($9 m^2$) verteilt waren, aber nur die Hälfte dieser Fläche für die Auftriebsströmung zur Verfügung stand.

K experimentell ermittelter Faktor; $K = 0,0051$ (für freistehende Wärmequelle mit etwa 50% Konvektivanteil) [7].

h Höhe über dem Fußboden in m; hier: Versuchsraumhöhe = 2,85 m

$\dot{Q}_{\text{Wärmequelle}}$ Wärmeabgabe der Wärmequelle in W.

Beim Vergleich mit den experimentellen Kurven ist zu erkennen, daß die gleiche Charakteristik ($w \sim \dot{q}^{1/3}$) vorliegt. Die gemessene Luftgeschwindigkeit scheint zu einem erheblichen Teil von der Auftriebsströmung der Wärmequellen sowie deren Anordnung verursacht zu werden.

Einfluß einer Wärmedämmschicht

Strahlungskühldecken bestehen meist aus einem von der Raumdecke abgehängten Kühlrohrnetz, an welches die Deckenplatten montiert werden. Um einen guten Wärmefluß zu erreichen, werden Wärmeleitprofile zwischen den Kühlrohren und den Deckenplatten eingesetzt. Die von den Deckenplatten gebildete raumseitige Kühldeckenoberfläche kann vollkommen geschlossen sein, oder es können zwischen den Paneelen Luftzwischenräume bleiben.

Die eingesetzte Kühldecke wurde mit und ohne Wärmedämmung auf der Oberseite betrieben, wobei unlackierte Aluminiumplatten verwendet wurden. Die Wärmedämmschicht bestand aus 30 mm Polystyrol, welches direkt auf die Kühlrohre aufgelegt wurde. Die Fugen zwischen den Deckenplatten wurden dadurch geschlossen, und eine Luftzirkulation durch den Deckenhohlraum konnte nicht stattfinden.

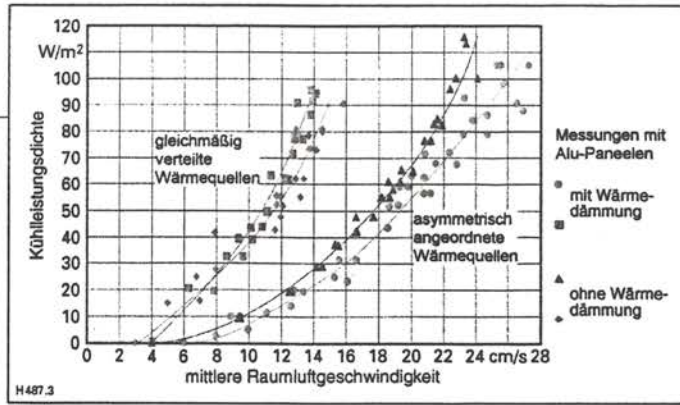


Bild 3: Einfluß der Wärmedämmung auf die Luftgeschwindigkeit (asymmetrische Wärmequellenanordnung).

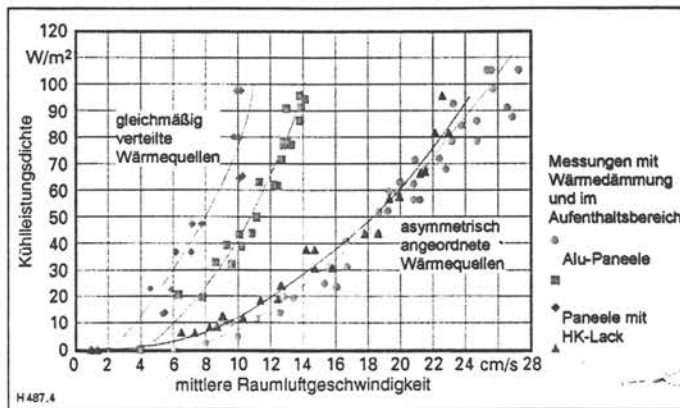


Bild 4: Einfluß des Strahlungsanteiles auf die Luftgeschwindigkeit im Aufenthaltsbereich (Messungen mit Wärmedämmung auf der Kühldeckenoberseite).

In Bild 3 sind die maximalen Luftgeschwindigkeiten im Aufenthaltsbereich mit und ohne Wärmedämmung für die asymmetrische und die gleichmäßige Wärmequellenanordnung eingetragen. Man sieht, daß bei asymmetrisch angeordneten Wärmequellen die geschlossene Kühldecke etwas höhere Geschwindigkeiten verursacht, während bei verteilten Wärmequellen kein Unterschied erkennbar ist. Eine geschlossene Kühldecke wirkt auf eine gerichtete Raumströmung demzufolge weniger „bremsend“ als eine teilweise offene.

Die Auftriebsvolumenströme werden an einer Decke mit Luftspalten aufgeteilt, so daß sich die Raumströmung weniger stark ausprägen kann. Ein Teil der aufgestiegenen Luftmenge gelangt durch die Fugen in den Deckenhohlraum und strömt von dort abgekühlt zurück in den Raum. Der restliche Teil strömt an der Deckenunterseite entlang, bis ein Hindernis (Wand) oder die Schwerkraft eine Ablenkung nach unten bewirkt.

Wenn Kühldecken ohne Wärmedämmung eingesetzt werden und die Abluft nicht im Deckenhohlraum abgesaugt wird, trägt die Kühldeckenoberseite auch zur Raumluftkühlung bei (vergleiche Tabelle 1). Bei der Auslegung von Kühldecken ist auf diesen Sachverhalt zu achten, da die Normleistung nach DIN 4715 ohne Wärmedämmung bestimmt wird. Soll die DIN-geprüfte Kühldecke dann mit Wärmedämmung auf der Oberseite eingebaut werden, ist mit einer geringeren Kühlleistung zu rechnen. Bei der hier untersuchten Kühldecke wurden Minderleistungen von über 30% festgestellt.

Einfluß des Strahlungsanteiles

Der Strahlungsanteil einer geschlossenen Kühldecke hängt bei gleichbleibendem Temperaturniveau im Raum vom Emissionsvermögen der Oberfläche und von der Luftgeschwindigkeit in Deckennähe ab.

Üblicherweise sind Kühldeckenoberflächen lackiert, beschichtet oder mit einem dünnen Akustikvlies kaschiert. Bei diesen Oberflächen beträgt der Emissionsgrad ϵ etwa 90%, und der Strahlungsanteil beträgt bei ungerichteten Raumströmungen ca. 50%.

Um den Einfluß des Strahlungsanteiles zu beurteilen, wurden Versuche sowohl mit unbehandelten Aluminium-Paneele, die einen geringen Emissionsgrad ($\epsilon \approx 0,2$ [11]) haben, als auch mit lackierten Deckenplatten durchgeführt.

Bild 4 zeigt die Meßergebnisse im Aufenthaltsbereich bei asymmetrisch und gleichmäßig angeordneten Wärmequellen. Die Kühldecke wurde mit einer Wärmedämmung auf der Oberseite betrieben.

Aufgrund der reduzierten Konvektion sind die Luftgeschwindigkeiten bei den Versuchen mit lackierten Deckenplatten geringer als mit unlackierten Aluminiumpaneelen. Bei gleichmäßig verteilten Wärmequellen sind diese Unterschiede deutlich, während bei der asymmetrischen Wärmequellenanordnung kaum Unterschiede vorhanden sind. Die Strahlungseigenschaften einer geschlossenen Kühldecke haben demzufolge nur einen geringen Einfluß auf die Luftgeschwindigkeiten in der Aufenthaltszone, wenn eine stark gerichtete Raumluftströmung vorliegt. Offensichtlich werden in diesem Fall die Luftge-

schwindigkeiten in erster Linie von den Auftriebsvolumenströmen der Wärmequellen verursacht, denn der reduzierte Konvektivanteil der Kühldecke wirkt sich nur schwach aus. Dafür spricht auch, daß bei allen Messungen mit asymmetrischer Raumlast die Lufttemperatur am Ort der Geschwindigkeitsmessung immer um 0,2 bis 0,5 K wärmer war als die mittlere Lufttemperatur. Das bedeutet, daß die Luftbewegung am Meßort von den Wärmequellen ausgelöst wurde.

Beurteilung der Meßergebnisse

Beim Vergleich der Geschwindigkeitskurven (Bilder 2, 3 und 4) sind die für die Praxis relevanten maximalen Kühlleistungsdichten der untersuchten Kühldeckenkonstruktion zu berücksichtigen. Diese sind in Tabelle 1 zusammengestellt. Für den üblichen Anwendungsfall kann die Normleistung nach DIN 4715 [4] als maximal möglich angesehen werden. Die in den Bildern eingetragenen höheren Kühlleistungsdichten sind nur mit sehr niedrigen Vorlauftemperaturen erreichbar. Die in Tabelle 1 aufgeführten Luftgeschwindigkeiten sind daher als oberste Grenzwerte zu betrachten.

Bild 5 zeigt die ermittelten Turbulenzgrade als Funktion der Luftgeschwindigkeiten für die asymmetrische Wärmequellenanordnung. Weder eine Wärmedämmung auf der Kühldeckenoberseite, noch der Strahlungsanteil, haben einen Einfluß auf den Turbulenzgrad, der im gesamten Geschwindigkeitsbereich annähernd konstant ist.

Ein oberflächlicher Vergleich der dargestellten Meßergebnisse mit den üblichen Behaglichkeitskriterien (Bild 6) würde ergeben, daß in Räumen mit Kühldecken unbehagliche Luftgeschwindigkeiten vorliegen können, wenn die Raumlufttemperatur niedriger als 26 °C sein soll.

Hierbei ist jedoch zu beachten, daß die Auftriebsvolumenströme der in den Versuchen verwendeten Wärmequellen besonders hoch waren. Zum einen hatten die Wärmequellen einen verhältnismäßig hohen Konvektivanteil, und zum anderen war die für die Raumströmung zur Verfügung stehende, freie Auftriebshöhe optimal (alle Wärmequellen standen auf dem Fußboden). Daher stellen die Versuchsbedingungen, insbesondere der asymmetrische Kühllastfall, ungünstige Verhältnisse dar. In realen Räumen wird sich zumindest ein Teil der Wärmequellen auf Tischen (z. B. Computer, Kopierer) oder an der Decke (Beleuchtung) befinden, wodurch sich die Auftriebsvolumenströme weniger stark entwickeln können. Außerdem werden die Raumlasten überwiegend verteilt angeordnet sein, so daß die bei gleichmäßig ver-

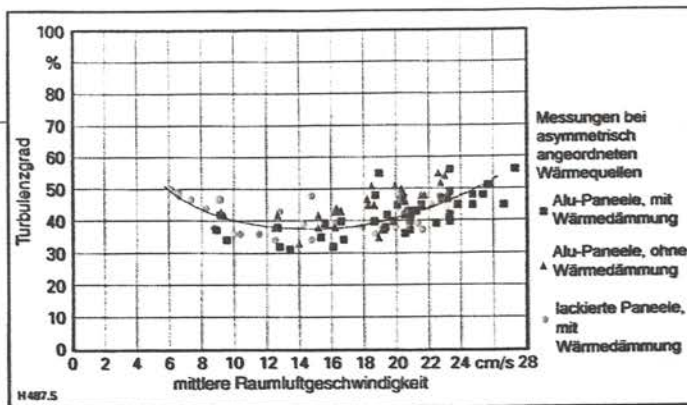


Bild 5: Turbulenzgrade als Funktion der mittleren Luftgeschwindigkeit bei asymmetrischer Wärmequellenanordnung.

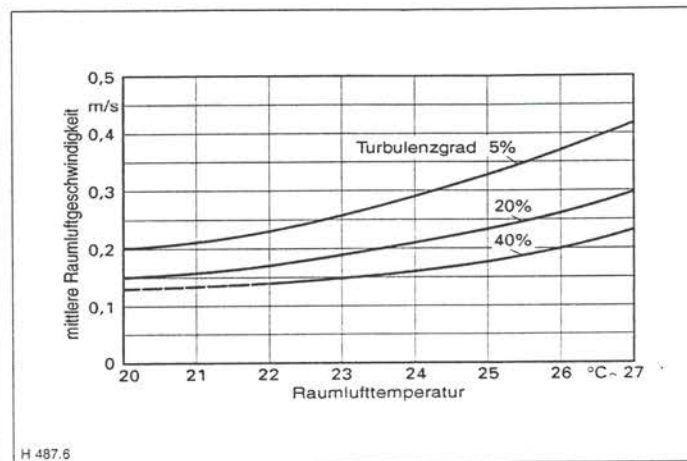


Bild 6: Zulässige Raumluftgeschwindigkeiten in Abhängigkeit der mittleren Lufttemperatur und des Turbulenzgrades (nach DIN 1946, Teil 2 [3]).

teilten Wärmequellen gemessenen Luftgeschwindigkeiten für die meisten Anwendungsfälle eher zutreffend sind.

Darüber hinaus sollte berücksichtigt werden, daß die kritischen Luftgeschwindigkeiten nur in Kombination mit Lufttemperaturen gemessen wurden, die 0,2 bis 0,5 K oberhalb der mittleren Raumlufttemperatur lagen, so daß diese abwärtsgerichteten Volumenströme nicht als Kaltluftströme bezeichnet werden können.

Des weiteren spielt die normalerweise vorhandene Zuluftführung eine wichtige Rolle. Wird beispielsweise Quelllüftung (Kühllastanteil \approx 10 bis 20%) eingesetzt, dann nehmen die Auftriebsvolumenströme aufgrund des in der Aufenthaltszone gestiegenen vertikalen Temperaturgradienten (etwa 0,5 bis 1,0 K/m) ab [6], und die Raumluftströmung wird weniger stark ausgeprägt sein.

Zusammenfassung

Die dargestellten Meßergebnisse zeigen eine deutliche Abhängigkeit der im Raum auftretenden Luftgeschwindigkeiten von den Auftriebsvolumenströmen der Wärmequellen sowie von der Kühldeckenleistung.

Die maximalen Geschwindigkeitswerte wurden bei asymmetrischer Kühllastanordnung gemessen und betragen bei realistischen Kühlleistungen bis zu 25 cm/s. Den entscheidenden Einfluß hierbei haben die Auftriebsvolumenströme der Wärmequellen, die eine ausgeprägte Raumluftströmung verursachen, wenn sie nur in einem Raumbereich konzentriert sind. Eine Kühl-

decke unterstützt diese Luftbewegung. Da die Auftriebsvolumenströme im Normalfall geringer bzw. weniger ausgeprägt sein werden als in den dargestellten Versuchen, kann davon ausgegangen werden, daß in Räumen mit geschlossenen Kühldecken im Aufenthaltsbereich Luftgeschwindigkeiten unterhalb von 15 cm/s auftreten.

Der Turbulenzgrad ist in einem Raum, der nur mit einer Kühldecke ausgestattet ist, nahezu unabhängig von der mittleren Luftgeschwindigkeit und beträgt etwa 40% [H 487]

Literaturangaben

- [1] Behne, M.: Der Einfluß der Kühlflächenanordnung auf die thermische Behaglichkeit. HLH 44 (1993), Nr. 7.
- [2] Behne, M.: Der Einfluß der Kühlflächenanordnung auf die Raumluftströmung. CLIMA 2000 Konferenz: London 1993, veröffentlicht im Kongreßband (CD-ROM).
- [3] DIN 1946, Teil 2: Raumlufttechnik - Gesundheitstechnische Anforderungen (VDI-Lüftungsregeln); 1/1994, Beuth-Verlag, Berlin.
- [4] DIN 4715: Raumkühlflächen - Leistungsmessung bei freier Strömung. Entwurf 4/93. Beuth-Verlag, Berlin.
- [5] Fanger, P.O., A. K. Melikov, H. Hanzawa u. J. Ring: Air Turbulence and Sensation of Draught. Energy and Buildings 12; 1988.
- [6] Fitzner, K.: Förderprofil einer Wärmequelle bei verschiedenen Temperaturgradienten und der Einfluß auf die Raumströmung bei Quelllüftung. KI 1989, Nr. 10.
- [7] Kofeod, P., u. P. V. Nielsen: Thermal Plumes in Ventilated Rooms - Measurements in Stratified Surroundings and Analysis by Use of an Extrapolation Method. Roomvent 1990; Oslo.
- [8] Krieger, B.: Fallströmungen vor Abkühlflächen in Gebäuden und mögliche Schutzmaßnahmen. Dissertation TU-Berlin; 1973.
- [9] Krühne, H.: Einfluß konvektiver Wandströmungen auf die Luftqualität bei Quelllüftung. HLH 44 (1993), Nr. 7.
- [10] Kämpmann, R.: Untersuchungen zum Raumklimatisierungskonzept Deckenkühlung in Verbindung mit aufwärtsgerichteter Luftführung. Dissertation TU-Berlin 1991.
- [11] VDI: VDI-Wärmeatlas - Berechnungsblätter für den Wärmeübergang. 6. Auflage 1991. VDI-Verlag Düsseldorf.