

Messungen unter praxisnahen Bedingungen

Leistungsverhalten von Kühldecken

Von Bernd Glück und Heiko Schiller

Die Leistungsfähigkeit von Kühldecken ist eines der wichtigsten Kriterien für deren Einsatz oder für die Auswahl eines Produktes. Bisher fehlen jedoch sowohl Normen als auch eine vorübergehende Verständigung der Hersteller zu einer einheitlichen meßtechnischen Bestimmung, Darstellung oder Berechnung der spezifischen Kühldeckenleistung und ihrer Einflußfaktoren. Im klimatechnischen Labor der Firma ROM in Hamburg wurden erste Erfahrungen und Ergebnisse bei der Bestimmung der spezifischen Kühlleistung an geschlossenen Kühldecken gewonnen. Anliegen dieser Arbeit war es, eine reproduzierbare Grundlage für Messungen an weiteren Kühldeckenfabrikaten zu schaffen. Denn nur dadurch ist eine objektive Vergleichbarkeit der Produkte für Anlagenbauer und Kunden gegeben.

Hamburg. Kühldecken lassen sich grundsätzlich in offene und geschlossene Decken einteilen. Bei offenen Kühldecken sind die Einflußfaktoren - vor allem auf den konvektiven Leistungsanteil - wesentlich vielschichtiger und produktabhängiger. Geschlossene gekühlte Oberflächen unterliegen dagegen, sieht man einmal von geringen Unterschieden bei Oberflächenstruktur und Emissionsgrad ab, den gleichen physikalisch bedingten thermischen Wärmeübergangsbedingungen. Erfolgt in einem Raum keine nennenswerte mechanisch erzeugte Luftzirkulation, hängt die Kühldeckenleistung nur von der Deckenoberflächentemperatur

und strömungstechnische Untersuchungen erforderlich. Außerdem waren die für die Behaglichkeit relevanten Luft- und Strahlungstemperaturen sowie deren globale Erfassung im Einsatzbereich von Kühldecken von Interesse. Leistungsmessungen waren als Bestandteil dieser Untersuchungen geplant; der Modellraum wurde jedoch nicht als reiner Leistungsprüfstand ausgeführt. Die Grundfläche des Modellraumes mit den Maßen 7,20 m x 4,50 m beträgt ca. 32 m². Der Raum ist mit einem Doppelboden ausgerüstet. Die Decke, eine Längswand, die Fensterwand sowie das Fenster können thermisch aktiviert - d. h. geheizt oder gekühlt werden. Die lichte Raumhöhe beträgt ca. 2,80 m. Die Raumwände enthalten eine 10 mm dicke Wärmedämmung, die verglaste Sichtfront besteht aus Wärmeschutzglas. Die Kühldecke und die Kühlwände bestehen aus insgesamt elf Segmenten, die in fünf Zonen gleicher Temperatur zusammen-

gefaßt und an fünf kombinierte Heiz- oder Kühlkreise angeschlossen sind. Somit ist die Möglichkeit gegeben, neben dem Betrieb der Kühldecke die verschiedensten Arten von großflächiger Lasteinbringung sowohl für den Sommerfall als auch für den Winterfall nachzubilden. Ein zusätzlicher Heiz- oder Kühlkreis gestattet den Anschluß einer weiteren Temperaturzone, vorzugsweise einer zusätzlich abgehängten offenen Kühldecke, wobei dann die Simulation des Speicherverhaltens der Massivdecke möglich ist. Die Medienversorgung erfolgt durch einen indirekten Anschluß an das Heiznetz und durch einen separaten Kaltwassersatz. Die sechs Temperaturregelkreise sind je nach Bedarf umschaltbar an die Warm- und Kaltwasserverteilungsleitungen differenzdrucklos angeschlossen. Die Regelung erfolgt durch Drei-Wege-Stellventile mit sechs separaten Regelkreispumpen, um eine mengenstromkonstante Versorgung der

Heiz- und Kühlflächen zu sichern. Zum Ausgleich von Temperaturschwankungen die durch Schaltvorgänge des Kaltwassersatzes verursacht werden, wurde in die Kaltwasserverteilungsleitung ein 2000 l Pufferspeicher eingebunden.

Die Luftaufbereitung erfolgt im reinen Umluftbetrieb über ein Klimagerät mit Heiz- und Kühlfunktion. Für die Zuluft einbringung besteht die Möglichkeit, durch einen Schlitzdurchlaß unter der Decke einen turbulenten Deckenstrahl oder eine turbulenzarme Verdrängungsströmung durch einen Quellaufblaskanal über dem Fußboden zu erzeugen. Die Abluft wird durch ein Gitter unterhalb der Decke abgesaugt.

Die Beleuchtung des Raumes kann wahlweise mit Einbau- oder Pendelleuchten erfolgen. Die Simulation von Personen- und Maschinenwärme erfolgt durch Dummys. Wärmelasten infolge einfallender Sonnenstrahlung werden neben einer

Strahlung und Konvektion erfolgt, muß die Beschreibung des thermischen Raumzustandes eine Verknüpfung von Raumlufttemperaturen und Oberflächentemperaturen des Raumes sein.

In [1] wurde anhand eines typischen Büroraumes der Strahlungs- und Konvektionswärmestrom einer Kühldecke, d. h. die spezifische Kühlleistung $\dot{q}_k$, unter verschiedenen Arten der Lasteinbringung rechnerisch simuliert. Die Ergebnisse zeigten eine gute Übereinstimmung mit der Basiskennlinie der Fußbodenheizung [2].

$$\dot{q}_k = 8,92 (t_i - t_D)^{1,1} \text{ in W/m}^2 \quad (1)$$

Bemerkenswert ist, daß die physiologische Größe Raumtemperatur oder "empfundene" Temperatur t_i neben der mittleren Deckentemperatur t_D direkten Eingang in die physikalisch bedingte Systemauslegung findet.

Diese Basiskennlinie läßt sich auf nahezu beliebig ausgeführte geschlossene Kühldecken übertragen. Die Reduzierung der Untersuchungen auf die Wärmeleitvorgänge innerhalb der Kühldecke gestatten dann einen wesentlich verringerten meßtechnischen Aufwand oder die Anwendung analytischer und numerischer Lösungen.

Die nachfolgend beschriebenen Messungen hatten den speziellen Vergleich einer rechnerischen und gemessenen Kennlinie für eine geschlossene ROMTEC I- Paneeldecke zum Ziel.

Kühldeckenmodellraum

Vor allem wegen des konvektiven Anteils der Wärmefaufnahme war die Errichtung eines Kühldeckenmodellraumes für thermodynamische

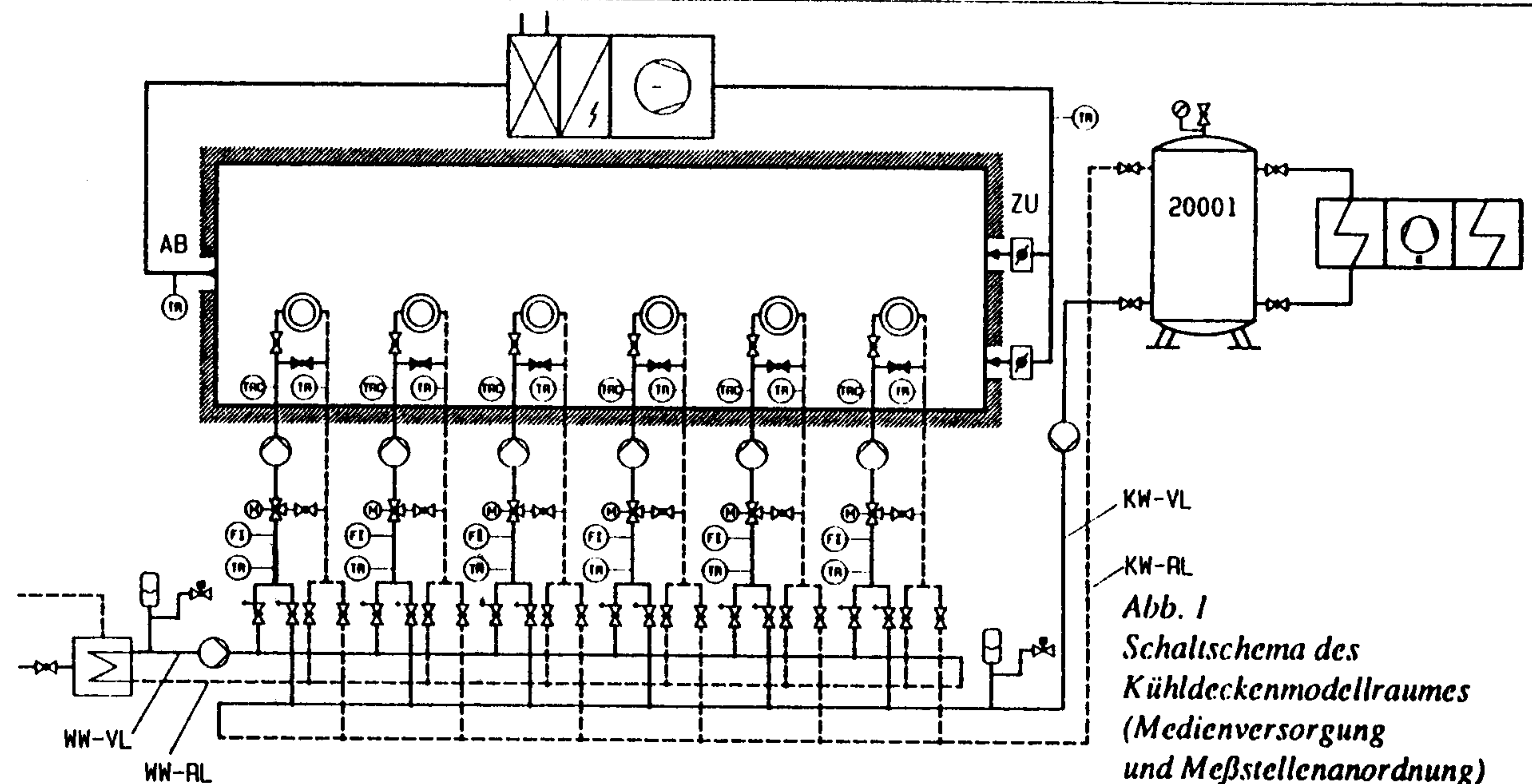


Abb. 1
Schaltschema des
Kühldeckenmodellraumes
(Medienversorgung
und Meßstellenanordnung)

erwärmten Fensterfläche durch Heizmatten auf dem Fußboden nachgebildet.

Die komplette Anlagenschaltung ist in Abb. 1 wiedergegeben.

Meßtechnik

Die Erfassung der Meßdaten erfolgte über eine digitale Meßdatenerfassungsanlage. Die Daten konnten im On-Line-Betrieb erfaßt, grafisch dargestellt und gespeichert werden. Ausgenommen waren die Messung des Kühlwassermassestromes und die Oberflächentemperaturen.

Durchflußmessung

Die Durchflußmessung erfolgte durch Schwebekörperdurchflußmesser verschiedener Meßbereiche im mengenstromvariablen Teil der Regelzone. Bei vorgegebener Vorlauftemperatur der Kühldecke kann dabei die für die Leistungsmessung benötigte Temperaturdifferenz durch die Primärkaltwassertemperatur im Pufferspeicher beeinflußt werden. Für den relativen Gesamtfehler der Leistungsmessung gilt der Zu-

$$\theta_{\text{opt}}^2 = \frac{2 \Delta t \dot{Q}_k}{c_p \Delta m} \quad \rightarrow \quad |\theta_{\text{opt}}| = \sqrt{\frac{2 \Delta t \dot{Q}_k}{c_p \Delta m}} \quad (3)$$

bei der der relative Fehler für die Kühlleistung folgendes Minimum erreicht:

$$\frac{\Delta \dot{Q}_k}{\dot{Q}_k} \Big|_{\text{min}} = \sqrt{\frac{8 c_p \Delta t \Delta m}{\dot{Q}_k}} \quad (4)$$

Die aufgeführten Gleichungen lassen folgende Schlußfolgerungen zu:

1. Bei einer Meßeinrichtung gemäß Abb. 1 existiert eine Reglerstellung des Mischventils, bei dem der relative Gesamtfehler der Leistungsmessung minimal ist.
2. Es ist daher sinnvoll, die Leistungsmessung im mengenstromvariablen Teilabschnitt vorzunehmen.
3. Die absolute Größe der Kühlleistung (damit auch die Kühlfläche) hat Einfluß auf die optimale Reglerstellung und damit auf den relativen Meßfehler. Dies ist insbesondere auch bei Messungen im Teillastbereich zu beachten.
4. Bei Beachtung der optimalen

Dazu wurden die Raumschließungsflächen in insgesamt 32 Zonen unterteilt, die Einstrahlzahlen berechnet und mit den gemessenen mittleren Oberflächentemperaturen zur Strahlungstemperatur verknüpft. Daneben gibt es die Möglichkeit der meßtechnischen Bestimmung der empfundenen Temperatur mittels Schwarzkugelthermometer. Nach einer Anregung aus [3] kam ein Thermometer (Pt 100) mit einer dünnen mattschwarzen Glaskugel (40 mm Außendurchmesser) zum Einsatz. Der Vergleich von gemessener Schwarzkugeltemperatur und errechneter Raumtemperatur zeigt für einfache Raummöblierung eine gute Übereinstimmung.

Bei Nachbildung realer Möblierungsvarianten wird die Messung der Oberflächentemperaturen und die Berechnung der Strahlungstemperatur zunehmend aufwendiger und ungenauer. Besondere Schwierigkeiten bereitet die exakte Bestimmung der mittleren Oberflächentemperatur des Teppichbodens, die durch eine relativ große Einstrahlzahl die Strahlungstemperatur er-

sammenhang

$$\frac{\Delta \dot{Q}_k}{\dot{Q}_k} = \frac{c_p \Delta \dot{m}}{\dot{Q}_k} \vartheta' + \frac{2 \Delta t}{\vartheta'} \quad (2)$$

Dabei stellt ϑ' die Differenz aus Rücklauf- und Primärvorlauf-temperatur dar. Da diese durch zwei Einzeltemperaturmessungen erfaßt wird, beträgt der Fehler $2 \Delta t$. Aus Gleichung (2) ist ersichtlich, daß bei vorgegebener Leistung der relative Fehler von der Größe ϑ' und damit vom Mischungsverhältnis der Rücklaufbeimischung abhängt. Mit den zunehmenden Einzelmeß-
fehlern $|\Delta \dot{m}|$ und $|\Delta t|$ existiert die optimale Spreizung ϑ'_{opt}

Regelstellung ist der relative Gesamtfehler proportional der Wurzel aus dem Produkt der Fehler aus Massestrom- und Temperaturmessung.

Raumtemperaturmessung

Die Bestimmung der Raumtemperatur t_r für die Beschreibung des thermischen Raumzustandes ist letztlich von gleicher Bedeutung wie die Messung der spezifischen Kühlleistung.

Im betrachteten und für die Anwendung der Basiskennlinie relevanten Fall, bei dem die Luftbewegung im Raum überwiegend thermisch bedingt ist, kann man von mittleren Luftgeschwindigkeiten unter 0,2 m/s ausgehen. Die Bestimmung der Raumtemperatur erfolgte zunächst rechnerisch aus der mittleren Lufttemperatur t_l und der Strahlungstemperatur t_{sr} auf eine Kugeloberfläche in Raummitte.

nehmen bestimmt.

Aus diesen Gründen wurde für die nachfolgend beschriebenen Leistungsmessungen die gemessene Schwarzkugelmessung zur Beschreibung des thermischen Raumzustandes herangezogen.

Messung der mittleren Decken-temperatur

Die genaue Bestimmung des Flächenmittelwertes einer real ausgeführten Kühldecke erwies sich als die komplizierteste und aufwendigste Meßaufgabe.

Folgende Faktoren beeinflussen im wesentlichen die Temperaturverteilung an der Deckenoberfläche:

- der Temperaturgradient infolge Wärmeleitung vom Panel zum Kühlwasser
- die unterschiedliche örtliche Belastung der Decke durch Strahlung und Konvektion ("geförderter Luftvolumenstrom" der Wärmelasten)

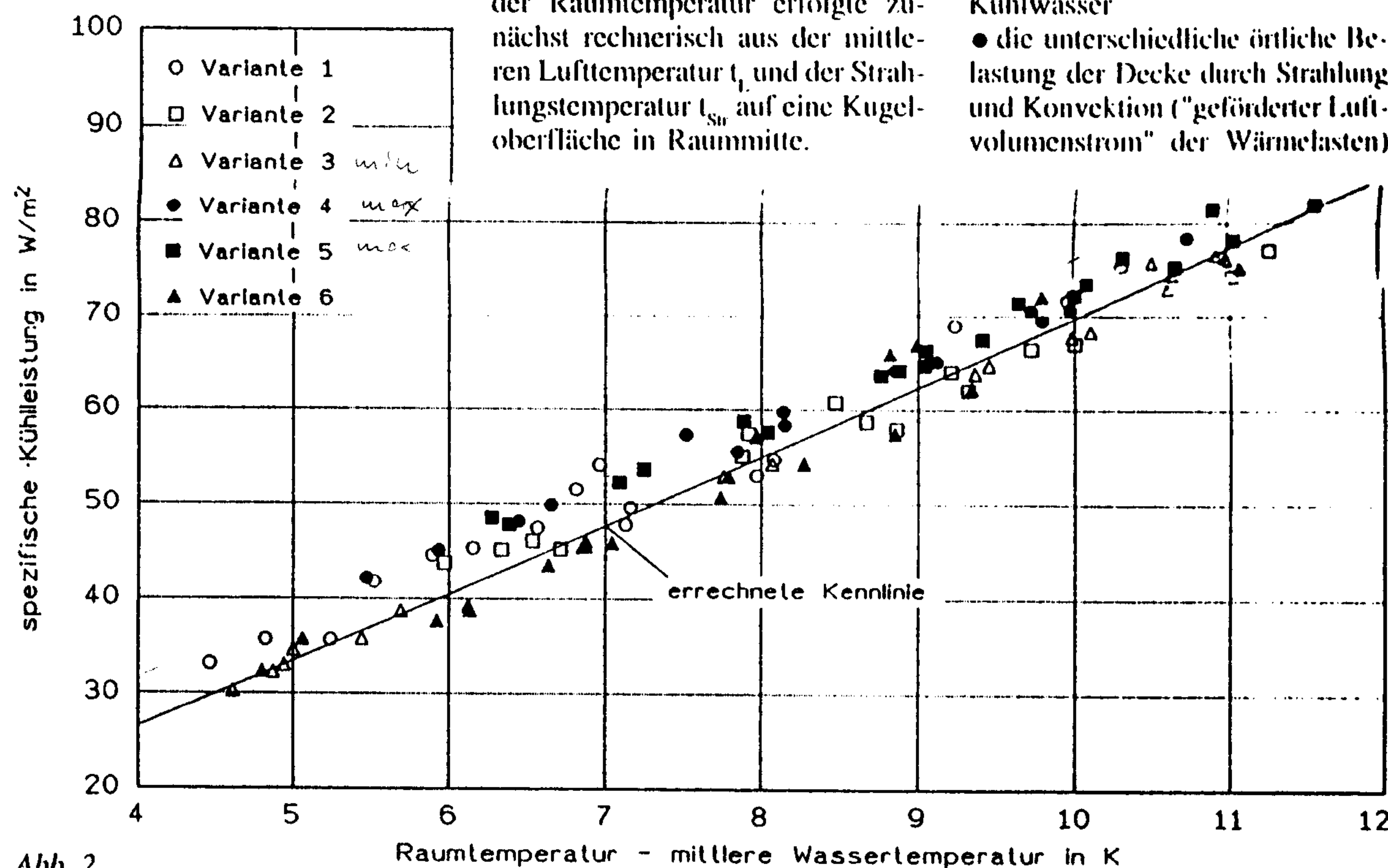


Abb. 2

Meßergebnisse und rechnerische Kennlinie am Beispiel des Kühldeckenpanels ROMTEC 1; Panelbreite 200 mm (Alle Abb. Glück/Schiller)

infolge der ungleichmäßig verteilten Wärmelasten

• die Temperaturdifferenz zwischen Vorlauf und Rücklauf des Kühlwassers

• montage- und konstruktionsbedingte Unterschiede an der Kühldecke.

Überlagert werden diese Imponderabilien durch die spezifischen Probleme der Oberflächentemperaturmessungen bei:

• Kontaktthermometermessungen (direkte Beeinflussung des Temperaturfeldes durch Wärmeleitung)

• berührungslosen Meßverfahren (Überlagerung der emittierten Strahlung des Meßobjektes durch Reflexionen sämtlicher Oberflächen in geschlossenen Räumen).

Im Falle der Kühldecke wurden zunächst beide Meßverfahren verglichen. Die Kontaktthermometermessung erfolgte mit einem speziell für die Oberflächentemperaturmessung entwickelten Thermoelementfühler. Die Fühlerspitze war federnd ausgeführt und gewährleistete an der zu messenden Oberfläche einen optimalen Kontakt. Sie zeichnete sich durch eine geringe Masse aus und führte zu einer extrem geringen Zeitkonstante bei zu vernachlässigender Beeinflussung des Temperaturfeldes am Meßobjekt. Die berührungslose Messung erfolgte durch eine Infrarot-Thermovisionskamera mit thermoelektrischer Kühlung und digitaler Bildspeicherung. Die Infrarotkamera kann aufgrund ihres physikalischen Prinzips nur die Summe aus der Eigenemission des Meßobjektes und der Reflexion der von sämtlichen Umschließungsflächen auftretenden Strahlung registrieren. Diese Summe bezeichnet man als Flächen-

helligkeit. Die für die Ermittlung der Oberflächentemperatur notwendige Bestimmung der Eigenemission läßt sich in vielen Fällen mit Hilfe einer "Umgebungstemperatur" in ausreichender Genauigkeit rechnerisch bestimmen.

Im vorliegenden Fall erwies sich dieses Verfahren als nicht ausreichend. Wegen der räumlichen Enge des Modellraumes und der thermisch hohen Belastung des Raumes traten sowohl bei der Deckenoberflächentemperatur als auch bei der Umgebungstemperatur starke lokale Unterschiede auf. Diese führten zu unterschiedlichen Reflexionsanteilen an der Flächenhelligkeit, so daß bei der Ermittlung der Eigenemission Abweichungen auftraten.

Die Kontaktthermometermessung scheint ein gangbarer, jedoch sehr aufwendiger Kompromiß zu sein. Die komplizierte Oberflächen-temperaturverteilung zwingt zur Messung an möglichst vielen Meßpunkten.

Der geometrische Ort des Auftretens der mittleren Temperatur innerhalb eines Paneels - zwischen zwei Kühlwasserrohren - konnte näherungsweise durch die Lösung der stationären Fourierschen Wärmeleitgleichung ermittelt werden. Dadurch wurde die Ermittlung einer "lokalen" mittleren Oberflächen-temperatur auf einen Meßpunkt beschränkt und die Anzahl der Meßorte bei gleichem Aufwand vergrößerbar.

Die dabei gemessenen lokalen mittleren Oberflächentemperaturen wichen um bis zu $\pm 1,0$ K vom Mittelwert ab.

Versuchsaufbau-Kalibrierung

Neben den bekannten zufälligen Fehlern wird das Meßergebnis durch

	Wärmelasten	Möblierung	Lüftung
Variante 1	4 Personen 1 beheiztes Fenster	keine	keine
Variante 2	7,2 m ² Heizmatten am Fußboden	keine	keine
Variante 3	3 Personen, 2 PC's beheiztes Fenster 3,6 m ² Heizmatten	Büromöbel	keine
Variante 4	3 Personen, 2 PC's beheiztes Fenster 3,6 m ² Heizmatten	Büromöbel	turb. Deckenstrahl $\Delta t = 0$ K $\dot{V} = 500$ m ³ /h
Variante 5	3 Personen, 2 PC's beheiztes Fenster 3,6 m ² Heizmatten	Büromöbel	turb. Deckenstrahl $\Delta t = 3,5$ K $\dot{V} = 500$ m ³ /h
Variante 6	3 Personen, 2 PC's beheiztes Fenster 3,6 m ² Heizmatten	Büromöbel	Quelluftdurchlaß $\Delta t = 3,5$ K $\dot{V} = 500$ m ³ /h

Tab. 1

Versuchsvarianten im ROM-Meßraum mit Kühldecke ROMTEC I.

systematische Fehler beeinflusst. Einflußfaktoren sind insbesondere:

- Wärmeführung der Kaltwasserleitungen aus der Umgebung
- Energieumwandlung durch die Umwälzpumpe
- spezifische Meßfehler durch Einbaubedingungen der Temperaturfühler.

Dabei übt die Pumpe den größten Einfluß aus. Die bei der Umwandlung von elektrischer Energie in kinetische Energie als "Verlustenergie" auftretende Motorwärme wird zum Teil an das Kühlwasser und zum Teil über die Gehäuseoberfläche an die Umgebungsluft abgegeben. Die für die Zirkulation erforderliche kinetische Energie wird durch Reibung vollständig in Wärme umgewandelt und vom Kühlwasser aufgenommen. Über einen Kurzschlußversuch (analog dem elektrischen Verfahren der Raumheizkörperprüfung nach DIN 4704) wurde daher eine "Verlustleistungs"-Kennlinie als Fehlersummengröße bei gesperrten Kühldeckenregistern in Abhängigkeit von der Kühlwassertemperatur ermittelt. Mit diesen Werten erfolgte später die Korrektur der gemessenen Kühldeckenleistungen.

Meßergebnisse am Beispiel der ROMTEC I

Die Messungen wurden in der Zeit von Mai bis August 1991 im klimatischen Labor der Firma ROM durchgeführt. Die Leistungsmessungen erfolgten an einer Deckenzone in Raummitte. Die aktive Kühlfläche betrug 16 m².

Es wurden insgesamt sechs Versuchsvarianten gemessen, die sich durch die Art der Wärmelasteinbringung und durch die Art des Lüftungssystems unterschieden (Tab. 1). Die mechanische Lüftung des Raumes diente ausschließlich der Änderung des konvektiven Wärmeüberganges. Behaglichkeitskriterien blieben dabei unbeachtet. Die Meßergebnisse sind in Abb. 2 der rechnerischen Kennlinie gegenübergestellt. Letztere wurde nach einem analytischen Verfahren, daß in [4] vorgestellt wurde, berechnet.

Zusammenfassung

Einheitliche Rechenmodelle und einheitliche Versuchsbedingungen bei der Bestimmung der spezifischen Leistung von Kühldecken bieten dem Planer und Kunden eine

höchstmögliche Objektivität und Transparenz bei der Auswahl eines Kühldeckenfabrikates. Am Beispiel der Paneeldecke ROMTEC I wurde bei der Messung der Kühldeckenleistung trotz zahlreicher systematischer und zufälliger Fehlerquellen eine recht hohe Genauigkeit erzielt. Die Streuung der einzelnen Meßwerte betrug maximal ± 4 W/m². Die Leistungswerte wurden für verschiedene Arten der Wärmelasteinbringung aufgenommen. Sie zeigen eine sehr gute Übereinstimmung mit der rechnerisch ermittelten Leistungskurve auf der Grundlage der Basiskennlinie.

Die Überlagerung der freien Konvektion mit verschiedenen Varianten aufgeprägter Raumluftströmungen zeigte tendenziell eine leichte Erhöhung der Kühldeckenleistung. Die rechnerische Kennlinie liefert jedoch auch hier eine ausreichend genaue Beschreibung des Leistungsverhaltens. (2992)

(Teil 2 folgt in CCI 5/92)

Literaturverzeichnis

- [1] Glück, B.: Leistung von Kühldecken. HLH (1991) Heft 3
- [2] DIN 4725 Teil 2: Warmwasser-Fußbodenheizungen, Wärmetechnische Prüfung. Entwurf, Februar 1990
- [3] Glück, B.: Strahlungsheizung - Theorie und Praxis. Berlin; Verlag für Bauwesen 1982 und Karlsruhe: Verlag C. F. Müller 1982
- [4] Glück, B.: Leistungsparameter von Kühldecken. CCI 14/1990

Dr.-Ing. habil. Bernd Glück und
Dipl.-Ing. Heiko Schiller, ROM
Hamburg, Zentralbereich System-
entwicklung - Grundlagen Gebäu-
detektechnik

5.5 facher Luftwechsel