

Thermisches Verhalten von Kühldecken

Von der Fakultät Energietechnik der Universität Stuttgart zur
Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte Abhandlung

vorgelegt von

Christoph Beck

aus Reutlingen

Hauptberichter:
Prof. em. Dr.-Ing. Heinz Bach
Mitberichter:
Prof. Dr.-Ing. Michael Schmidt
Tag der Einreichung:
15.07.2002
Tag der mündlichen Prüfung:
05.12.2002



Universität Stuttgart

IKE Lehrstuhl für Heiz- und Raumluftechnik

ISBN 3 - 9805218 - 8 - 5

D93

Universität Stuttgart, **IKE**
Lehrstuhl für Heiz- und Raumluftechnik
Pfaffenwaldring 35
70569 Stuttgart

Tel.: 0711 / 685 - 2085

Fax.: 0711 / 685 - 2096

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als Mitarbeiter der Forschungsgesellschaft HLK Stuttgart mbH.

Zunächst gilt mein Dank Herrn Professor Dr.-Ing. H. Bach für die wissenschaftliche Betreuung dieser Arbeit und die Übernahme des Hauptberichts.

Herrn Prof. Dr.-Ing. M. Schmidt danke ich für sein Interesse an meiner Arbeit, die hilfreichen Anregungen und Ergänzungen sowie die Übernahme des Mitberichts.

Allen Kollegen – insbesondere den Herren N. Dobrikovic, D. Grimm, A. Keinath, M. Klassek, B. Klein, T. Plotz, B. Röhl, M. Weißbecher – möchte ich an dieser Stelle für ihre tatkräftige Unterstützung danken. Herrn J. Schmid möchte ich für seine Geduld und Toleranz bzgl. einer unkonventionellen Vorgehensweise in den letzten Jahren danken.

Der besondere Dank gilt meiner Familie – insbesondere Sibylle und Jan-Luca – die mich zu allen Zeiten unterstützt haben und in schwierigen Momenten durch Geduld und hilfreiche Ablenkung zum letztendlichen Gelingen dieser Arbeit entscheidend beigetragen haben.

Reutlingen, im Dezember 2002

Kurzfassung

Das thermische Verhalten von Kühldecken wird bisher mit Kennliniengleichungen der Form $\dot{q} = C \cdot \Delta\vartheta^n$ beschrieben. In Ausnahmefällen werden diese erweitert um einen Ansatz, der den Strahlungsaustausch zwischen Kühlfläche und Raumnutzer (operative Raumtemperatur) berücksichtigt. Dies ist nach den Erkenntnissen dieser Arbeit unzureichend.

Es wird daher eine Methode entwickelt, welche die beiden bestimmenden Vorgänge (Strahlung, Konvektion) an der gekühlten Fläche genauer beschreibt. In einem ersten Schritt wird die Decke in drei Bereiche mit unterschiedlichen, den Wärmeübergang maßgeblich beeinflussenden Phänomenen unterteilt:

1. Bereich im Einfluß der „Grundkonvektion“ im Raum
2. Bereich mit Fremdkonvektion verursacht durch einen Warmluftstrahl vor dem Fenster
3. Bereich mit Fremdkonvektion verursacht durch Luftzufuhr aus integrierten Durchlässen

Für jeden dieser Bereiche werden die Grundlagen der Wärmeübertragung angewandt und die wesentlichen Einflußgrößen eingearbeitet. Es ergeben sich Berechnungsansätze, die dann in einem zweiten Schritt mit Meßwerten aus dem Labor verglichen werden.

Diese zunächst für den stationären Zustand entwickelte Methode wird um ein weiteres Modell für die Beschreibung der dynamischen Vorgänge ergänzt (Speicherung). Abschließend werden systematische Berechnungen durchgeführt, welche die Auswirkungen von Kühldeckentemperatur, Umgebungsbedingungen, Zuluftstrom, Zulufttemperatur und Art des Luftdurchlasses auf die aufgenommen Kühlleistung darstellen.

Die Berechnungsergebnisse zeigen, daß die maximale Gesamtkühlleistung stets in einer Kombination aus Kühldecke und Zuluft mit minimal zulässiger Temperatur gegeben ist. Die Kühldeckenleistung liegt in diesen Fällen zwar unterhalb der Leistung ohne Belüftung des Raumes. Die zusätzliche Kühlleistung der Belüftung kompensiert diesen Effekt jedoch in allen untersuchten Fällen. Diese Erkenntnis ist wichtig, da Kühldecken aus Gründen der Entfeuchtung in der Regel mit einer raumluftechnischen Anlage kombiniert werden müssen. Die getrocknete, gekühlte Zuluft kann nach den Erkenntnissen dieser Arbeit auch ohne Nachwärmung den Räumen zugeführt werden.

Abstract

The thermal behaviour of cooling ceilings is so far described by characteristic equations in the form of $\dot{q} = C \cdot \Delta\theta^n$. In special cases these equations are extended by terms which take into account the radiation exchange between heat sink and space user (operational ambient temperature). This is insufficient. Therefore a model is presented, which describes more exactly the individual processes (radiation, convection) at the cooled surface. As a first step the ceiling area is divided into three ranges in which different phenomena are affecting the heat transfer considerably:

1. Range under the influence of free convection in the space
2. Range with forced convection caused by a plume along the window
3. Range with forced convection caused by air flow through supply air outlets

For each of these ranges the fundamentals of heat transfer are applied using the substantial variables. The results of these models are then compared in a second step with results from laboratory tests.

This model is developed first for steady-state conditions. It is extended by a second model to describe the dynamic processes (storage). Finally, both steady-state and unsteady conditions are investigated systematically. Results are presented for the cooling rate effected by the temperature of cooling ceiling, ambient conditions, supply air flow rate, supply air temperature and type of the air outlet.

The results computed indicate that the maximum total cooling rate is always gained by a combination of a cooling ceiling and a supply air with minimum permissible temperature. In these cases the cooling rate of the ceiling is lower than that without ventilation of the space. However, the additional cooling rate of the ventilation compensates this effect in all cases investigated. This is an important finding, since cooling ceilings usually must be combined with an HVAC system for reasons of dehumidifying. Dried, cooled supply air can thus be supplied to the space without reheating.

Inhalt

Formelzeichen, Indizes und Abkürzungen

1 Einleitung	1
2 Grundlagen und Stand der Technik	5
2.1 Deckenkühlung	5
2.1.1 Kühldeckensysteme	5
2.1.2 Leistungsspektrum	5
2.2 Luftführungsarten	6
2.2.1 Unterteilung der Luftführungsarten	6
2.2.2 Verdrängungsströmung	6
2.2.3 Mischströmung	6
2.2.4 Schichtströmung	7
2.3 Bauarten von Luftdurchlässen	8
2.4 Wärmeleitung in und Wärmeübergang an Kühldecken	10
2.4.1 Elektrisches Analogmodell	10
2.4.2 Wärmeleitung	10
2.4.3 Wärmeaustausch durch Strahlung	11
2.4.4 Wärmeübergang durch Konvektion	11
2.5 Grundlagen zur Ausbreitung von Luftstrahlen	13
2.6 Grundlagen zur Konvektion an vertikalen Flächen und über Körpern	16
3 Phänomene und Modelle für stationäre Bedingungen	18
3.1 Grundsätzliche Vorgehensweise bei der Modellbildung	18
3.2 Modell für den Strömungsbereich 1 (im Einfluß der Grundkonvektion im Raum)	20
3.3 Modell für den Strömungsbereich 2 (erzwungene Konvektion verursacht durch die Warmluftströmung vor dem Fenster)	21
3.4 Modell für den Strömungsbereich 3 (erzwungene Konvektion verursacht durch Zuluft aus Luftdurchlässen in der Decke)	24

4 Dynamisches Verhalten von Kühldecken	26
4.1 Grundlagen	26
4.2 Sprungantwort	27
4.3 Frequenzgang	29
5 Experimentelle Untersuchungen	31
5.1 Übersicht	31
5.2 Versuchsaufbau	31
5.2.1 Versuchsraum	31
5.2.2 Anordnung und Meßverfahren	31
5.2.3 Meßtechnik	32
5.3 Untersuchungen mit Grundkonvektion	33
5.3.1 Untersuchte Kühldeckensysteme	33
5.3.2 Versuchsprogramm	33
5.3.3 Ergebnisse	34
5.3.3.1 Ermittlung der Kühlleistung	34
5.3.3.2 Oberflächentemperatur	35
5.4 Untersuchungen mit Fremdkonvektion verursacht durch Außenfenster	36
5.4.1 Untersuchtes Kühldeckensystem	36
5.4.2 Versuchsprogramm	37
5.4.3 Ergebnisse	37
5.5 Untersuchungen mit Fremdkonvektion verursacht durch integrierte Luftdurchlässe	40
5.5.1 Versuchsprogramm	40
5.5.2 Ergebnisse	40
5.5.2.1 Linearluftdurchlaß	40
5.5.2.2 Dralluftdurchlaß	42
5.6 Untersuchungen bei dynamischem Betrieb	44
5.6.1 Untersuchte Kühldeckensysteme	44
5.6.1.1 Metallkühldecke mit PP-Kapillarrohrmatten	44
5.6.1.2 Putzkühldecke mit PP-Kapillarrohrmatten	44
5.6.2 Versuchsprogramm	45
5.6.3 Ergebnisse	49

6 Verifizierung der Modelle	56
6.1 Verifizierung der Modelle für stationäre Bedingungen	56
6.1.1 Modell für den Strömungsbereich 2 (erzwungene Konvektion verursacht durch die Warmluftströmung vor dem Fenster)	56
6.1.2 Modell für den Strömungsbereich 3 (erzwungene Konvektion verursacht durch Zuluft aus Luftdurchlässen in der Decke)	60
6.2 Verifizierung des Modells für dynamischen Betrieb	64
7 Rechenbeispiele für stationäre Bedingungen	68
7.1 Linearluftdurchlaß und Außenfenster	68
7.2 Dralluftdurchlaß und Außenfenster	74
8 Zusammenfassung und Ausblick	79
9 Literatur	82
Anhang	85
A Zeichnungen der untersuchten Kühldeckensysteme	A1