



Die Kühldecke – Möglichkeiten und Grenzen*

Bruno Gräff, Konrad Hubert, Gießen

Kühldecken haben in der letzten Zeit zunehmend an Bedeutung gewonnen. Wenn bei hoher Energielast im klimatisierten Raum trotzdem thermischer Komfort gewährleistet werden soll, bieten sie wertvolle Hilfe; ein Allheilmittel sind sie jedoch nicht. Insbesondere sind Kühldecken üblicher Bauart nicht in der Lage, die Stofflast der Räume abzutragen. Dazu bedarf es noch eines zusätzlichen Luftaustauschs. Eine optimale Lösung der Klimatisierungsaufgabe wird nur dann erzielt, wenn Luftführung und Deckenkühlung richtig aufeinander abgestimmt sind. Die mögliche Lastabfuhr durch Kühldecken ist weniger durch Einbuße an thermischer Behaglichkeit als vielmehr durch die Notwendigkeit, Kondensatbildung zu vermeiden, begrenzt.

Ceiling cooling – possibilities and limitations

Ceiling cooling has come to the fore in the recent past. When thermal comfort is demanded of an air-conditioned room subjected to high energy loads, this system can provide valuable support. It is not, however, a panacea for cooling problems. In particular, ceiling cooling systems of conventional kinds are incapable of purging the room air of solid particles. To accomplish this a secondary air exchange is necessary. The optimal response to room air quality requirements will require a correct matching of air circulation and ceiling cooling. Concerns about diminishing thermal comfort impose fewer limitations on particle elimination through ceiling cooling than does the need to suppress condensation buildup.

Possibilités et limites de la climatisation par le plafond

La climatisation par le plafond a pris ces derniers temps de plus en plus d'importance. Lorsqu'il s'agit de garantir un confort thermique malgré une charge importante d'énergie dans une pièce climatisée, la climatisation par le plafond est une aide précieuse, sans être toutefois une panacée. Et les plafonds climatisés de construction habituelle ne sont pas en mesure d'éliminer la charge en matières des pièces. Il faut qu'il y ait en plus un bon échange d'air. La solution optimale du problème de climatisation consiste à agencer judicieusement les conduites d'air et la climatisation par le plafond. L'évacuation de la charge par les plafonds climatisés est moins limitée par la perte en confort thermique que par l'obligation d'éviter la formation de condensation.

Schlüsselwörter – Keywords

*Kühldecke, Raumkühlfläche, Schichtenströmung, Mischströmung, Turbulenzgrade
Ceiling cooling, room cooling surface, laminar airflow, mixed flow, degree of turbulence*

1. Einleitung

Raumkühlflächen können einen wesentlichen Beitrag zur Klimatisierung geschlossener Räume leisten. Dabei wird im Raum vorhandenen Begrenzungsflächen Wärme entzogen, und es kommt zur sogenannten „stillen Kühlung“, d. h. zu einer Kühlung, die sich geräuscharm mit ausschließlichem Antrieb für die Luftbewegung über Dichteunterschiede der Raumluft vollzieht und einen erheblichen Anteil des Wärmeentzugs über Strahlung bewirkt.

Als wärmeaufnehmende Begrenzungsflächen kommen Fußböden, Wände und Decken in Betracht, die unter dem Begriff „Raumkühlflächen“ zusammengefaßt werden können. Unter Beachtung der Anforderungen, die aus der thermischen Behaglichkeit der Rauminsassen resultieren, lassen sich vor allem über *Kühldecken* beträchtliche Leistungen abführen.

Da aber zur Raumkonditionierung, zumindest bei Anwesenheit von Personen, stets neben einer Energielast auch eine Stofflast abzuführen ist, kommt man ohne unterstützende Lüftung nicht aus.

Zur Abfuhr großer Kühllasten über gekühlte Zuluft mit herkömmlichen Anlagen sind meist starke Raumluftbewegungen erforderlich, die bei nicht sachgerechter Auslegung oder zu großen Lasten leicht zu Zugerscheinungen führen. Hier können *Kühldecken* meist thermischen Komfort trotz großer Kühllast gewährleisten.

Eine Optimierung wird stets im richtigen Zusammenspiel von Raumlufttechnik und *Kühldecke* erreichbar sein – die *Kühldecke* allein kann nicht alle erforderlichen Luftbehandlungsfunktionen bewirken; zusätzliche Fensterlüftung stellt bestenfalls ein Notbehelf dar.

2. Kühldecken

Die Abfuhr der Kühllast eines Raumes kann durch Einbringen gekühlter Luft oder durch Bauteilkühlung erfolgen. Wird die Raumdecke ganz oder teilweise auf Temperaturen unterhalb der Raumtemperatur gebracht und gehalten, spricht man von *Kühldecke*.

Die Kühlung des Bauteils erfolgt üblicherweise durch geschlossene Wasser- oder Luftkreisläufe. Bei Luft als Wärmeträger ist auch ein offener Kreislauf möglich, wobei die Luft zunächst zur Deckenkühlung herangezogen und anschließend dem Raum zugeführt wird. Bei der Angabe der Kühlleistung muß in diesen Fällen zwischen Bauteilkühlung und direkter Kühlung durch Zuluft unterschieden werden.

Eine *Kühldecke* wirkt immer direkt auf die im Raum befindlichen Wärmequellen ein (Strahlung), darüber hinaus aber auch indirekt über die Raumluft (Konvektion). Je nach Aufbau der *Kühldecke* und der Luftbewegung im Raum können die Anteile Strahlung/Konvektion unterschiedlich ausfallen.

Mit Wasser oder Luft zur Kühlung beaufschlagte Deckenflächen können in angepaßter Weise mit Beleuchtungseinrichtungen kombiniert werden; es lassen sich ästhetisch ansprechende Raumgestaltungen selbst unter Berücksichtigung der raumakustischen

Prof. Dr.-Ing. Bruno Gräff, Dipl.-Ing. Konrad Hubert, Fachhochschule Gießen-Friedberg

* Manuskript eingereicht im November 1992

Anforderungen realisieren, ohne daß sich dabei die Technik in den Vordergrund drängt.

3. Kühldecken und Lüftungssysteme

Die Wärmeübertragung durch Strahlung ist ausschließlich von den Oberflächentemperaturen der Kühldecke einerseits, der Wände, Personen usw. im Raum andererseits, in Verbindung mit den zugehörigen Strahlungseigenschaften der Oberfläche, abhängig.

Unabhängig von der Luftzufuhr in den Raum wird ein Teil der Wärme beim Einsatz von Kühldecken durch Kühlung von Raumluft, also durch Konvektion abgeführt. Die Größe des konvektiven Anteils hängt maßgeblich von der Raumluftbewegung in Deckennähe ab. Diese Raumluftbewegung kann durch gezielte Luftführung wesentlich beeinflusst werden.

Da Kühlflächen keinen Beitrag zur Lufterneuerung leisten, sollen sie immer nur als unterstützendes System in Verbindung mit einer Lüftungs- oder Klimaanlage betrieben werden, die auch für die notwendige Entfeuchtung sorgt. Bei sinnvoller Kombination entlastet die Kühlfläche das Lüftungssystem, d. h. der Luftstrom wird von der Energielast entkoppelt. Das führt zu kleineren Zuluftströmen, die im Idealfall dem erforderlichen Außenluftstrom entsprechen.

Durch ihren konvektiven Beitrag zum Energieaustausch mit dem Raum stehen Kühlflächen in Wechselwirkung mit dem jeweiligen Luftführungssystem. Dadurch können im gekühlten Raum unterschiedliche Raumluftströmungen hervorgerufen werden, insbesondere Mischströmungen und Schichtenströmungen.

3.1 Kühldecken und turbulenzreiche Mischströmung

Mit turbulenzreicher Mischströmung wird eine möglichst intensive Vermischung von Zuluft und Raumluft angestrebt. Dadurch stellt sich ein nahezu homogener Luftzustand im Raum ein, wobei auch thermische und stoffliche Lasten gleichförmig verteilt werden.

Die Mischströmung wird durch äußere Einwirkung auf den Raum bedingt; sie ist im wesentlichen auf den Eintrittsimpuls der Zuluft zurückzuführen. Lage, Ausbildung, Beaufschlagung und Eigenschaften der Zuluftdurchlässe sind von entscheidender Bedeutung für die sich im Raum einstellende Luftbewegung. Lage und Ausbildung der Abluftdurchlässe haben fast keine Auswirkungen auf die Raumluftströmung.

Der intensive Impulsaustausch bei der Luftbringung durch Deckenluftdurchlässe verändert die Temperaturgrenzschicht an der Kühldecke und erhöht dabei den konvektiven Wärmeübergang. Die Neigung zu unkontrolliertem Ablösen kalter Luftballen von der Decke, die bei zu großen Leistungen für die Menschen im Raum spürbar wird, läßt sich dadurch stark mindern.

Eine Kombination mit anderen induktiv arbeitenden Systemen ist ebenfalls möglich.

3.2 Kühldecken und Schichtenströmung

Bei der Schichtenströmung wird versucht, die Wirkung thermischer und stofflicher Lasten durch Aufbau von Luftschichten unterschiedlichen Zustands auf Teilbereiche des Raumes zu beschränken und deren Auswirkungen auf den übrigen Aufenthaltsbereich zu unterbinden.

Dazu ist es nötig, die Zuluft nach Lage, Geschwindigkeit und Verteilung in geeigneter Weise in den Raum einzubringen und die Abluft an der richtigen Stelle zu entnehmen, um die inneren Lasten als Antrieb für die Raumluftströmung nutzen zu können.

Wird die Zuluft mit vernachlässigbar kleinem Eintrittsimpuls (Quellströmung, Teppichbodendurchströmung) in den Raum gebracht, stellen sich die Schichtdicken nur unter dem Einfluß der inneren Lasten und der Größe des Zuluftstroms ein; durch Ein-

satz von Zuluftdurchlässen mit größerem Eintrittsimpuls (örtliche Mischströmung) läßt sich die Schichtdicke beeinflussen.

Die mit solcher Luftführung bei kleineren Luftströmen allein abführbare Kühllast ist nur gering oder führt sehr schnell zu großen vertikalen Temperaturgradienten, die die thermische Behaglichkeit empfindlich stören. In Verbindung mit Kühldecken kann jedoch beträchtlich mehr Last bei gleichmäßigerem vertikalen Temperaturprofil abgefahren werden.

Wird mit solchen Systemen die Zuluft mit geringer Untertemperatur gegenüber der Raumluft in Bodennähe in den Raum gebracht, so breitet sie sich am Boden aus, und die Raumluftbewegung wird wesentlich geprägt durch die Thermik im Bereich von Wärmequellen, die Luft auf direktem Weg von Bodennähe bis in den Deckenbereich befördert. Über der turbulenzarmen, bodennahen Luftschicht stellt sich dabei in der Regel eine Mischströmung ein, die Turbulenzgrade von 40 bis 60 % aufweist.

4. Ausführungsmerkmale

Heute werden zahlreiche und konstruktiv sehr unterschiedliche Kühldecken auf dem Markt angeboten. Durch die vielfältigen Bauformen sind Kühldecken sowohl für Neubauten als auch für die Modernisierung von Altbauten geeignet. Sie können den Wünschen des Architekten in bezug auf Raumgestaltung angepaßt werden. Sie lassen sich den Anforderungen der Lichttechnik entsprechend auslegen und können bestimmte Aufgaben im Hinblick auf die Raumakustik übernehmen.

Orientiert an ihrer klimatechnischen Aufgabe können Kühldecken in die beiden Gruppen:

- Kühlflächen mit überwiegendem Wärmetransport durch Strahlung und
- Kühlflächen mit überwiegendem Wärmetransport durch Konvektion

unterteilt werden.

Kühldecken mit überwiegendem Strahlungsanteil haben geschlossene Oberflächen. Sie können als Putzdecken oder auch als Montagedecken ausgeführt werden. Ihr Platzbedarf ist in der Regel nicht größer als der für die Konstruktion der Normaldecke ohne Kühlung. Der Anteil des durch Strahlung abgeführten Wärmestroms am Gesamtwärmestrom kann bis zu 60 % betragen.

Bei den Kühldecken mit überwiegendem Konvektionsanteil erfolgt der Wärmetransport verstärkt über die Raumluft. Die Kühlfläche hat Öffnungen für die zur Erhöhung der Kühlleistung notwendige Luftzirkulation. Durch dem Raum zugewandte Rippen kann die Luftströmung gesteigert und die Leistung weiter erhöht werden.

5. Wirtschaftlichkeit

Die Wirtschaftlichkeit eines Kühldeckensystems ist abhängig von der Kühllast des Raumes, von der Betriebsdauer der Anlage und von baulichen Gegebenheiten.

Eine allgemeine Aussage kann daher nicht gemacht werden. Die Wirtschaftlichkeit muß jeweils projektbezogen ermittelt werden. Es entstehen im Vergleich zur Nur-Luft-Anlage:

- Mehrinvestitionen für das Kühldeckensystem
- Minderinvestitionen für die RLT-Anlage, da der Volumenstrom auf das für die Lufterneuerung notwendige Maß reduziert werden kann. Dadurch entsteht ein geringerer Platzbedarf für die Klimazentrale und die Luftkanäle.
- Wird das Kühldeckensystem bereits beim Gebäudeentwurf berücksichtigt, können wegen des geringen Platzbedarfs auch Minderinvestitionskosten für das Gebäude angesetzt werden.

Kühldeckensysteme haben geringere Betriebskosten als Nur-Luft-Systeme:



Durch den geringeren Luftstrom von der RL-Anlage reduzieren sich die Energiekosten für den Lufttransport. Durch die hohen Vorlauftemperaturen des Kühlwassers von z.B. 16°C kann die freie Kühlung von Blockkühlwerken besser genutzt werden. Dadurch reduzieren sich die Energiekosten für die Lüftung.

6. Leistungsmessungen

Da für die Leistungsmessung an Kühldecken bisher noch keine allgemeinverbindlichen Vorschriften vorliegen, sind Firmenangaben nicht direkt zu werten. Nach Abschluß der zur Zeit laufenden Normungs- und Richtliniemaßnahmen ist diesbezüglich mit dem Hersteller ein Vergleichsverfahren zu rechnen. Es zeichnet sich ab, daß die Leistung flächenbezogen dargestellt wird als:

$$q = \frac{Q}{A_s}$$
 wobei q die Luftstromdichte Q der gemessene Wärmestrom und A_s der zur Lüftung aktive Deckenanteil ist. Dabei ist zu beachten, daß aus konstruktiven, lichttechnischen, akustischen und sonstigen Gründen üblicherweise höchstens 70% der Fläche mit aktiven Elementen ausgestattet werden können.

Kühldecken-Verhältnisse

Bei platten geschlossenen Flächen und bei Verhalten der Kühldecken im Hinblick auf unabhängig vom Raum mit Hilfe der Kühldecke aufzuhalten. Dabei bedingt $t_{s,1}$ einen reduzierten Wärmeübergangskoeffizienten vom Luftströmträger bis zur raumseitigen Deckenoberfläche und $t_{s,2}$ die logarithmisch gemittelte Temperaturdifferenz zwischen Wärmeübertrager und mittlerer Lufttemperatur $t_{m,1}$.

$$\ln \left(\frac{t_{s,1} - t_{m,1}}{t_{s,2} - t_{m,1}} \right)$$

Die Lufttemperatur und die Plattenoberflächentemperatur. Die Leistungsfähigkeit der geschlossenen platten Kühldecke wird durch den auf q und $\Delta t_{m,1}$ ermittelten $t_{s,1}$ Wert eindeutig beschrieben.

Raumluft

Bei platten und profilierten Kühldecken weisen eine starke Abstrahlung auf. Ein zu kühlendes Raum auf Durch die Prüfung in einem nach DIN 10470 Meßbox lassen sich dabei trotzdem vergleichsweise einfache Verfahren anwendbar. Die Überprüfung der Leistungsprüfung läßt sich in diesen Fällen mit dem Hersteller abklären.

$$q = \frac{Q}{A_s}$$

Die Vorlauftemperatur $t_{v,1}$ und n müssen durch Berechnen aus Meßwerten bestimmt werden. $\Delta t_{m,1}$ bedeutet die logarithmisch gemittelte Temperaturdifferenz zwischen dem Wärmeübertrager und dem Raum mit dem mittleren Lufttemperatur $t_{m,1}$:

$$\ln \left(\frac{t_{v,1} - t_{m,1}}{t_{v,2} - t_{m,1}} \right)$$

Bei offenen oder profilierten Kühldecken ist jedoch die Gefahr von Zugerscheinungen nicht generell auszuschließen, so daß in kritischen Fällen durch Raumströmungsuntersuchungen der thermische Komfort nachgewiesen werden muß.

7. Schlußbetrachtung

Beim Betrieb von Kühldecken muß eine Kondensatbildung in der Decke unter allen Umständen vermieden werden. Die Gefahr des Ausscheidens von Wasser aus der Luft besteht, wenn durch zu niedrige Vorlauftemperaturen wasserführende Bauteile zu stark unterkühlt werden oder wenn die Raumluftfeuchte zu stark ansteigt.

Durch geeignete Regelungs- und Lüftungstechnische Maßnahmen muß ein ausreichender Abstand zur Taupunkttemperatur der Raumluft eingehalten werden, damit die Kondensatbildung mit Sicherheit ausgeschlossen werden kann.

Bei Kühldecken mit überwiegendem Strahlungsanteil wird die Wärmestromdichte der abgeführten Kühllast dadurch praktisch nur durch die Möglichkeit der Kondensatbildung begrenzt, bei Kühldecken mit überwiegendem Konvektionsanteil wird die mögliche Leistungsabfuhr darüber hinaus noch durch Kriterien der thermischen Behaglichkeit eingeschränkt.

Durch die notwendige Begrenzung der Vorlauftemperatur auf etwa 16°C bei Raumtemperaturen von 26°C treten lediglich Temperaturunterschiede zwischen Kühldecke und Aufenthaltszone von weniger als 10K auf. Dabei ist Strahlungszug nicht zu befürchten.

Über die Raumhöhe bildet sich in der Aufenthaltszone unter dem Einfluß der Kühldecke ein recht gleichmäßiges Temperaturprofil aus, so daß keine unzulässig großen Temperaturgradienten zu befürchten sind.

Sollten sich durch die Luftabkühlung an einer geschlossenen Kühldecke unzulässig große Luftgeschwindigkeiten ausbilden, so sind diese jedoch in der Praxis ohne Bedeutung, da im Bereich des Aufenthalts von Personen die durch Thermik verursachte Aufwärtsströmung den Kaltluftabfall in andere Raumbereiche verdrängt, in denen sich keine Personen bzw. Wärmequellen befinden.

Bei Kühldecken mit überwiegendem Konvektionsanteil strömt in aller Regel Luft ortsfest aus entsprechenden Öffnungen. Der dadurch bedingte kühle Luftstrom ist ebenfalls recht ortsgewunden und läßt sich nicht leicht verdrängen, so daß bei Kühldecken mit überwiegendem Konvektionsanteil die thermische Behaglichkeit ebenfalls eine Begrenzung für die abführbare Leistung darstellen kann.

Der Einsatz von Kühldecken sollte sich immer an der Klimatisierungsaufgabe orientieren. Kühldecken eignen sich besonders für Anwendungsfälle, bei denen hohe Komfortansprüche bestehen und die Energiekosten im Verhältnis zu den Stofflasten sehr groß sind. Wenn der zur Abfuhr der Stofflast notwendige Luftstrom von gleicher Größe ist wie der zur Abfuhr der Energielast, ist der Einsatz von Kühldecken weniger sinnvoll.

Literatur

- [1] NN: „Kühldecken – Eine Informationsschrift des Fachinstitutes Gebäude-Klima o. V.“
- [2] Södeck, J., Heichel, W., Veldboer, W.: „Thermodynamische und wirtschaftliche Betrachtung eines Hochleistungs-Kühldeckensystems“, Ki 9 (1989) 1: 179–383.
- [3] Gräßl, H.: „Deckenkühlung mit überwiegendem Strahlungsanteil“, Symposium im Hause der Firma Stulz am 22. Mai 1991, S. 5–26.
- [4] NN: „Messungsmessungen an Kühldecken“, Forum, Ki 5 (1992), S. 166–176.
- [5] Glück, H.: „Anleitung von Kühldecken“, HLH 42 (1991), S. 213–215.
- [6] Guntormath, K.: „Thermografische Messungen an Kühldecken“, Ki 6 (1992) 1: 201–205.