

FLÄCHENKÜHLSYSTEME MIT INTEGRIERTEN PHASENWECHSELMATERIALIEN – EINE SIMULATIONSSTUDIE

Doreen Kalz*, Jens Pfafferoth, Peter Schossig und Sebastian Herkel
Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme, Heidenhofstr. 2, 79110 Freiburg, Deutschland

KURZFASSUNG

Gegenstand der vorliegenden Arbeit ist die Untersuchung von Potential und Performance von Flächenkühlssystemen sowie ein bewertender Vergleich mit einem Nachtlüftungskonzept auf Grundlage einer modellbasierten Analyse. Das Gebäude- und Anlagenmodell in ESP-r wurde mit Messdaten aus Experimenten in einem typisch betriebenen Niedrigenergie-Bürogebäude validiert. Die Simulationsstudie umfasst: (i) Betonkerntemperierung (BKT), (ii) Kapillarrohrmatten ohne und (iii) mit 20% mikroverkapselter PCMs im Deckenputz. Zentrale Ergebnisse sind: (1) Konditionierung mit Kapillarrohrmatten ermöglicht ein zufrieden stellendes Raumklima vergleichbar mit BKT, (2) die Verwendung von PCMs trägt entscheidend zur Reduzierung der Raumtemperaturen bei und (3) der optimale Schmelzbereich des PCM-Speichers lag in dieser Untersuchung bei 21 - 24°C.

This paper outlines the effects, the potential and the performance of radiant cooling systems as well as an evaluating comparison with a night ventilation concept by means of a validated building and plant model in ESP-r. Preliminary experiments in a commonly operated room of a low-energy office building facilitate the calibration of the simulation model. In particular, the simulation study was carried out for (i) concrete core conditioning, (ii) grid conditioning without and (iii) with 20% of micro-encapsulated PCMs applied to the ceiling. The central conclusions of this study are: (1) Grid conditioning provides a satisfactory room performance comparable with concrete core conditioning, (2) the application of PCMs contributes to a reduced operative room temperature, and (3) PCM with a melting range of 21 to 24 °C is most favorable.

EINLEITUNG

Viele Niedrigenergie-Bürogebäude setzen auf passive Kühlung. Passive Kühlung bedeutet Verzicht auf flächendeckende Klimatisierung / Kühlung der Büros und setzt auf die Minimierung bzw. Vermeidung von internen und solaren Wärmelasten. Unter Nutzung der thermischen Speichermasse können diese Lasten über natürliche Wärmesenken abgeführt werden.

Umfangreiche Untersuchungen beschäftigen sich mit der passiven Nutzung der thermischen Gebäudemasse, d.h. der luftgeführten Kühlung des Gebäudes in den Nachtstunden (Pfafferoth, 2004, Ghiaus, 2003). Dieser Beitrag konzentriert sich auf die wassergeführte Bauteilkühlung (Glück, 2003, Pfafferoth et al, 2005) sowie die Kühlung durch Kapillarrohrmatten mit Schwerpunkt auf dem Temperaturverhalten in einem Büroraum des Fraunhofer SOBIC (www.sobic.fraunhofer.de). Auf Grundlage einer modellbasierten Analyse in ESP-r (Clarke 2001, Laouadi 2004) werden folgende Kühlkonzepte untersucht: (i) Betonkerntemperierung (BKT), (ii) Kapillarrohrmatten ohne und (iii) mit 20% mikroverkapselter PCMs im Deckenputz mit folgenden Schmelzbereichen: 21 - 24 °C, 22 - 25 °C und 23 - 26 °C.

EXPERIMENTE MIT BKT

Die BKT am Fraunhofer SOBIC (Abb. 1) gibt die Wärme nachts über einen Kühlturm ab. Ein umfangreiches Langzeitmonitoring erfasst alle relevanten Einflussgrößen auf die BKT und im Raum. Dieses Monitoring wurde durch Kurzzeitmessungen ergänzt. Sämtliche Wetterdaten liegen am 200 m entfernten Fraunhofer ISE vor.

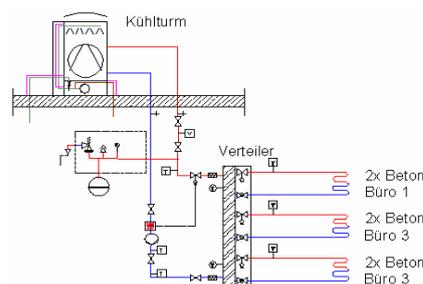


Abb. 1: Bauteilkühlung BKT für 3 Büroräume im Fraunhofer SOBIC. Prinzipschaltbild mit Nasskühlturm.

Die Experimente werden nicht unter Laborbedingungen durchgeführt, sondern unter typischen Betriebsbedingungen in Testbüros (hier: 20 m²-Büro). Während der Messkampagne im August und September 2004 war der Sonnenschutz geschlossen. Die internen Wärmelasten (1.100 W von 8 bis 16 Uhr, entsprechend 55 W/m²) wurden über einen Heizlüfter (90% konvektive und 10% radiative Wärmeabgabe) simuliert. Die Lüftungsanlage wurde werktags von 7 bis 17 Uhr und die BKT mit 24 l/(m²h) von 22 bis 6

Uhr betrieben. Die definierte, hohe spezifische Wärmelast dominiert – neben der Bauteilkühlung – die Energiebilanz gegenüber den „Störgrößen“ Solarstrahlung, Lüftung und Transmissionswärmeverluste an Nachbarräume und vereinfacht somit die modellbasierte Analyse der BKT. Bild 2 zeigt einen Zeitraum mit und ohne BKT. Erwartungsgemäß schwankt die Bauteiltemperatur während des BKT-Betriebs stärker, und tendenziell steigt die Raumtemperatur, wenn die BKT außer Betrieb genommen wird.

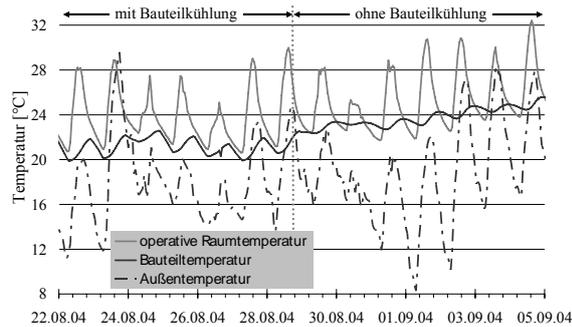


Abb. 2: Ausgewählte Messdaten aus der Langzeitmessung für einen Zeitraum über je 7 Tage mit und ohne Bauteilkühlung (Experimente).

VALIDIERTES MODELL

Die Messdaten werden mit einem validierten Simulationsmodell ausgewertet. Eine Identifikation der bauphysikalischen Parameter über die vorhandenen Messdaten liefert ein auf das Fraunhofer SOBIC angepasstes Raummodell (Abb. 3 und 4).

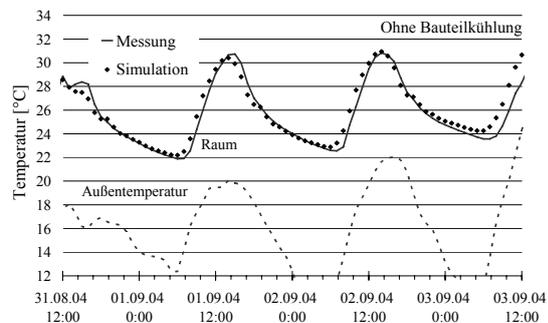


Abb. 3: Raummodell, Betrieb ohne BKT.

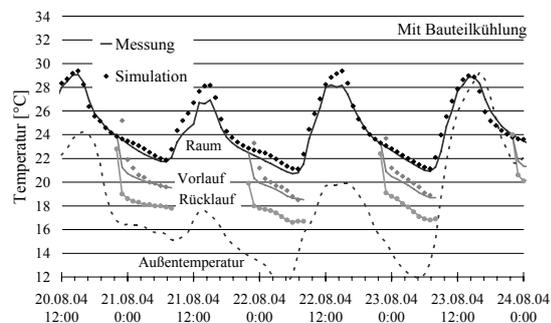


Abb.4: Raummodell, Betrieb mit BKT.

Der Wärmeübergang an der Decke unterscheidet sich für alle Fälle Nacht/Tag und mit/ohne BKT. Die

konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten liegen aufgrund der Temperaturprofile im Raum entsprechend bei $\alpha_{NL} = 4 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ bzw. $\alpha_{BKT} = 12 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$.

SIMULATIONSSTUDIE

Das an die konkrete Messkampagne angepasste Raummodell wird im Folgenden mit Standard-Betriebsbedingungen (interne Lasten $144 \text{ Wh}/(\text{m}^2\text{d})$) für den Vergleich verschiedener Kühlstrategien simuliert (22. bis 28. August 2004). Es ist zu berücksichtigen, dass sich das Gebäude nicht in einem eingeschwungenen Zustand befindet und sich die Ergebnisse somit auf das gewählte Zeitfenster beziehen.

Schwere Bauweise

Da sich die vorliegende Analyse auf die thermische Charakterisierung des Raumes beschränkt, werden folgende Randbedingungen gewählt: (1) Die Wasservorlauftemperaturen der BKT in der Simulation entsprechen den Messwerten aus dem Langzeitmonitoring und (2) Algorithmen zur Regelung der Vorlauftemperatur bzw. des Massestroms werden nicht berücksichtigt. Die untersuchten Kühlkonzepte betreffen:

- (i) BKT wie im Experiment: In Decke einbetonierte Rohre ($d=20 \text{ mm}$, Abstand 150 mm), $24 \text{ l}/(\text{m}^2\text{h})$.
- (ii) Kapillarrohrmatten ($d=3,4 \text{ mm}$, Abstand 15 mm) im Deckenputz (15 mm), $6 \text{ l}/(\text{m}^2\text{h})$, Betrieb von 22:00 bis 6:00.
- (iii) Kapillarrohrmatten wie (ii), jedoch mit 20% mikroverkapselter PCM (Paraffin, $2,6 \text{ kg}/\text{m}^2$, latente Wärmekapazität $18.000 \text{ J}/\text{kg}$) im Deckenputz. Folgende Schmelzbereiche werden untersucht: $21 - 24 \text{ }^\circ\text{C}$, $22 - 25 \text{ }^\circ\text{C}$ and $23 - 26 \text{ }^\circ\text{C}$.

Diese Kühlstrategien werden mit einem Nachtlüftungskonzept (NL) (4 h^{-1}) und einem unconditionierten Büroraum verglichen. (Abb. 5, oben).

Leichtbau

Die Einsatzgrenzen der BKT liegen im Leichtbau und in der Sanierung. Im Folgenden sollen somit die Effekte der Kühlung mit Kapillarrohrmatten und PCM in einem Leichtbau untersucht werden. Die Analyse basiert auf dem validierten Raummodell. Bauteilaufbauten der Wände und der Betrieb des Raumes werden beibehalten, lediglich die Charakteristik der Decke wurde hin zu einer abgehängten Decke mit einer schlechten thermischen Anbindung an den Betonkern verändert. Untersucht werden folgende Strategien im Vergleich zur Nachtlüftung (NL) (4 h^{-1}) und zum unconditionierten Büroraum (Abb.5, unten):

- (i) Passives PCM: 20% PCM im Deckenputz und Entladung des PCM-Speichers mit 4-fachem Nachtluftwechsel.

(ii) Kapillarrohrmatten ohne PCM (wie zuvor)

(iii) Kapillarrohrmatten mit PCM (wie zuvor)

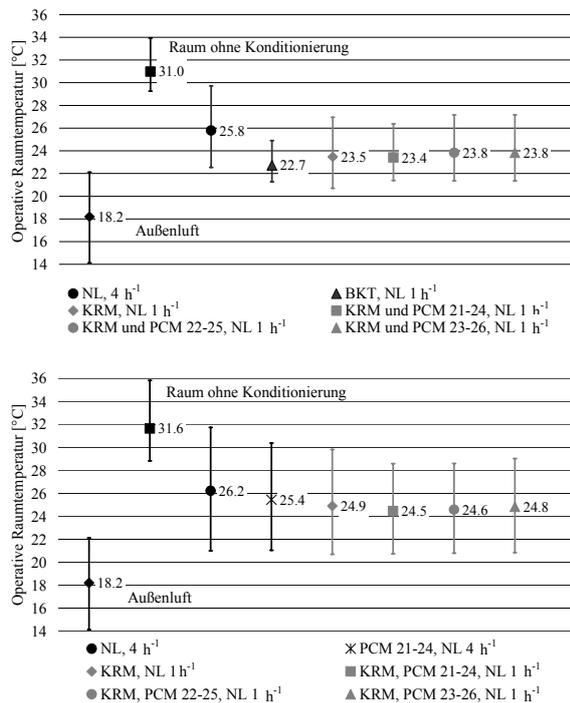


Abb. 5: Tagesmittel der operativen Raumtemperatur ($ORT_{m,Tag}$) sowie deren mittleres Maximum ($ORT_{m,max}$) und Minimum ($ORT_{m,min}$) (22.08 bis 27.08.04) für gewählte Kühlstrategien einschließlich der Außenlufttemperatur. Oben: Büroraum in schwerer Bauweise. Im Vergleich zur Nachtlüftung (NL) wird $ORT_{m,Tag}$ durch BKT um 3,1 K und $ORT_{m,max}$ um 4,8 K reduziert. Werden Kapillarrohrmatten (KRM) eingesetzt, steigt die ORT sowie die Tagesmaxima. Bei dem Gebäude in schwerer Bauweise ist der PCM-Effekt gering. Unten: Büroraum in Leichtbauweise. Raumkonditionierung durch NL und PCM reduziert $ORT_{m,Tag}$ um 0,8 K im Vergleich zum reinen Nachtlüftungskonzept. Wird der PCM-Speicher (Schmelzbereich 21 – 24 °C) durch KRM aktiv entladen, verringert sich die $ORT_{m,Tag}$ auf 24,5 °C und $ORT_{m,max}$ auf 28,6 °C. Wahl der Kühlkonzepte für Gebäude in schwerer und leichter Bauweise unterscheiden sich in oben: BKT und unten: PCM passiv mit NL.

FAZIT

Die Evaluierung der dargestellten Kühlstrategien führt zu folgenden Ergebnissen:

- Die Raumkonditionierung mit Kapillarrohrmatten stellt ein akzeptables Raumklima bereit; vergleichbar mit der Konditionierung durch eine BKT. Um eine Raumunterkühlung in den Morgenstunden zu vermeiden, wurde der Massenstrom auf 6 l/(m²h) reduziert. Damit verringert sich die Kühlleistung der Kapillarrohrmatten um rund 12%, die Temperaturdifferenz zwischen Vorlauf – und Rücklauf-temperatur steigt aber im Vergleich zur BKT. Da nach (Glück, 2003) beim Einsatz von Kapillarrohrmatten kleine Druckverluste erreichbar sind, ist ein größerer COP des Systems zu erwarten.

- Der Einsatz von PCMs bewirkt eine Reduzierung der operativen Raumtemperatur. Während relativ hohe Außenlufttemperaturen (> 18°C) in den Nachtstunden den PCM-Effekt begrenzen, führt eine aktive wassergeführte Durchströmung des PCM-Speichers zu dessen vollständiger Entladung.

- Bei einer aktiven, wassergeführten Entladung des PCM-Speichers mittels Kapillarrohrsystemen ist ein Schmelzbereich von 21 bis 24 °C besonders effektiv.

Ausblick:

- Die vorliegende Untersuchung wird um einen Langzeitbetrieb und die Berücksichtigung anhaltender Hitzeperioden erweitert. Die Ergebnisse sollen experimentell am Teststand belegt werden.
- In einem weiteren Schritt wird der Vergleich von Kühlstrategien um eine Kühldecke und weitere Nachtlüftungskonzepte ergänzt und entsprechend ihres Potentials für thermischen Komfort, Energieeinsparung und Vergrößerung des COPs untersucht.
- Weiterer Bedarf einer Analyse besteht beim Einsatz von Kapillarrohrmatten und PCMs für den Heizfall.

LITERATUR

- Clarke, J.A. 2001: Energy Simulation in Building Design (2nd Edition) Butterworth-Heinemann, ISBN: 0-750650-82-6.
- Ghiaus, C. 2003. Free running building temperature and HVAC climatic suitability. Energy and Buildings 35 (4):405-411.
- Glück, B. 2003. Umweltschonende Raumheizung und –kühlung mit Kunststoff-Kapillarrohrmatten. FIA-Projekt, Abschlußbericht, Kennzeichen 032 7241 B.
- Laouadi, A. 2004. Development of a radiant heating and cooling model for building energy simulation software. Building and Environment, 39(4):421-431.
- Pfafferoth, J. 2004. Enhancing the Design and Operation of Passive Cooling Concepts. Fraunhofer IRB Verlag.
- Pfafferoth, J., Schiel, S. und Herkel, S. 2005. Bauteilkühlung – Messungen und modellbasierte Auswertung. Proceeding, 15. Symposium Thermische Solarenergie, Bad Staffelstein, OTTI.
- Schossig, P., Henning, H.-M., Gschwander, S. und Haussmann, T. 2005. Microencapsulated Phase Change Materials integrated into Construction Materials. Solar Energy Materials and Solar Cells, 89:297-306.