Modellentwicklungen neuer Wandelemente in *ColSim* zur Untersuchung von Wärmeflussregelungen in solarthermischen Gebäudesystemen

Dipl.-Ing. Werner Hube, Dr.-Ing. C. Wittwer
Dipl.-Phys. P. Schossig, Dipl. Ing. (FH) S. Buschmann

Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE
Heidenhofsstr. 2, 79110 Freiburg
Tel.: 0761/4588-5408, Fax.: 0761/4588-9000
Werner.Hube@ise.fhg.de, http://www.ise.fhg.de

Im Rahmen der Entwicklung von Wärmeflusssteuerungen an modernen, solarthermisch unterstützten Wohngebäuden mit neuartigen Fassadensystemen, wird in diesem Beitrag auf die Modellentwicklung weiterer Wandelemente eingegangen[1]. Die Eigenschaft von Phasenwechselmaterialien, die thermische Masse von Gebäuden in einem bestimmten Temperaturbereich zu erhöhen macht diese Materialien interessant für die Baubranche und damit relevant für das Wärmemanagement im Gebäude.
Die Modellentwicklungen beruhen auf der Simulationsumgebung *ColSim*, die sich gerade bei der Untersuchung und Entwicklung von Regelungen bewährt hat. Um der konventionellen Wärmeübertragungsschnittstelle gerecht zu werden, wurde das Heizkörpermodell erweitert. Da das Gebäudemodell in *ColSim* nach dem 2-Knoten-Modell für Luft und Strahlung modelliert ist, erfolgt nun die Wärmeabgabe des Heizkörpers in den Raum ebenfalls getrennt nach konvektivem und radiativem Anteil.

Das Phasenwechselmodell

Phasenwechselmaterialien (PCM) oder auch Latentwärmespeicher finden zunehmend in unserer Umgebung Verbreitung[2]. Dieses Material nutzt die Enthalpieänderung beim Phasenübergang (z. B. fest -> flüssig) zur Speicherung von Wärme bei nahezu konstanter Temperatur. Dieser Vorgang ist reversibel, so dass auch beim umgekehrten Aggregatswechsel von flüssig nach fest, bei einer konstanten Temperatur wieder Wärme abgegeben wird. Abb. 1 zeigt dies anschaulich.

Ähnlich des Einsatzes von PCM in der schon auf dem Markt befindlichen Kleidung, liegt es nahe, das PCM im Wohnungsbau einzusetzen. Durch Anpassung der Schmelztemperatur an den Raumtemperaturbereich und durch Einbringung dieser Materialien in Baustoffe, wird gerade in Gebäuden in Leichtbauweise fehlende thermische Masse substituiert. Momentan werden zwei Konzepte verfolgt. Das sind zum einen mikroverkapselte Wachse (Paraffine), die beispielsweise dem Putz beigemischt werden, und zum anderen Systeme auf Basis von Salzhydraten. All diese Entwicklungen verfolgen das Ziel, hohe Speicherdichten[3] und Wärmeflüsse[4] bei hohem Sicherheitsstandard und mechanischer Belastbarkeit (entsprechend der Bedingungen auf dem Bau) für den Einsatz im Baustoff zu erreichen.

Um den Einfluss von Phasenwechselmaterialien (PCM) in Wohngebäuden zu ermitteln, wurde innerhalb der Simulationsumgebung *ColSim* ein PCM-Modell implementiert, das in die Multi-

[1] In [Hube01] sind bereits die Modellentwicklungen in *ColSim* bezüglich der Raumknoten und Multi-Layer-Wandaufbauten mit transparenter Wärmedämmung (TWD) vorgestellt worden.
[2] So werden z. B. in Sport- und Outdoor-Kleider Phasenwechselmaterialien integriert, um einen Kühl- oder Wärmeeffekt entsprechend der Bedingungen zu erreichen. Ziel ist es, eine Komfortsteigerung für den Menschen durch Dämpfung von Temperaturspitzen zu erreichen.
[3] hohe Energiemenge bei geringem Volumen
[4] grosser Wärmetransport beim Be- und Entladen

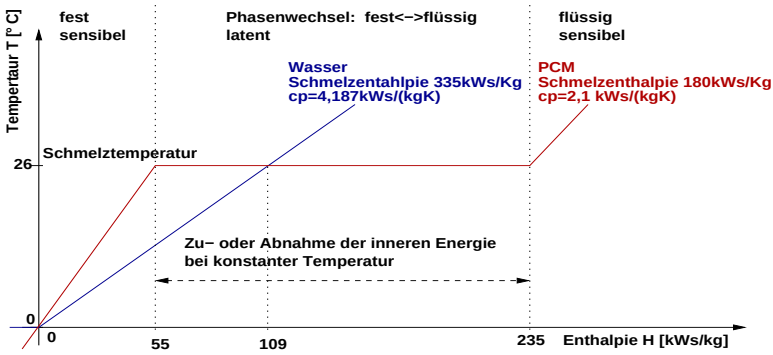

Abbildung 1: Beispiel eines Temperatur/Enthalpiediagrammes für ein Kilogramm PCM (Paraffin) mit Schmelztemperatur von ca. 26 °C. Die Kennlinie für Wasser ist zum Vergleich mit aufgetragen.

Layer-Wandkonstruktion [Hube01] integriert werden kann. Zur modellhaften Darstellung der PCM-Eigenschaften wurde das für das BESTEST-Verfahren [Judk95] erstellte und validierte *ColSim*-Gebäudemodell[5] [Bus02] genutzt. Das BESTEST-Verfahren impliziert eine sogenannte „Free-Float"-Sequenz (desweiteren mit FF gekennzeichnet), bei der weder geheizt noch gekühlt wird. Die Raumtemperatur kann frei einschwingen.[6] Die Abb. 2 zeigt einen Vergleich dieser BESTEST-„FreeFloat"-Sequenz mit einer *ColSim*-Rechnung des entsprechenden Gebäudes mit integriertem PCM im Innenputz aller 4 Wände. Beispielhaft wurde ein PCM-Putz mit einer Schmelzenthalpie von $20\,\frac{kJ}{kg*K}$ und der Schmelztemperatur von 22 °C gewählt. Das Latentmaterial wird deutlich aktiviert. Die maximale Raumtemperatur von ca. 32 °C für den Raum ohne PCM (Troom_FF) wird durch den Einsatz von PCM um ca. 4 Kelvin gedämpft (Troom_FFpcm). Am Verlauf der Temperatur des PCM-Innenputz der Nordwand (Tnode1_north_FFpcm), sieht man, dass das Material bei Erreichen der Schmelztemperatur bei dieser verharrt, bis das Material vollständig geschmolzen ist. Dann steigt die Temperatur wieder an. Bei der Abkühlung ab 16.00 Uhr verhält sich das Material entsprechend umgekehrt. Der Wärmespeichereffekt kommt zur Geltung. Die Raumtemperatur im „PCM-Raum" ist nach 18.00 Uhr höher als im Raum mit herkömmlichem Putz, da der PCM-Innenputz und die Oberflächentemperaturen der Innenwände noch deutlich grösser sind als die Umgebungstemperatur. Weitere Linien (Tsurface_north_FF) zeigen die Oberflächentemperaturen der Innenwand.

Das Beispiel zeigt, dass eine Integration eines latenten Materials in die Raumumgebung erfolgreich in das Gebäudemodell von *ColSim* stattgefunden hat. Somit werden Simulationsstudien bezüglich der Einsetzbarkeit und der Regelbarkeit von PCM-Materialien im Wandverbund möglich. Im weiteren soll durch Messreihen aus realen Testzellen das Modell geprüft und validiert werden.

[5] siehe auch entsprechenden Beitrag von Stephan Buschmann zu dieser Tagung.

[6] Das BESTEST-Verfahren schreibt ein 1-Zonenmodell mit 8m x 6m Grundfläche vor. Die Südseite beinhaltet eine 12 m^2 grosse Fensterfläche. In dem hier eingesetzten 600FF-Fall hat der Wandaufbau eine sehr leichte Bauweise. Die Raumtemperaturen bewegen sich in dem Referenztag für den FreeFloat-Fall im Bereich von -18°C und +32°C.

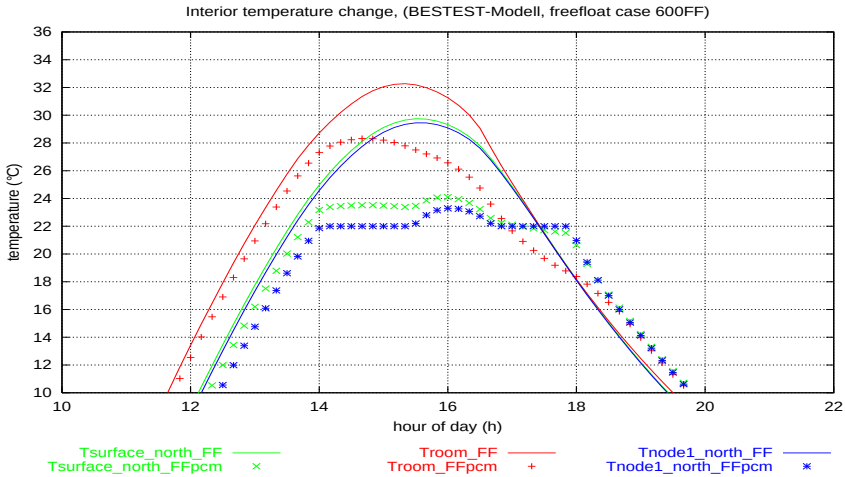

Abbildung 2: Ergebnis einer vergleichenden Simulationsrechnung eines 1-Zonenmodells mit und ohne Phasenwechselmaterial im Innenputz der 4 Wände.(Die durchgezogenen Linien zeigen den Verlauf ohne PCM, die Punkte den entsprechenden Verlauf mit PCM.)

Das Heizkörpermodell

Die Gebäudemodellentwicklung in *ColSim* durch Wittwer [Witt01, Chen99], und der zahlreichen Weiterentwicklungen erfordern, auch bei der konventionellen Wärmeeinkopplung durch Heizkörper, Modellanpassungen. Mit der Integration eines neuen detaillierteren Heizungsmodells wird der Differenzierung von konvektiven und radiativen Wärmetransport (entsprechend dem 2-Knotenmodell einer Zone) Rechnung getragen. Diese Erweiterung wurde nötig, um den veränderlichen Strahlungsanteilen unterschiedlicher Heizsysteme gerecht zu werden. Grundlage dieser Modellierung ist die Änderung der Leistung $\dot{Q}$ um die produktspezifische Norm-Wärmeleistung[7] $\dot{Q}_N$ beschrieben durch die Gleichung nach Recknagel [Reck01].

$$\dot{Q} = \dot{Q}_N * \left(\frac{\Delta t}{\Delta t_N} \right)^n$$

Δt beschreibt die mittlere Übertemperatur zwischen Heizmittel und Raumluft. Δt_N beschreibt die gleiche Übertemperatur zur Bestimmung der Norm-Wärmeleistung. In Näherung wird analog zur Gleichung der thermischen Verluste eines Sonnenkollektors ($\dot{Q}_V = A * k_o(T_K - T_U) + A * Sk_1(T_K - T_U)^2$) durch Ermittlung der Koeffizienten k_0 und k_1 eine Approximation an die Gleichung nach Recknagel vorgenommen. k_0 und k_1 repräsentieren die Wärmeübergangskoeffizienten des kombinierten konvektiven und radiativen Anteils. Zusätzlich wird das Heizkörpermodell in n Knoten abgebildet. Jeder Heizkörperknoten gibt entsprechend seiner Übertemperatur Wärme in konvektiver und radiativer Form an den Raum ab[8].

[7] Die Bestimmung der Norm-Wärmeleistung von Heizkörpern als Grundlage der Leistungstabellen der Hersteller beruhen auf DIN 4703 T1 und der neuen europäischen Norm DIN EN 442 T2.

[8] Bei umgekehrten Temperaturbedigungen, kann der Heizkörper auch Wärme aufnehmen.

Die Modellvalidierung des Heizkörpermodells erfolgt durch Messungen am Systemmessstand des Fraunhofer ISE. Die Abb. 3 zeigt das Ergebnis von Simulationsrechnungen im Vergleich mit Messwerten. Dem Simulationsmodell wurden äussere Bedingungen (T_Vorlauf, Volumen-

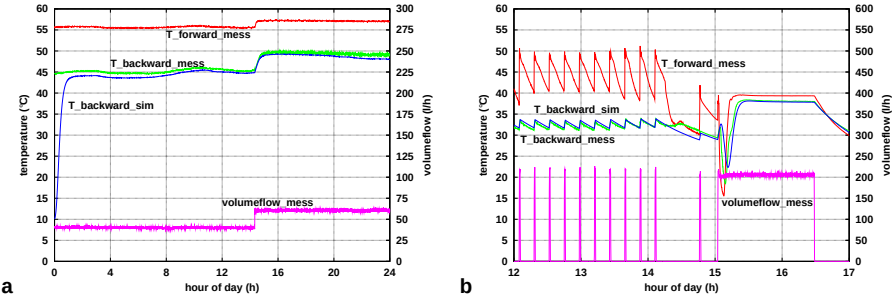

Abbildung 3: Vergleich von Simulationsergebnissen zur Austrittstemperatur mit Messwerten aus dem institutseigenen Systemteststand. Volumenstrom und Vorlauftemperatur werden variabel vorgegeben, während die Raumtemperatur nahezu fest zwischen 23-25 °C liegt.

strom, T_Umgebung) aufgeprägt. Als Heizkörperkenndaten wurden die Herstellerdaten[9] so wie die Grösse in die Parameterliste übernommen. Als Systemreaktion auf diese Randbedingungen wird die simulierte Austrittstemperatur des Heizkörpers mit der messtechnisch ermittelten verglichen. Die Diagramme zeigen zum einen (Abb. 3a) den stationären Zustand über 24 Stunden hinweg (mit einem Volumenstromsprung um ca. 14.00 Uhr), sowie die Modellantwort für dynamisches Takten und Auskühlen des Heizkörpers (Abb. 3b). In beiden Diagrammen liegen die simulierten wie gemessenen Temperaturen für den Austritt des Heizkörpers sehr nahe beieinander ($< 1K$). Dies zeigt, dass das Modell die Wärmeabgabe des Heizkörpers entsprechend der Realität abbilden kann.

Der Regelungsbedarf

Wie die Auswertung von Jahressimulationen und Messungen belegen, neigen Gebäude mit solarsensiblen passiven Elementen zur Überschreitung von angenehmen Raumtemperaturen. Weitere Eigenschaften wie Wärmespeicherung und verzögerte Wärmeabgabe definieren das Gebäudeverhalten neu. Hier kann eine vorausschauende Regelung zur Optimierung des konventionellen Heizenergiebedarfs führen.

Durch diese neue Verbrauchercharakteristik ergeben sich auch neue Optimierungspotentiale für die im Hintergrund für die Wärmeversorgung notwendige Anlagentechnik. Ein Beispiel ist die Möglichkeit einer Heizungsrücklauftemperaturregelung bei maximaler Vorlauftemperatur für eine 55/45-Auslegungen bei Niedrigenergiehäusern [Hube00]. Dieser Regelungsansatz erhöht durch eine grössere Temperaturspreizung im Pufferspeicher die solaren Gewinne eines Kollektors.

Es gilt also ein Regeloptimal über die zu regelnden Grössen zu definieren. Durch das komplexere Gebäudeverhalten gewinnen Grössen wie Einstrahlung und Nutzerverhalten zunehmend an Bedeutung. Die Kopplung an die Anlagentechnik erfordert neue intelligentere Regelungen zur Energieeinsparung.

[9] zwei-säuliger Röhrenradiator von Zehnder Typ *Charlston*

Der Ausblick

Die Möglichkeit, die thermische Masse gerade von Gebäuden in Leichtbauweise mit z. B. mikroverkapselten Paraffinen zu erhöhen[10] wird am Fraunhofer Institut für solare Energiesysteme auf mehreren Versuchsfeldern untersucht. Daraus resultierende Messdaten sind wichtiger Bestandteil von Validierungssequenzen, die im weiteren die Gültigkeit des realisierten PCM-Modells aufzeigen.

Das neue Heizungsmodell repräsentiert die wichtige Senke der (solar-) thermischer Anlagentechnik und ist für die Optimierung des Gesamtsystems hinreichend genau modelliert und kann als Wärmeübertrager von Anlage nach Gebäude eingesetzt werden.

Weitere Modellentwicklungen am Gebäude vervollständigen die modulare Modellbibliothek in *ColSim.* Somit ist ein komplexer und variabler Aufbau von Simulationsmodellen[11] möglich, der sowohl zur Analyse von Kurzzeitverhalten (Regelung und Fluidlaufzeiten), wie auch zur Strategiebewertung von Jahressimulationen genutzt werden kann. Hiermit wird die Fähigkeit der hochdynamischen Regelungsverfahren erprobt.

Literatur

[Bus02] Buschmann S.: Simulationsgestützte Untersuchung zum Energiesparpotential ausgewählter Fassadenkonstruktionen. Diplomarbeit Fh Münster 2002

[Chen99] Chen, T.: Entwicklung und Implementierung eines Raummodells in der Simulationsumgebung ColSim. Studienarbeit TH Karlsruhe 1999

[Hube01] Hube W.: Betrachtungen zur Heizkennlinie eines Niedrigenergie-Mehrfamilienhauses und ColSim-Erweiterungen zur Untersuchung integraler Regelungen zur Wärmeversorung. 11. Symp. Thermische Solarenergie OTTI-Kolleg, Staffelstein 2001, 214-219

[Hube00] Hube W.: Entwicklungen von neuartigen Regelungskonzepten mit Hilfe der Simulationsumgebung ColSim und deren Validierung im Feldtest. 10. Symp. Thermische Solarenergie OTTI-Kolleg, Staffelstein 2000, 288-292

[Judk95] Judkoff,R.: International Energy Agency Building Energy Simulation Test (BESTEST) and Diagnistic Method. NREL/TP-472-7332. Golden,CO: National Renewable Energy Laboratory, 1995

[Reck01] Recknagel, H.; Sprenger, E.; Schramek, E. u. a.: Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik. 70. Aufl. München: Oldenbourg Industrieverlag 2001

[Witt01] Wittwer C.: ColSim- A new simulation environment for complex system analysis and controllers. Building Simulation Conference 2001, Rio de Janeiro, Brasilien

[10] in einem definierten Temperaturbereich

[11] dynamischen Kopplung von thermischen Anlagenkomponenten und solarsensiblen Wohngebäuden