

# **Evaluierung der Energieeffizienz von aktiv durchströmten Wandkühlflächen mit Phasenwechselmaterial in Wohngebäuden in Kombination mit einer Zisternenkühlung und Optimierung des Betriebes durch Entwicklung geeigneter Regelstrategien**

## **Kurzbericht**

Der Forschungsbericht wurde mit Mitteln der Forschungsinitiative „Zukunft Bau“ des Bundesamtes für Bauwesen und Raumordnung gefördert (Aktenzeichen: Z6 – 10.08.18.7-07.29/II2-F20-07-022). Die Verantwortung für den Inhalt des Berichtes liegt bei den Autoren.

### Projektkoordination

Christof Stölzel  
VARIOTEC GmbH & Co. KG  
Weißmarterstr. 3  
D-92318 Neumarkt i.d. Opf.

### Projektbearbeitung

Dipl.-Ing. Doreen Kalz  
Dipl.-Ing. Jan Wienold  
Dipl.-Ing. Martin Fischer

Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE  
Abteilung Thermische Anlagen und Gebäudetechnik  
Gruppe Solares Bauen  
Heidenhofstraße 2  
79110 Freiburg

Freiburg, 21. Oktober 2008

## Ziel und Durchführung der Forschungsaufgabe

Gegenstand des vorliegenden Forschungsvorhabens ist die Evaluierung eines innovativen Kühlkonzeptes bestehend aus Kombi-Regenwasserzisternen (23 m<sup>3</sup>) und thermoaktiven Bauteilsystemen für ein Niedrigenergie-Wohngebäude (290 m<sup>2</sup>) in Deutschland. Das Gebäude zielt auf einen reduzierten Primärenergiebezug ab, der durch die Integration verschiedener passiver Maßnahmen erreicht werden soll: hochwertige Gebäudehülle mit Vakuumdämmpaneelen, luftdichte Gebäudehülle mit einer Zu- und Abluftanlage und Wärmerückgewinnung sowie reduzierte solare Lasten durch ein Sonnenschutzsystem.

Unter dieser Prämisse wurden Langzeitmessungen über einen Zeitraum von zwei Jahren (2006–2007) in hoher Auflösung und mit einer begleitenden Betriebsoptimierung durchgeführt. Die Messungen umfassen Energien für Heizung, Kühlung und Lüftung, den Hilfsenergieeinsatz, die thermische Performance der Regenwasserzisternen, den thermischen Komfort, die Luftqualität und das lokale Wetter.

Weiterhin wird mittels einer modellbasierten Auswertung der Ergebnisse aus der Langzeitmessung der Kühlbetrieb analysiert. Mit einem validierten Gebäude- und Anlagenmodell werden auf der Grundlage von Modellrechnungen in der Simulationsumgebung TRNSYS verschiedene Regelstrategien und Betriebsweisen in Bezug auf Energieeffizienz, bereitgestellte Kühlenergie, thermischen Raumkomfort und den Betrieb der Kühlzisterne (Kühlpotential über die gesamte Sommerperiode) untersucht und bewertet.

*Stichworte:* Wohngebäude, Langzeitmonitoring, thermischer Komfort, Umweltenergiequelle und -senke, thermoaktive Bauteilsysteme, Energieeffizienz, Regenwasserzisterne

## Gebäude- und Systembeschreibung

*Gebäude:* Das Gebäude mit einer Nettogrundfläche von 290 m<sup>2</sup> (drei Geschosse, Nord-Süd-Ausrichtung) zielt auf einen reduzierten Primärenergiebezug ab, der durch die Integration verschiedener passiver Maßnahmen erreicht werden soll: hochwertige Gebäudehülle mit Vakuumdämmpaneelen, luftdichte Gebäudehülle mit einer Zu- und Abluftanlage und Wärmerückgewinnung sowie reduzierte solare Lasten durch ein Sonnenschutzsystem.

*Lüftung:* Eine Zu- und Abluftanlage mit Wärmerückgewinnung im Winter (Effizienz 80%) stellt 200 m<sup>3</sup>/h Frischluft für das Gebäude zur Verfügung. Die Außenluft wird durch ein Erd-Luft-Register angesaugt und durch dieses vorgewärmt, so dass die Gefahr der Vereisung der Wärmerückgewinnung im Winter minimiert wird. Im Sommer wird die Zuluft dann durch die im Erdreich verlegte Zuluftleitung des Erd-Luft-Registers gekühlt.

*Umweltenergiequelle und -senke:* Als Wärmequelle und -senke stehen zwei Kombi-Zisternen (Einbautiefe 3 m) mit einem Gesamtvolumen von 23 m<sup>3</sup> zur Verfügung. Gespeist werden die Zisternen durch das auf der ca. 80 m<sup>2</sup> großen Satteldachfläche anfallende Regenwasser. Die Wärmezisterne dient als Wärmequelle für die Wärmepumpe im Heizbetrieb. Im Sommer steht die Kältezisterne als Wärmesenke für den Kühlbetrieb zur Verfügung. Mittels eines in der Kühlzisterne installierten Wärmeübertragers wird Kühlwasser für das TABS System bereitgestellt. Die Nutzung von Regenwasser als Umweltenergie ist abhängig vom umgebenden Erdreich, der Häufigkeit und des Volumens des Niederschlags, dem Betrieb des Systems (Grundlast, Spitzenlast) und dem Heiz- und Kühlbedarf des Gebäudes.

*Heizsystem:* Im Heizfall werden die thermoaktiven Bauteilsysteme über einen Schichtenspeicher versorgt, der primär durch 12 m<sup>2</sup> Solarkollektoren und sekundär durch eine Wärmepumpe erwärmt wird. Ist die Temperatur im Schichtenspeicher für den Heizbetrieb nicht ausreichend (wenige oder keine Nutzung von Solarenergie) und ist auf Grund der geringen Wassertemperatur der Wärmequelle von unter 4°C in der Wärmezisterne kein Wärmepumpenbetrieb möglich, so kann eine Erwärmung des Pufferwassers über einen in den Schichtenspeicher integrierten elektrischen Heizstab erfolgen. Der Wärmepumpe stehen zwei Regenwasserzisternen mit einem Volumen von 23 m<sup>3</sup> einschließlich des umgebenden Erdreichs als natürliche Wärmequelle zur Verfügung.

*Kühlsystem:* Im Kühlfall werden die thermoaktiven Bauteilsysteme direkt über einen in die Regenwasserzisterne (Volumen 12 m<sup>3</sup>) integrierten Rohrwärmetauscher mit Kälteenergie versorgt. Das Gebäude wird ausschließlich durch thermoaktive Bauteilsysteme (TABS, 284 m<sup>2</sup>), die in Wände und Decken integriert sind, geheizt und gekühlt.

*Phasenwechselmaterial (PCM):* Im Gebäude wird mikroverkapseltes PCM im Gipsputz und in Trockenbauplatten eingesetzt, um die thermische Speicherkapazität zu erhöhen. Der Temperaturbereich des Phasenwechsels (fest-flüssig) liegt zwischen 23 und 26°C mit einer latenten Wärmespeicherkapazität von 306 kJ/m<sup>2</sup> (Trockenbauplatte) and 217 kJ/m<sup>2</sup> (Putz). Das PCM wird im Tagesverlauf durch überschüssige interne und solare thermische Energie beladen und dämpft somit die

Raumtemperaturentwicklung. Nachts wird die gespeicherte Wärme im PCM aktiv durch das TABS System in Kombination mit der Umweltenergie entladen.

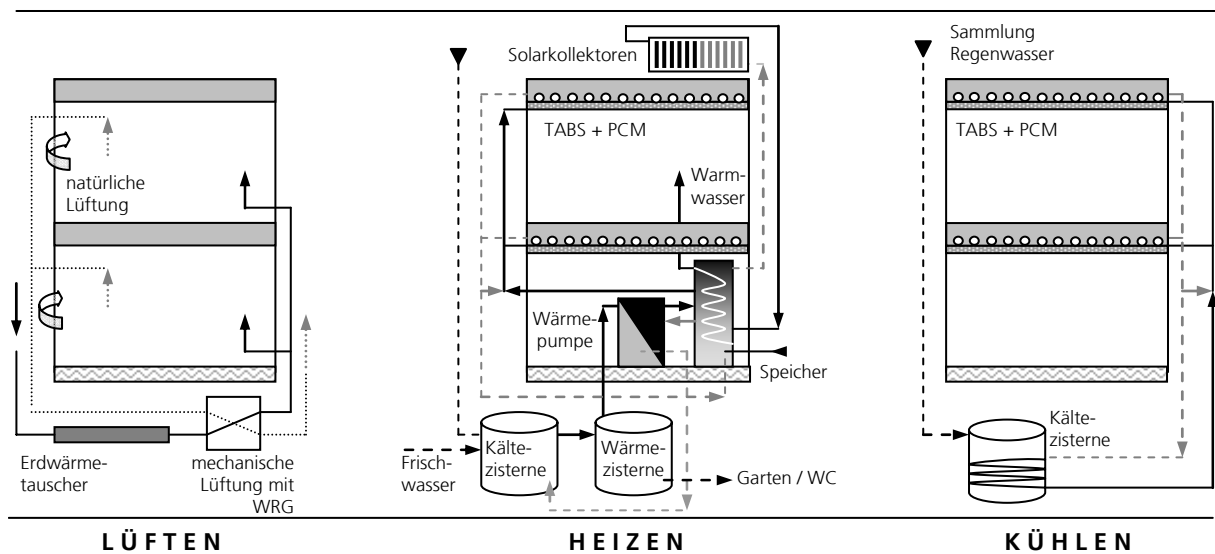


Bild 1: Energiekonzept: (i) hybride Lüftung, (ii) Heizen: Regenwassersammlung in Zisternen (24 m<sup>3</sup>) in Kombination mit einer Wärmepumpe und 12 m<sup>2</sup> Solarkollektoren, (iii) Kühlen: Regenwassersammlung in Zisterne (12 m<sup>3</sup>). Wärme- und Kälteübergabe im Raum mittels thermoaktiven Bauteilsystemen (TABS, 284 m<sup>2</sup>). Mikroverkapselte Phasenwechselmaterialien (PCM, Paraffin) in Wänden und Decken zur Erhöhung der thermischen Speicherkapazität des Gebäudes.

## Zusammenfassung der Ergebnisse

### Regenwasser als Umweltenergiesenke

*Temperaturentwicklung der Regenwasserzisternen:* Im Kühlfall liegen die Vorlauftemperaturen der Kältezisterne zwischen 10 und 22°C bei einer ausgeprägten Temperaturschichtung in der Zisterne. Ein kontinuierlicher Betrieb des Kühlsystems wirkt sich jedoch ungünstig auf das Kühlpotential der Zisterne aus, d.h. ein kontinuierlicher Kühlbetrieb verursacht bei Regenwasserzisternen mit relativ geringem Volumen um 12 m<sup>3</sup> einen raschen Anstieg der Zisternentemperatur, so dass effektives Kühlen über die gesamte Sommerperiode kaum möglich ist. Daher ist die richtige Betriebsweise und

Regelung des Anlagensystems für eine effektive und auch effiziente Kühlung wichtig.

*Energiebilanz der Regenwasserzisternen:* Die Energiebilanz der Regenwasserzisternen wird durch folgende vier Parameter bestimmt: (i) Wärmespeicherung in der Zisterne (Kühlfall) und Wärmeentzug aus der Zisterne (Heizfall) sowie Wärmegewinne und –verluste (ii) an das Erdreich und die Umgebung, (iii) durch Regenwasser und (iv) durch Frischwassernachspeisung. Die Regenwasserzisternenanlage nutzt die oberflächennahe Geothermie. Damit ist der Wärmegewinn vom bzw. Wärmeverlust an das Erdreich neben der gespeicherten bzw. entzogenen Wärme aus der Zisterne der entscheidende Parameter, der die Energiebilanz der Zisternen bestimmt. Sowohl Regenwasser als auch Frischwassernachspeisung haben nur einen untergeordneten Einfluss auf die Energiebilanz und damit die Temperaturentwicklung in den Zisternen. In der Sommerperiode erfolgt der entscheidende Wärmeverlust der Kühlzisterne an das umgebende Erdreich mit 950 kWh/a bzw. ca. 8,1 Watt pro Quadratmeter Oberfläche der Zisterne. Im Vergleich dazu entspricht das der Kühlzisterne zugeführte Regenwasser einen Wärmeverlust von 47 kWh/a. Die Frischwassernachspeisung führt zu einem Wärmeverlust von ca. 92 kWh/a (signifikant nur in den Sommermonaten Juli und August).

*Energiebezug und Energieeffizienz:* Die Kühlleistung der Kältezisterne liegt zwischen 0,5 und 2 kW mit einer ausgeprägten Korrelation zur Wassertemperatur. Während der Sommermonate variiert die durch die Zisterne bereit gestellte Kühlenergie zwischen 200 und 550 kWh/Monat (2006) und ist im Betriebsjahr 2007 annähernd konstant bei 300 kWh/Monat. Die Energieeffizienz der Regenwasserzisterne, ausgedrückt als Jahresarbeitszahl (JAZ), liegt zwischen 3 und 6,8  $\text{kWh}_{\text{therm}}/\text{kWh}_{\text{el}}$ .

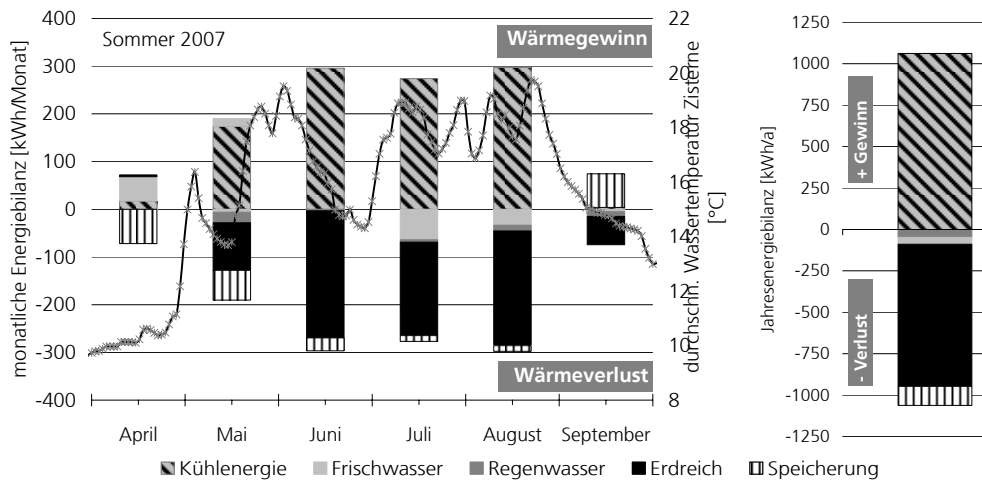


Bild 2: Monatliche (links) [kWh/Monat] und jährliche (rechts) [kWh/a] Energiebilanz der Kältezisterne über die Betriebsperiode Mai bis September 2007. Die Energiebilanz wird bestimmt durch Wärmespeicher und Wärmeentzug der Zisterne sowie Wärmeverlust an das Erdreich, durch Regenwasser und durch Frischwasser. Wärmeverlust ans Erdreich ca. 8 Watt pro Quadratmeter Zisternenoberfläche (29 m<sup>2</sup>).

## Thermoaktive Bauteilsysteme (TABS)

*Wärme- und Kälteverteilung und Übergabe im Raum mittels thermoaktiver Bauteilsysteme:* Die Vorlauftemperatur der TABS im Kühlfall liegt zwischen 17 und 23°C mit sich einstellenden Rücklauftemperaturen zwischen 19 bis 26°C. Damit liegt die übertragene Kühlenergie zwischen 1 und 1.5 kWh/m<sup>2</sup>Monat. Die Differenz zwischen Deckenoberfläche und Raumtemperatur schwankt zwischen einem und maximal vier Kelvin.

Großes Optimierungspotential enthalten das hydraulische System und die zugehörigen Förderpumpen, da diese einen hohen Anteil der Stromaufnahme der Haustechnik verursachen (bis zu 28%). Daher sollte nach Möglichkeiten gesucht werden, diese eingesetzte Hilfsenergie entscheidend zu minimieren. Dies ist zum einen durch Änderungen der Leitungsführung oder -dimensionierung im Bereich der Hydraulik möglich. Durch den Einsatz von hocheffizienten Pumpen kann zum anderen die Anlageneffizienz entscheidend verbessert werden (für das vorliegende Projekt eine Jahresarbeitszahl bis zu 20 kWh<sub>therm</sub>/kWh<sub>el</sub>).

*End- und Primärenergiebezug des Gebäudes:* Der monatliche Endenergiebezug für die technische Gebäudeausrüstung (Heizen, Kühlen and Lüften) variiert zwischen 0.5 and 6 kWh<sub>end</sub>/(m<sup>2</sup><sub>NGF</sub>Monat). Der jährliche Primärenergiebezug für

die Gebäudetechnik liegt bei  $52 \text{ kWh}_{\text{prim}}/\text{m}^2_{\text{NGFA}}$ , wobei ein Anteil von 28% auf den Hilfsenergiebezug für die Pumpen im Primär- und Sekundärkreis entfällt (Heizen und Kühlen).

*Betriebsweise und Regelung des Kühlsystems:* Unter Berücksichtigung der zu optimierenden Parameter Komfort, Energieeffizienz und Kühlpotential der Kältezisterne erzielt eine Regelung der Vorlauftemperatur der thermoaktiven Bauteilsysteme nach der Außentemperatur die besten Ergebnisse. Hohe Außentemperaturen bedingen dabei eine geringere Vorlauftemperatur bis minimal  $16^\circ\text{C}$ . Dies führt zur Abfuhr höherer Wärmelasten und damit zu kürzeren Pumpenlaufzeiten, was sich günstig auf die Energieeffizienz des Systems auswirkt. Das recht schnell reagierende thermoaktive Bauteilsystem (oberflächennahes System) erfordert keinen retrospektiven oder prädiktiven Regler. Die Regelung der Sollwerte der operativen Raumtemperatur nach dem gleitenden Mittel der Außentemperatur gemäß des adaptiven Komfortmodells (DIN EN 15251:2007-08) führt zu höheren Temperaturniveaus zwischen  $24$  und  $28^\circ\text{C}$ . Da nach dem Komfortmodell höhere Temperaturen zulässig sind, wird weniger Kühlenergie erforderlich. Dies begünstigt ein über die gesamte Sommerperiode zur Verfügung stehendes Kühlpotential der Zisterne.

*Thermischer Raumkomfort:* Die Messung der Raumtemperaturen im Gebäude zeigt, dass ganzjährig ein sehr hoher Komfort im Gebäude gegeben ist. Besonders im Bereich der Gebäudekühlung während der Sommermonate ergeben sich durch die Einbindung der Regenwasserzisternen große Vorteile. Der erreichte sommerliche Komfort wurde durch den Einsatz der Kühlzisterne maßgeblich positiv beeinflusst. Die operative Raumtemperatur im Sommer wird gemäß der Richtlinien DIN EN 15251:2007-08 und EN ISO 7730:2005 bewertet, die unterschiedliche Zeiträume der Außentemperatur berücksichtigen. Für die Auswertung wird eine ganztägige Anwesenheit der Nutzer im Wohnbereich angenommen. Im Auswertungszeitraum der Messung sind Außentemperaturen von über  $30^\circ\text{C}$  über mehrere Tage und Spitzenwerte bis zu  $35^\circ\text{C}$  gemessen worden. Dabei steigt die ORT auf maximal  $25,5^\circ\text{C}$  an und schwankt im Tagesverlauf um maximal drei Kelvin. Im Wohnbereich beläuft sich die Überschreitungshäufigkeit der Komfortklasse A im Betriebsjahr 2007 auf 90 (EN 15251:2007-08) bzw. 100 Stunden (EN ISO 7730:2005). Damit kann das Gebäude der Komfortklasse A (90% Nutzerzufriedenheit) zugewiesen werden.

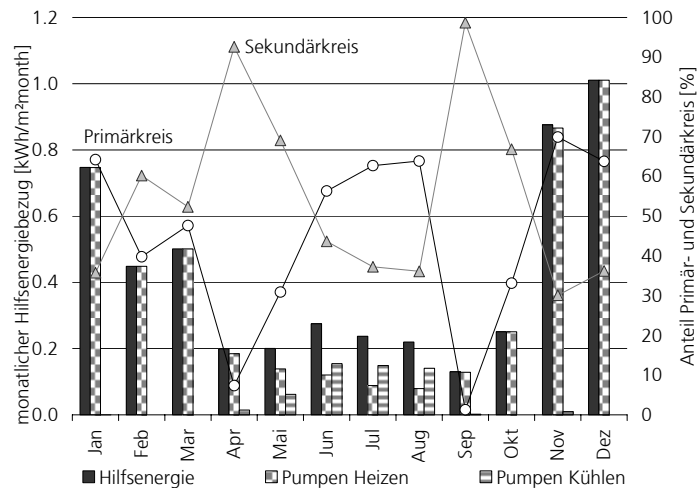


Bild 3: Monatlicher elektrischer Energiebezug [kWh/m²Monat] für die Erzeugung (Primärkreis) und Verteilung/Übergabe (Sekundärkreis) von Wärme- und Kälteenergie. Der Anteil [%] des Primär- und Sekundärkreises am primären Hilfsenergiebezug ist auf der zweiten y-Achse dargestellt.

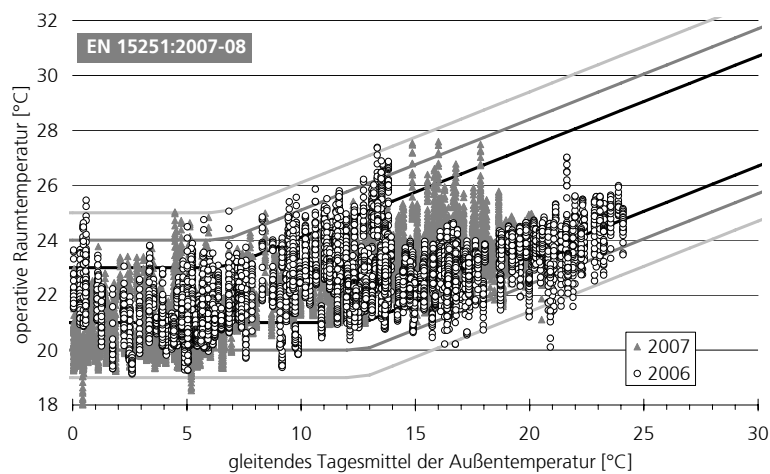


Bild 4: Bewertung der stündlich gemessenen operativen Raumtemperatur [°C] im Wohnbereich (3. OG) über 24 Stunden nach dem adaptiven Komfortkriterium der Richtlinie DIN EN 15251:2007-08. Die Graphen stellen die Komfortklassen A, B und C entsprechend der Nutzerzufriedenheit von 90, 85 und 65% (schwarz, dunkelgrau, hellgrau) dar.