

Jan Cremers
 Ursula Eicker
 Sebastian Fiedler
 Siegfried Baumgartner

Beispiel für die Wechselwirkung einer komplexen, energieproduzierenden Gebäudehülle mit der Gebäudetechnik

Gebäude bedingen ein Drittel des weltweiten Gesamtenergieverbrauchs und damit auch ca. ein Drittel der weltweiten Treibhausgas-Emissionen. Der Bausektor produziert außerdem weltweit 25–40% aller festen Abfälle und verbraucht damit insgesamt ungefähr die Hälfte aller Primärressourcen. Von daher ist gerade dieser Bereich gehalten, durch den größtmöglichen Einsatz von erneuerbaren Energien und einen umfassenden integrierten Ansatz einen Beitrag zu Energieeinsparung und -effizienzsteigerung zu leisten. Diesem Thema widmete sich der internationale Wettbewerb „Solar Decathlon Europe 2010“, der ein in den USA sehr erfolgreich etabliertes Modell nach Europa holt.

Wie könnte der Wohnungsbau in Zukunft aussehen, der das solare Bauen mit hohen gestalterischen Ansprüchen an die Architektur verbindet? Gefordert waren prototypische, voll funktionsfähige Häuser mit einer Grundfläche von max. 74 m², die in der Jahresbilanz mehr Energie regenerativ bereitstellen, als sie selbst benötigen. Es geht dabei aber nicht nur um den Energieverbrauch, sondern um einen ausgewachsenen „Zehnkampf“, d. h. neben energetischen Aspekten spielen weitere Disziplinen eine Rolle: u. a. Funktion, Gestaltung, Marktfähigkeit, Qualität der Umsetzung und Kommunikation der Ideen. Nachhaltigkeit wird als komplexes Themenfeld großer Breite ernst genommen. Hauptziel des Wettbewerbs ist es, bei Studenten und in der breiten Öffentlichkeit das Bewusstsein für die Möglichkeiten des energieeffizienten Bauens und der Nutzung regenerativer Energien zu steigern. Darüber hinaus soll die Markteinführung innovativer solarer Energietechnologien gefördert und der Nachweis erbracht werden, dass energieeffizientes Bauen mit hohem Wohnkomfort und architektonischer Qualität verwirklicht werden kann.

Die Hochschule für Technik Stuttgart wurde Ende 2008 als einer von 20 Teilnehmern aus einer Vielzahl internationaler Bewerber ausgewählt. Die Häuser aller Teams präsentierten sich im Juni 2010 eine Woche lang als „Solar Village“ im Zentrum von Madrid einer breiten Öffentlichkeit. Neben hohen Anforderungen an die Energieeffizienz stellten auch die Mittelbeschaffung, der Transport und die mit neun Tagen äußerst kurze Aufbauzeit in Madrid eine große Herausforderung dar.

Das Team der HFT Stuttgart und der Beitrag home⁺

Für diesen Wettbewerb wurde die umfassende Kompetenz der Hochschule gebündelt, indem neben allen einschlägigen Studiengängen (Architektur, Bauphysik, Innenarchitektur, Konstruktiver Ingenieurbau, Infrastrukturmanagement und Sustainable Energy Competence) auch das Zentrum für angewandte Forschung nachhaltige Energietechnik (zafh.net) eingebunden wurde. Das zafh.net hatte

bereits beim Solar Decathlon 2007 das siegreiche Team Germany der TU Darmstadt bei der Durchführung der energetischen Gebäudesimulation und der Entwicklung eines innovativen Kühlkonzepts unterstützt.

Ausgangspunkt des Entwurfs home⁺ (Bild 1 und 2, vergl. außerdem [1–4]) ist ein kompaktes und sehr gut gedämmtes Volumen, das in einzelne Module aufgeteilt wird, die mit etwas Abstand zueinander angeordnet werden. Die entstehenden Fugen dienen der Belichtung, der Belüftung, der Vorwärmung im Winter und der passiven Kühlung im Sommer. Eine besondere Rolle spielt dabei der gestalterisch und räumlich prägende „Energieturm“, der im Zusammenspiel von Wind, Verdunstungskälte und thermischem Auftrieb die Belüftung und Kühlung der Zuluft des Gebäudes übernimmt, ohne dabei Strom für den Lufttransport oder die Kühlung zu benötigen. Dabei bedient er sich der Grundprinzipien traditioneller Vorbilder, wie der Windtürme im arabischen Raum und der in Spanien weitverbreiteten Patios.

Im Innenraum erhöhen Phasenwechselmaterialien (PCM) die thermisch wirksame Masse der aus Holz gefertigten Module. Um den niedrigen Restenergiebedarf zu decken, wird die gesamte Gebäudehülle solar aktiviert: Das Dach und die Ost- und Westfassaden werden mit einer zweiten Haut aus neuartigen Photovoltaik-Modulen zur Stromerzeugung versehen. Damit wird das Gebäude zum „Plusenergiehaus“. Die Energiehülle erzeugt tagsüber Strom und stellt zusätzlich nachts Kälte bereit. Dazu wird Wasser aus einem Rückkühl Speicher durch Rohre hinter den PV-Modulen auf dem Dach gepumpt. Durch die Abstrahlung gegen den Nachthimmel kühlen die PV-Module aus und entziehen dem dahinter vorbeifließenden Wasser Wärme. Das so gekühlte Wasser wird zur Regenerierung der PCM-Decke im Gebäudeinneren, zur direkten Kühlung des Fußbodens und zur Rückkühlung einer kleinen



Bild 1. home⁺ Außenansicht

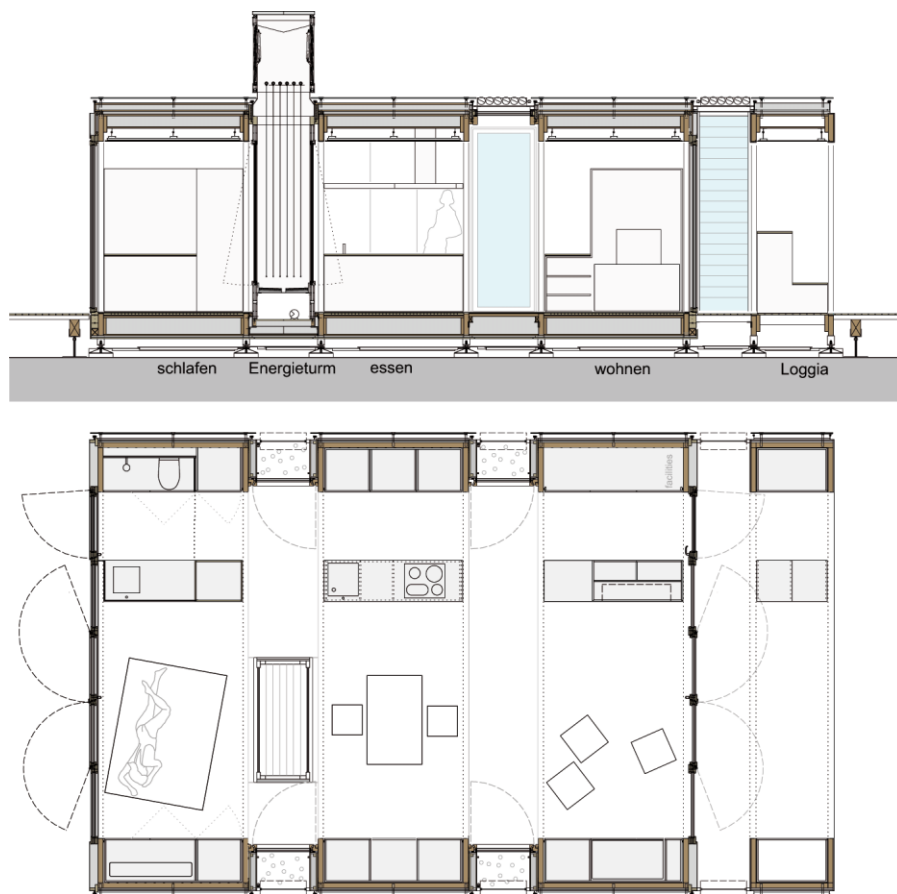


Bild 2. Grundriss und Schnitt

neu entwickelten reversiblen Wärmepumpe genutzt, die zur Abdeckung von Spitzenlasten vorgehalten wird. Diese neue Kombination aus PV-Modul und „Kälte-Kollektor“ wurde an der HFT Stuttgart selbst entwickelt.

Der modulare Aufbau des Gebäudes ermöglicht die Weiterentwicklung zu einem Bausystem. Darüber hinaus kann das Gebäude, insbesondere die Fugen, an die klimatischen Gegebenheiten anderer Standorte angepasst werden.

Grundsätzliches zur Gebäudehülle

Durch eine hoch gedämmte Gebäudehülle und effiziente Verschattungsmaßnahmen können die Lasten durch solare Einstrahlung trotz eines verhältnismäßig großen Fensterflächenanteils von ca. 25% minimiert werden. Die opaken Außenbauteile bestehen aus einer 75 mm dicken Holzkonstruktion, die auf der Außenseite mit zwei Lagen Vakuumdämmpaneelen belegt wird. Aufgrund eines neuartigen Herstellungsverfahrens weisen die Paneele eine geringere Rohdichte und damit auch eine niedrigere Wärmeleitfähigkeit auf als die bisher verwendeten VIP (Vacuum Insulation Panels). Mit einer OSB-Platte, die auf der Außenseite als Schutz für die VIP angebracht wird, ergibt sich für die Außenwände ein U-Wert $< 0,13 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$. Dach und Boden des Gebäudes haben noch niedrigere U-Werte von ca. $0,10 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$, da hier zusätzlich die Zwischenräume der Tragkonstruktion mit Schafwolldämmung gefüllt ist. Bei den verwendeten Verglasungen handelt es sich um Dreifach-Wärmeschutzgläser mit Kryptonfüllung, die einen U_g -Wert von $0,4 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ erreichen. Das Vordach auf der Südseite des Gebäudes bietet einen

Witterungsschutz und eine effiziente Verschattung für die darunterliegende Loggia und die Südverglasung. Über den Horizontalverglasungen der Gebäudefugen sind die zur Wärmeversorgung genutzten Vakuumröhrenkollektoren (ohne Reflektorbleche) angeordnet. Die vertikalen Fenster in den Fugenbereichen erhalten als beweglichen Sonnenschutz hochreflektierende textile Screens, die durch die außenliegenden Glaslamellen vor der Witterung geschützt werden.

Natürliche Lüftung

In einem hochgedämmten und weitgehend dichten Gebäude spielt die Kontrolle der Lüftung eine maßgebliche Rolle. Diese Funktion wird hier, soweit die natürliche Lüftung betroffen ist, den verglasten Fugen zugewiesen. Je nach Anforderungen an die Zuluft kommt einer von drei Fällen zur Anwendung:

- Belüftung durch den sogenannten „Energieturm“ (nachfolgend näher beschrieben)
- freie Querlüftung: durch die Öffnung der Fugen zur freien Lüftung und Kühlung in den Übergangsjahreszeiten
- Vorerwärmung der Luft: Durch die Doppelschaligkeit der verglasten Fugen erwärmt sich die Luft und kann vorgewärmt in den Innenraum eingeführt werden

Aufgrund der Klimabedingungen, die in Madrid herrschen, besitzt der Kühlfall Priorität, insbesondere angesichts der hochgedämmten Bauweise, die Transmissionswärmeverluste und somit auch die benötigte Heizlast auf ein Minimum reduziert.

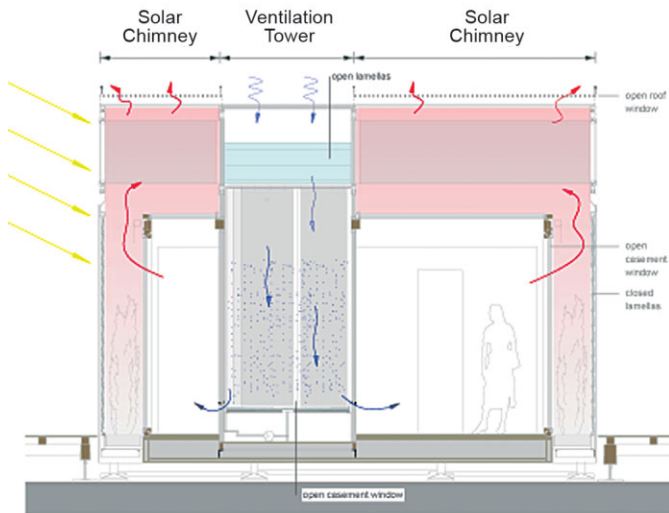


Bild 3a. Schnitt durch den Energieturm bestehend aus Solarkamin (links), Windturm (Mitte), Solarkamin (rechts)

Passive Kühlung durch den „Energieturm“

Der „Energieturm“ ist, auch in gestalterischer Hinsicht, ein Kernelement für die Gewährleistung hohen Wohnkomforts. In Verbindung mit den erwähnten traditionellen Motiven, mit heute verfügbaren Materialien und Technologien entsteht ein Element, das dem Nutzer Behaglichkeit bei niedrigem Energieverbrauch ermöglicht. Gleichzeitig transportiert der „Energieturm“ diese Gedanken des Klimakonzeptes gestalterisch, auch im Innenraum.

Die dritte Klimafuge, in dem sich der „Energieturm“ befindet, ist in drei vertikale Bereiche geteilt. Der mittlere Bereich fängt die anströmende Luft oben ein und leitet sie nach unten ins Gebäude weiter. Da der Turm das Gebäude aufgrund der Rahmenbedingungen des Wettbewerbs nur geringfügig überragt, wurde das Anströmverhalten im Vorfeld ausführlich durch Simulationen und Windkanaltests mit einem Modell untersucht. Im Inneren des Turms rieselt an abgehängten Tüchern Wasser. Hierdurch kühlt die durchfließende Luft über Verdunstungskühlung ab. Anschließend tritt diese gekühlte Luft im Sockelbereich des Turmes quellluftartig in den Innenraum ein und trägt zum Wohnkomfort bei. Auch diese Funktion des Turms wurde anhand eines 1:1-Modells ausführlich durch Messungen untersucht. Die Abluft verlässt das Gebäude durch die Bereiche links und rechts des Turmes, unterstützt durch sogenannte Solarkamine. In diesen heizen sich Mobile-artig gestaltete Absorberflächen durch die solare Einstrahlung auf und geben die Wärme an die umgebende Luft ab. Der dadurch entstehende thermische Auftrieb unterstützt die Durchströmung der Kamine und führt zu einem Unterdruck im Gebäude, wodurch die Funktion des kühlenden Teils des Turms gestärkt wird.

Konstruktiv ist dieses Fugenelement von hoher Komplexität, denn die thermische Trennebene wird im mittleren Bereich nach innen verlegt. Gleichzeitig erhöhten die gebotene Transportfähigkeit dieses Bereiches und die äußerst kurze Auf- und Abbauphase die Anforderungen erheblich. Im Ergebnis wurde die Energieturm-fuge daher in sechs vorgefertigte Teile zerlegt.

Der „Energieturm“ kann vor allem dann einen Beitrag zur Gebäudekühlung liefern, wenn die Umgebungstempe-

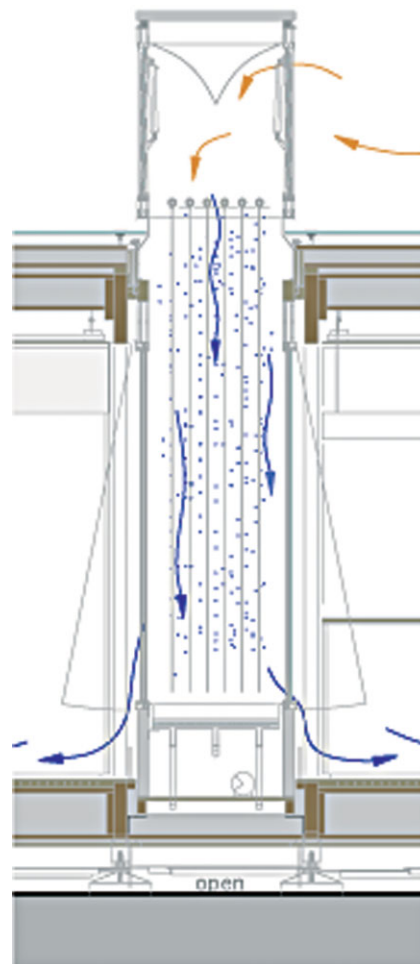


Bild 3b. Querschnitt durch den Windturm: Die warme und trockene Luft strömt oben ein, wird an den feuchten Tüchern im Turm abgekühlt und tritt unten über große Glasklappen in das Gebäudeinnere ein

raturen nicht zu hoch und vor allem die Umgebungsfeuchte niedrig ist. Um die relative Feuchte im Raum auf maximal 55% bei 25 °C Raumtemperatur zu begrenzen, darf die Zuluftfeuchte 11 g pro kg Luft nicht überschreiten. Ausgehend von der jeweiligen gemessenen Außenluftfeuchte berechnet der Regler die maximale Außenlufttemperatur, mit welcher bei Verdunstungskühlung durch den „Energieturm“ der Raum noch gekühlt werden kann. Ist die Außenluft bereits sehr feucht, darf die Umgebungstemperatur nur geringfügig über der Raumtemperatur liegen, während bei trockenen Außenluftbedingungen auch bei hoher Außentemperatur noch ein Kühleffekt erzielt werden kann.

Die Luftmenge, die durch den „Energieturm“ strömt, hängt von der jeweiligen Windrichtung und Windgeschwindigkeit ab. Die entsprechenden Widerstandsbeiwerte wurden im Windkanal mit einem Gebäudemodell detailliert vermessen. Mit den Beiwerten kann dann der Antriebsdruck für eine gegebene Windgeschwindigkeit und -richtung berechnet werden.

Abhängig von den Druckverlusten im Gebäude wird dann der durch den Turm beförderte Volumenstrom ermittelt. Pro Pascal Antriebsdruck ergeben sich ca. 200 m³/h Luftvolumenstrom. Der für die Verdunstungsmenge an den Baumwolltüchern wichtige Massenübergangskoeffizient wurde in einem Prototyp von 5 m Höhe experimentell bestimmt und liegt bei $2,24 \times 10^{-8}$ kg/(m² s Pa).

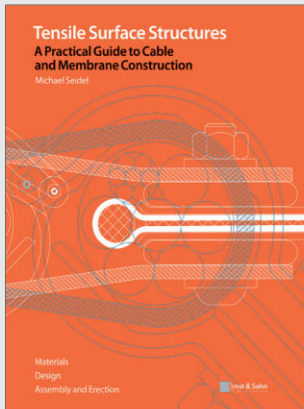
Architecture Books from Ernst & Sohn



Nixdorf, Stefan
StadiumATLAS
 Technical Recommendations for Grandstands in Modern Stadia
 2008. 368 Pages. 695 fig.
 Hardcover
 € 79,-*
 ISBN: 978-3-433-01851-4

This **StadiumATLAS** is a building-type planning guide for the construction of spectator stands in modern sports and event complexes. A methodological comparison of the venues of the FIFA World Cup 2006 in Germany continues into a catalogue of „Technical recommendations and requirements“ for the new erection or the modernization of multi-functional sports arenas on the basis of current European building regulations. The main focus lies on all essential and relevant aspects of planning and developing future concepts for the construction of grandstands.

Requirements for the building type of „gathering space“ have changed significantly within the course of the last decades. Achieving higher convenience for spectators and a better commercial exploitation have become guiding principles for the design of new sports complexes. In this handbook, the principles of building regulations and the guidelines of important sports associations are analyzed and interrelated in order to clarify dependencies and enable critical conclusions on the respective regulations. The StadiumATLAS aims to illustrate the constructional and geometrical effects of certain specifications and to facilitate decision-making for planners and clients regarding important parameters of stadium design.



Seidel, Michael
Tensile Surface Structures
 A Practical Guide to Cable and Membrane Construction
 Materials, Design, Assembly and Erection
 2009. 238 pages with 358 figures, Hardcover.
 € 139,-* / sFr 220,-
 ISBN: 978-3-433-02922-0

Tensile surface structures are the visual expression of an intensive rethinking of the topic of building envelopes by designers. Advances in design methods, materials, construction elements and assembly and erection planning in the field of lightweight construction are enabling ever more exacting applications of tensile structures with envelope and structural functions, especially in roofing over large clear spans without internal support. However, the particular mechanical characteristics of the materials used in the construction of textile structures demand consideration of the question of „buildability“. This book provides answers by discussing the fundamental influence of material manufacture and assembly in deciding the most suitable type of building or structure and its detailing in the design process. The fundamentals of material composition, manufacturing process, patterning and the behaviour of flexible structural systems are all explained here, as well as their use as structural and connection elements, and special attention is given to the erection of wide-span lightweight structures. The erection equipment is described, as well as the lifting and tensioning process and the construction methods used to erect the characteristic types of tensile structures, illustrated with a selection of example projects.

Fax-Antwort an +49 (0)30 47031 240

978-3-433-01851-4	StadiumATLAS	79,00 €*
978-3-433-02922-0	Tensile Surface Structures	139,00 €*

Contact person			
Company		UST-ID Nr./VAT-ID No.	
Street/No.		email	
Country	—	Zip Code	Location

X

Date _____ Signature _____

Ernst & Sohn
 Verlag für Architektur und technische
 Wissenschaften GmbH & Co. KG

Ernst & Sohn
 A Wiley Company
www.ernst-und-sohn.de

For Order and Customer Service:
 Verlag Wiley-VCH Telefon: +49(0) 6201 / 606-400
 Boschstraße 12 Telefax: +49(0) 6201 / 606-184
 69469 Weinheim E-Mail: service@wiley-vch.de

*In EU countries the local VAT is effective for books and journals. Postage will be charged. Whilst every effort is made to ensure that the contents of this advertisement are accurate, all information is subject to change without notice. Our standard terms and delivery conditions apply. Prices are subject to change without notice. 0115109026_my

Die Prüfstandsmessungen wurden zur Validierung eines Simulationsmodells verwendet, mit welchem das Potenzial des „Energieturms“ für unterschiedlichste Umgebungsbedingungen ermittelt wurde. Bei 30 °C und 50% relativer Feuchte werden bei moderaten Windgeschwindigkeiten von 2,5 m/s maximal 1,2 kW Kühlleistung erzeugt. Sinkt die Windgeschwindigkeit auf 1 m/s, ist die Leistung auf 0,4 kW reduziert. Eine Durchströmung findet dabei nur bei günstigen Windrichtungen statt. Der energetische Beitrag zur sommerlichen Kühlung des Gebäudes ist mit 1,1 kWh/m² eher gering. Diese Kühlenergie wird jedoch ohne Antriebsenergie mit einem geringen Wasserverbrauch bereitgestellt. Weiterhin kann der Turm zur freien Lüftung ohne Antriebsstrom genutzt werden.

Innovative Speicherdecke, neuartige PV/T-Kollektoren und deren Wechselwirkung mit dem Rückkühlspeicher des Gebäudes

Eher im Verborgenen wirkt eine mit Phasenwechselmaterialien (PCM) belegte abgehängte Decke, die tagsüber Wärme aus dem Raum aufnimmt. Nachts werden die PCM wieder ausgehärtet, indem die Decke mit Wasser durchströmt wird. Das Wasser wird abgekühlt, indem es hinter den auf der Dachfläche liegenden PV-Modulen vorbeigeführt wird, die mit dem kalten Nachthimmel im Strahlungsaustausch stehen.

Die einfachste Methode zur Vermeidung von Temperaturspitzen im Raum besteht darin, ein Gebäude mit ausreichend thermischer Masse in den raumumschließenden Bauteilen auszuführen. Bei einem Haus, das über ca. 1800 km quer durch Europa transportiert werden muss, kommt eine massive Bauweise aus nachvollziehbaren Gründen weniger in Frage. Bauteile mit integrierten PCM bieten aber die Möglichkeit, Leichtbauten mit zusätzlicher thermischer Trägheit zu versehen. Diese Materialien (in diesem Fall spezielle Salzhydrate) nehmen im Temperaturbereich ihres Schmelzpunktes (hier ca. 22 °C) verhältnismäßig große Mengen an Wärme aus dem Raum auf. Sinkt die Raumtemperatur unter die Erstarrungstemperatur oder werden die PCM mit Wasser gekühlt, gehen sie wieder in den festen Aggregatzustand über und geben Wärme ab.

Die Wärme, die tagsüber in die Decke eingespeichert wird, soll ihr nachts mit möglichst geringem Primärenergieaufwand wieder entzogen werden. Das dafür erforderliche Kühlwasser wird daher nicht auf konventionelle Weise, d. h. mit einer Kompressionskälteanlage, erzeugt, sondern über ein regeneratives Verfahren, nämlich durch Wärmeabstrahlung an den kalten Nachthimmel – ideal für den Wettbewerbsstandort Madrid mit regelmäßigen klaren Nächten im Sommer. Je nach Wassertemperatur, Außentemperatur und Bewölkungsgrad sind dabei Kühlleistungen von ca. 50–120 W/m² Dachfläche realistisch.

Das Prinzip der Strahlungskühlung beruht auf der Wärmeabgabe durch langwellige Abstrahlung eines Körpers an einen anderen Körper mit niedrigerer Temperatur, der als Wärmesenke dient. In der Anwendung zur Kühlung von Gebäuden stellt die Gebäudeoberfläche den zu kühlenden Körper dar, die Wärmesenke ist der Himmel. Dieser eignet sich dafür besonders gut, da die Himmelstemperatur – insbesondere in der Nacht – niedriger ist als die der meis-

ten Gegenstände auf der Erde. In Sommernächten kann die Himmelstemperatur auf unter 0 °C absinken; bei klarem Himmel können sogar Himmelstemperaturen von –10 °C und darunter erreicht werden.

Um diesen Effekt auszunutzen, wurde home⁺ mit einem Strahlungskühlungssystem ausgestattet, das photovoltaisch-thermische (PVT) Hybridkollektoren verwendet.

In den vergangenen Jahren beschäftigte sich eine beträchtliche Anzahl von Forschungsprojekten mit der Nutzung von Strahlungskühlung für die Gebäudeanwendung. Viele von ihnen konzentrierten sich darauf, die erzielbaren Erträge zu quantifizieren und verschiedene Standorte im Hinblick auf ihr Kühlpotenzial zu untersuchen. Trotzdem nutzen in der Praxis bisher nur wenige konventionelle Gebäude die Strahlungskühlung, was z. T. sicher daran liegt, dass Architekten und Ingenieure sich bisher nur in geringem Maße Fragen der praktischen Integration ins Gebäude gewidmet haben.

PVT-Kollektoren mit Wasser als Wärmeträgermedium werden üblicherweise dazu verwendet, tagsüber Strom und Wärme zu produzieren. Je nach Anwendungsfall kann dabei entweder der elektrische oder der thermische Ertrag im Vordergrund stehen. Im ersten Fall muss das Fluid die PV-Zellen so weit wie möglich abkühlen, um ihren Wirkungsgrad zu steigern. Im letzten Fall setzt die Art der Anwendung (Brauchwassererwärmung, thermische Kühlung ...) eine bestimmte Austrittstemperatur für das Fluid voraus. Die Konstruktion des PVT-Kollektors wird demzufolge in erster Linie vom festgelegten Ziel definiert. Eine Anwendung von PVT-Kollektoren zur Ausnutzung von Strahlungskühlung ist den Autoren nicht bekannt. Dieser Anwendungsfall erfordert eine spezielle, auf maximale langwellige Abstrahlung des Kollektors an den Himmel ausgelegte Konstruktion des PVT-Moduls. Aus diesem Grund wurde ein Kollektor ohne Abdeckung ausgewählt. Darüber hinaus muss die thermische Anbindung des Absorbers an das PV-Modul so gut wie möglich sein.

Für den SDE-Wettkampf wird das System zur nächtlichen Strahlungskühlung in Gestalt von 36 m² PVT-Kollektoren umgesetzt, die auf dem Dach horizontal angeordnet sind (Bild 4). Sie werden in den frühen Nachtstunden zunächst dazu verwendet, die PCM-Decke zu regenerieren, und anschließend dazu, den 1,2 m³ großen Speichertank herunterzukühlen, der tagsüber als Wärmesenke für die Wärmepumpe dient.

Die PVT-Kollektoren wurden speziell für die Anwendung nächtlicher Strahlungskühlung entwickelt, d. h. es wurde eine möglichst gute thermische Anbindung der durchströmten Absorberbleche an das Photovoltaikmodul angestrebt und durch einen wärmeleitfähigen, mit Aluminium versetzten Epoxykleber von 0,1 mm Dicke realisiert. Um die erzielbare nächtliche Kühlleistung experimentell zu testen, wurden im Vorfeld handelsübliche PVT-Kollektoren ohne die übliche Glasabdeckung auf dem Testdach der Hochschule für Technik untersucht. Da die Messungen im Herbst bei schon recht geringen Außentemperaturen stattfanden, wurde das eintretende Kollektorwasser vorkonditioniert, so dass insgesamt recht hohe Temperaturdifferenzen von 30 K oder mehr zwischen Kollektorwasser ($T_{w,in}$) und berechneter Himmelstemperatur auftraten. Die gemessenen Kühlleistungen liegen daher bei 100 W/m² oder mehr (Bild 5).

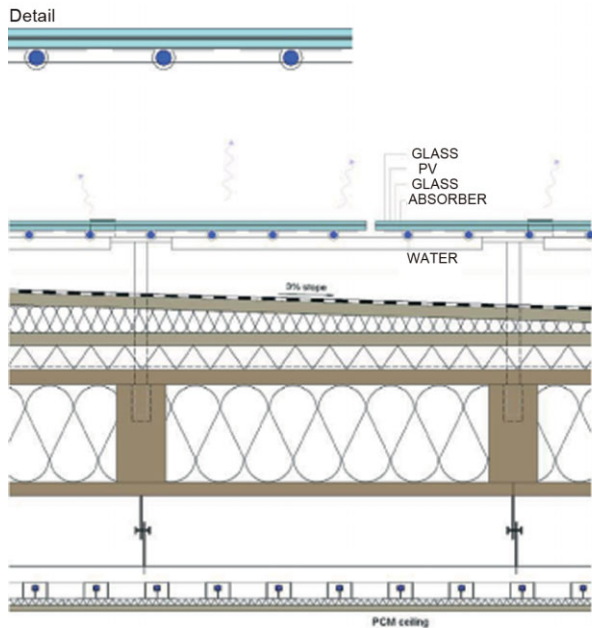


Bild 4. Funktionsweise der PVT-Kollektoren und der darunter liegenden PCM-Decke: In der Nacht wird hierzwischen zirkulierendes Wasser über Wärmestrahlungsverluste gegen den klaren und daher kalten Nachthimmel abgekühlt – ein Phänomen, das man von Tau- oder Reifbildung auf Windschutzscheiben kennt

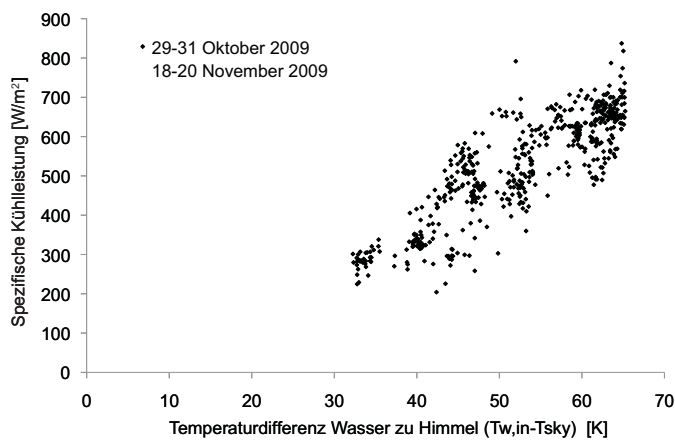


Bild 5. Spezifische Kühlleistungen der PVT-Kollektoren als Funktion der Temperaturdifferenz

Die Messreihen wurden verwendet, um ein Simulationsmodell zu testen, welches dann für beliebige Temperaturrandbedingungen und Klimas verwendet werden kann (www.insel.eu). Die Übereinstimmung zwischen Messung und Simulation ist exzellent, so dass die Leistungen und Energieerträge mit guter Genauigkeit für den Standort Madrid ermittelt werden können (Bild 6).

Die PVT-Kollektoren werden nachts ab 22 h betrieben und zirkulieren das abgekühlte Wasser prioritär durch die Raumdecke mit tagsüber geschmolzenem Phasenwechselmaterial. Wenn aus der PCM-Decke keine Wärme mehr abgeführt werden kann, werden die PVT-Kollektoren auf den Speichertank umgeleitet und kühlen diesen ab. Damit kann die Abwärme der Kompressionskältemaschine abgeführt werden, die im Betrieb Kondensationswärme erzeugt (Bild 7).

Da die Temperaturdifferenz zwischen den nächtlich kühlen PVT-Kollektoren und dem warmen Speichertank meist höher ist als zwischen PVT-Kollektor und der PCM-Decke nahe Raumtemperatur, ist die mittlere Kühlleistung bei Rückkühlung des Speichertanks höher. Für eine gegebene elektrische Leistung der Umwälzpumpe steigt somit auch die elektrische Leistungszahl. Die durchschnittlichen

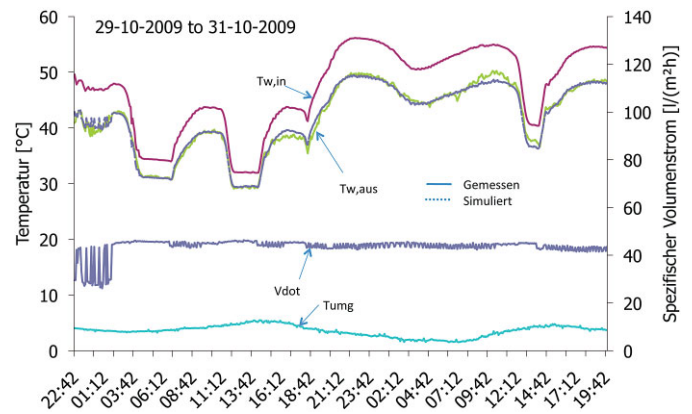


Bild 6. Gemessene Eintrittswassertemperaturen $T_{w,in}$ in den PVT-Kollektor zusammen mit spezifischem Volumenstrom und Umgebungstemperatur; die simulierte abgekühlte Austrittstemperatur stimmt hervorragend mit den gemessenen Werten überein

Leistungen für den Sommerfall am Standort Madrid sind in Tabelle 1 zusammengestellt.

Die gesamte sommerliche Kühlenergiemenge der PVT-Kollektoren beträgt 2136 kWh, was einer spezifischen Energiemenge von 60 kWh/m² entspricht. Von dieser Energiemenge werden 620 kWh direkt für die Regeneration der PCM-Decke verwendet, was eine Kühlenergiemenge von 11 kWh/m² ergibt. Die restlichen 1516 kWh wurden für die Abkühlung des Speichers verwendet. Davon sind 410 kWh bei so niedrigen Temperaturen verfügbar, dass eine Fußbodenkühlung von 30 m² betrieben werden kann. Die restlichen 1106 kWh werden für die Rückkühlung der Kältemaschine verwendet.

Die PCM-Decken stellen somit 30% der gesamten erforderlichen Kühlenergiemenge von 40 kWh/m² bereit. Die Durchströmung des Fußbodens mit kühlem Speicherwasser deckt weitere 20% der Kühlenergiemenge. Zusammen stellen die PVT-Kollektoren damit direkt 50% der Kühlenergie des Gebäudes zur Verfügung. Die verbleibenden 50% werden z. T. durch indirekte Verdunstungskühlung der Frischluft bereitgestellt (20%), zum anderen Teil durch die elektrische Kältemaschine. Durch die Abkühlung des Speichertanks tragen die PVT-Kollektoren auch

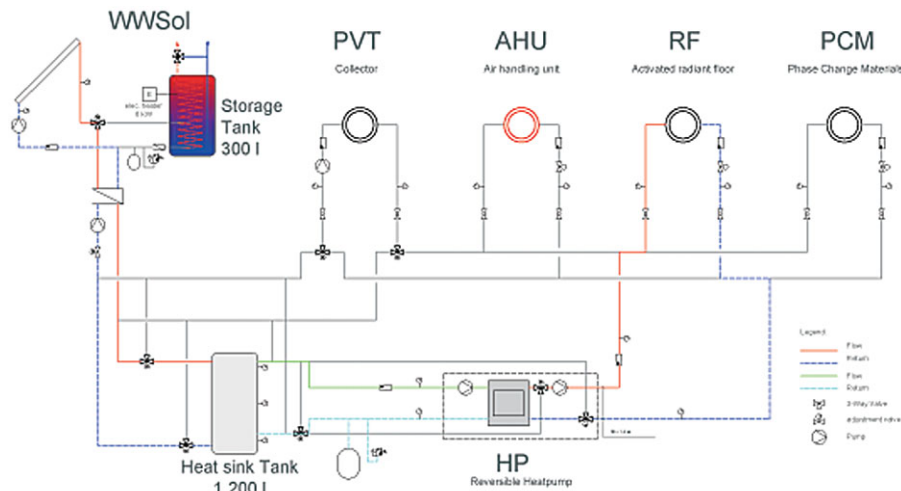


Bild 7. Systemschema der Anbindung der PVT-Kollektoren an die PCM-Decke sowie den Kaltwasserspeicher unten im Bild (Bilder: SDE-Team der HFT-Stuttgart)

Tabelle 1. Kennwerte für die erreichbaren Leistungen und Leistungszahlen der PVT-Kollektoren

Mittlere Kühlleistung (W/m ²)	Kühlleistung bei Betrieb mit PCM-Decke (W/m ²)	Kühlleistung bei Betrieb mit Speicher (W/m ²)
43,8	31,0	46,4
Mittlere elektrische Leistungszahl COP (-)	Elektrische Leistungszahl bei Betrieb mit PCM-Decke (-)	Elektrische Leistungszahl mit Speicherbetrieb (-)
32,5	13,6	75,4

zur Verbesserung der Leistungszahl der Kältemaschine bei, die durch die günstige Rückkühlung eine mittlere Leistungszahl von 4 erreicht.

Aktive Solartechnik in der Gebäudehülle

Die äußere Erscheinung des Gebäudes wird darüber hinaus von einer Hülle aus Photovoltaik-Modulen bestimmt, die die vier Gebäude-Module an der Ost- und Westfassade, sowie auf dem Dach bekleidet. Ihren besonderen Charakter erhält diese Hülle durch den Einsatz farbiger PV-Zellen aus polykristallinem Silizium. Durch die Verwendung der Farbtöne Bronze und Gold und den Abstand der Zellen zueinander entsteht eine mehrtönig schillernde und mehrschichtige Fassade, deren Erscheinungsbild sich je nach Blickwinkel und Beleuchtungsverhältnissen ändert. Während an der Fassade der goldene Farbton vorherrscht, wird über eine Pixelung mit bronzefarbenen PV-Zellen der Übergang zu den schwarzen PV-Zellen aus monokristallinem Silizium im mittleren Dachbereich vollzogen. Die Mischung verschiedenfarbener Solarzellen in einem Modul stellt übrigens eine technische Innovation dar und wird nach Wissen der Autoren hier erstmals umgesetzt.

Die goldenen und bronzenen polykristallinen PV-Zellen weisen einen Zellenwirkungsgrad von etwa 13% auf und lassen sich somit auch in einem Modul verbauen, ohne Einbußen beim Stromertrag in Kauf nehmen zu müssen. Mit einem Zellenwirkungsgrad von ca. 17% liefern die monokristallinen Zellen auf dem Dach aber natürlich den größten Anteil des jährlichen Stromertrags. Bei einer

installierten Gesamtleistung von ca. 12 kWp (6 kWp an den Fassaden, 6 kWp auf dem Dach) liegt der jährlichen Stromertrag am Standort Madrid bei ca. 11500 kWh. Nach den Wettbewerbsvorgaben ergibt sich ein anzunehmender jährlicher Stromverbrauch von ca. 4000 kWh. Legt man diesen zugrunde, so ergibt sich ein jährlicher Überschuss der Stromerzeugung von ca. 7500 kWh.

Thermische Kollektoren dienen zur solaren Warmwasserbereitung (Madrid) und zusätzlich zur Heizungsunterstützung bzw. Erwärmung des Speichers als Wärmequelle für die Wärmepumpe für den späteren Standort Stuttgart (Heizbetrieb im Winter). Gleichzeitig übernehmen diese speziellen, relativ großen Vakuum-Kollektorröhren im Dachbereich die Funktion des Sonnenschutzes der verglasten Fugen. Durch die optimierte Stellung und Ausrichtung der Absorberbleche in den Röhren entsteht eine Art „Shed-Dach“ bzw. Nordlichtsituation in diesen Bereichen.

Resümee

Die Wettbewerbsbedingungen „Rules and Regulations“ sind mit 155 Seiten sehr umfangreich. Eine der wichtigsten Disziplinen ist der Komfort: Die Lufttemperatur muss in einem Bereich von 23–25 °C gehalten werden, die relative Luftfeuchte in einem Bereich von 40–55%. Die Kühlung der Gebäude spielt daher während der Wettbewerbsphase in Madrid eine wichtige Rolle und sollte möglichst keine Primärenergie benötigen, da in einer weiteren Disziplin auch die elektrische Energiebilanz des Gebäudes bewertet wird. Für die Gebäudekühlung sind bisher kaum regenerative Lösungen verfügbar, daher sind innovative Ansätze gefordert. Sicher kann man die engen Begrenzungen im Wettbewerb an einigen Stellen hinterfragen, dennoch sind sie zur Förderung von Innovationen und für eine Sicherstellung einer möglichst objektiven Vergleichbarkeit wichtig. Und schon allein die vier deutschen Beiträge zeigen, dass auch in diesem sehr engen Rahmen äußerst unterschiedliche Lösungen gefunden werden können. Bereits die Form der Baukörper zeigt eine große Bandbreite, von einem reduzierten Quader bis hin zu einer Neuinterpretation des klassischen Satteldaches. Auch die eingesetzte Aktivtechnik bietet einen guten Überblick über die derzeit verfügbaren Solarsysteme. Darüberhinaus werden sogar ei-

nige neue Ansätze erprobt, wie z. B. die Stuttgarter PVT-Kollektoren. Die Teilnahme am Wettbewerb ist für alle, die es bis dahin geschafft haben, ein großartiges Erlebnis und ein Gewinn, weitgehend unabhängig von der ermittelten Rangfolge. Der Beitrag der HFT Stuttgart home+ wurde, wie die Projekte der anderen deutschen Teilnehmer, vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert. Das Projekt belegte im Wettbewerb den dritten Platz.

Literatur

- [1] Fiedler, Sebastian; Dalibard, Antoine; Eicker, Ursula; Cremers, Jan: Solar Decathlon Europe 2010, SET2009 – 8th International Conference on Sustainable Energy Technologies, Aachen, 2009.
- [2] Cremers, Jan; Fiedler, Sebastian: Plusenergie-Wohnhaus für Madrid – Die Weiterentwicklung historischer Klimakonzepte für die Zukunft mit zeitgemäßen Mitteln, 2. Internationaler Kongress Bauhaus.SOLAR Technologie – Design – Umwelt, Erfurt, 2009.
- [3] Palla, Nansi; Fiedler, Sebastian; Dalibard, Antoine; Binder, Markus; Büttgenbach, Simon; Cotrado, Mariela; Cremers Jan; Beck: Unser Beitrag zum Solar Decathlon Europe 2010 in Madrid – eine Herausforderung für Architektur und Bauphysik, Zweiteilige Veröffentlichungen der Hochschule für Technik Stuttgart, Band 106 – Bauphysikertreffen 2009.
- [4] Cremers, Jan; Fiedler, Sebastian: Solar Decathlon goes European – Stuttgart's project home+ is about to race in the famous global competition held in Madrid in June this year, Intelligent Glass Solutions (IGS), London, 1-2010, p. 45–50.

Autoren

Prof. Dr.-Ing. Jan Cremers ist Architekt, unterrichtet Gebäudetechnologie und integrierte Architektur an der Hochschule für Technik Stuttgart (HFT) und leitet das SDE-Projekt an der Hochschule.

Prof. Dr. Ursula Eicker ist Direktorin des Instituts für Angewandte Forschung an der HFT und leitet das Zentrum für angewandte Forschung nachhaltige Energietechnik (zafh.net).

SDE-Projektmanager **Dipl.-Ing. Sebastian Fiedler** ist Architekt und Geschäftsführer des zafh.net an der Hochschule. **Dipl.-Ing. Siegfried Baumgartner** ist Geschäftsführer der Baumgartner GmbH in Kippenheim und war an der Konzeption und Umsetzung der Gebäude-integrierten PV-Lösung und der Gebäudesteuerung und -automatisierung von home+ maßgeblich beteiligt.

Weitere Informationen:

Hochschule für Technik Stuttgart (HFT),

Prof. Dr.-Ing. Jan Cremers,

Gebäudetechnologie und Integrierte Architektur,

Fakultät Architektur und Gestaltung,

Schellingstraße 24, 70174 Stuttgart,

Tel. (07 11) 89 26 26 20,

jan.cremers@hft-stuttgart.de, www.hft-stuttgart.de

www.sdeurope.de (Website home+ der HFT Stuttgart)

www.sdeurope.org (Website des Solar Decathlon Europe)

www.solardecathlon.org (Website des Solar Decathlon in den USA)

STAHLBAU LAMPARTER seit 1947

Stahl und Glas
Baustoffe sind unsere
unser Individualität
Vorsprung

www.Stahl-und-Glas.de
Kassel + 49 (0)561 95120 0

SonnEn+
Solarthermie