

# iRoof® / iWall® - Strom, Wärme, Kühlung und hohe Wohnqualität mit dem intelligenten und multifunktionalen Fertigteilsystem aus Beton

Siegfried Riffel, HeidelbergCement AG, Entwicklung und Anwendung

## Zusammenfassung

Unter den heutigen ökologischen und ökonomischen Aspekten werden künftig die regenerativen Energien wie Photovoltaik und Solarthermie einen hohen Stellenwert einnehmen. Die Solartechnik wird in Zukunft sicher auch die Architektur entscheidend verändern; vom Städtebau bis hin zum Detail. Veränderungen erfordern somit andere, neue und innovative Lösungen wie beispielsweise das massive Dach- und Wandsystem „iRoof / iWall“. Solarenergie wird erst mit solchen neuartigen, intelligenten Bauteilen aus Beton hocheffizient nutzbar gemacht. In einem, im Jahr 2002 initiierten Forschungsprojekt der Zementindustrie und Energiewirtschaft, wurde ein ganzheitlich orientiertes Produkt entwickelt, das als so genannte „In-Dach/Wand-Lösung“ bei einer maximalen Wertschöpfung einen hohen Vorfertigungsgrad ermöglicht. Bei diesem intelligenten System wurden die vielen Vorteile des Baustoffes Beton im Bereich Dach und Wand wie z.B. Schallschutz, sommerlicher und winterlicher Wärmeschutz, Wärmespeicherfähigkeit, Brandschutz, Feuchtigkeitsschutz, Winddichtheit, Sturm- und Erdbebensicherheit etc. mit den Vorteilen der Photovoltaik und Solarthermie gebündelt und synergetisch genutzt. Mit diesem neuen multifunktionalen Massiv-Bausystem kann somit hocheffizient und umweltfreundlich Strom und Wärme für die Bewirtschaftung und Klimatisierung von modernen Gebäuden gewonnen werden. Gleichzeitig wird mit dieser CO<sub>2</sub> - emissionsfreien Technologie ein nicht unerheblicher Beitrag zu einem nachhaltigen Klimaschutz geleistet.

Nach Abschluss des Forschungsprojektes steht künftig den Architekten, Planern und Bauherren, das System „iRoof / iWall“ als innovatives und nachhaltiges Produkt aus qualitativ hochwertigen Betonfertigteilen für eine ökologische und nahezu energieautarke Bauweise zur Verfügung. Neben dem Neubau ist ein weiterer großer Anwendungsbereich in der energetischen und baulichen Ertüchtigung von Wohn- und Industriegebäuden im Gebäudebestand zu sehen.

Im Herbst 2005 wurde bei einem Pilotprojekt in Oberhausen das neu entwickelte iRoof- Dachsystem erstmalig in der Praxis angewendet. Bei diesem Modellvorhaben werden an sechs Reihenhäusern die vom Institut für Bauphysik der Fraunhofer-Gesellschaft berechneten und prognostizierten energetischen Werte aus verschiedenen Klimasimulationstests validiert.

Für einen direkten Vergleich wurde an drei Häusern das Pultdach mit Photovoltaik und Massivabsorber ausgebildet. Diese Gebäude werden mit einer Wärmepumpenheizung und einer kontrollierten Lüftung betrieben. Die drei weiteren, baugleichen Häuser erhielten eine iRoof-Dachkonstruktion ohne PV und Massivabsorber und werden mit einer Gas-Brennwerttherme beheizt.

In einem umfangreichen Messprogramm wird der Strom- und Energieertrag des „iRoof“ sowie der Energieverbrauch aller sechs Häuser ermittelt. Somit kann an den vergleichbaren Gebäuden eine genaue Energiebilanz erstellt werden, die auch über die Effizienz und Wirtschaftlichkeit des iRoof-Konzeptes eine Aussage zulässt. Die Anlage ist im Dezember 2005 in Betrieb gegangen, so dass die ersten Vergleichszahlen bereits nach der ersten Heizperiode im Frühjahr 2006 zur Verfügung stehen werden.

## 1 Allgemeines

Nach jüngsten Aussagen der Wissenschaft und Politik wird „Effizienz“ die neue Energiepolitik bestimmen. Nach dem Wunschdenken der breiten Öffentlichkeit sollen die regenerativen Energien der Grundpfeiler der zukünftigen deutschen Energieversorgung werden. Künftig wird auch verstärkt der Umweltschutz die Richtung im Umgang mit Energie zeigen, d.h. die Energiepolitik muss den Umweltschutz beachten. Hierzu können sicher die regenerativen Energien zur Reduzierung der

anthropogenen Treibhausgase einen wichtigen Beitrag leisten. Ein weiterer wichtiger Faktor als Vermeidungsmaßnahme ist die Verringerung des Wärmebedarfs in Gebäuden, was durch eine massive Bauweise mit einer entsprechend dichten und wärmedämmten Gebäudehülle realisiert werden kann.

Energieeffizienz könnte somit der Kristallisationspunkt einer neuen Energiepolitik werden. Sie führt zur Reduzierung der CO<sub>2</sub> -Emissionen und verringert gleichzeitig die Importabhängigkeit von fossilen Brennstoffen wie Öl und Gas. Wenn sich künftig, wie

nach den jüngsten Prognosen, der Ölpreis dauerhaft auf einem Niveau von ca. 60.- US \$/b einpendelt, ist das wirtschaftliche Effizienzpotenzial noch deutlich höher.

Für eine wirkungsvolle und nachhaltige Energieeffizienzsteigerung gehören verstärkte Forschungs- und Entwicklungsanstrengungen mit auf die Agenda einer zukunftsweisenden Energiepolitik. Ein Schlüssel zur Lösung der Energie- und Umweltprobleme sind Innovationen, die aber ohne weitere Forschung und Entwicklung nicht denkbar sind.

## 2 Ziel

Das Ziel ist, neben der regenerativen Stromerzeugung, die Solarenergie effizient über bauteilintegrierte Solarkollektoren mit einem Beton-Massivabsorber energetisch für die Gebäudeklimatisierung zu nutzen.

Die bei der Stromerzeugung am PV-Modul entstehende Wärme, sowie die solarthermische Energie aus der Sonneneinstrahlung werden von einem Beton-Massivabsorber gesammelt und in den Kreislauf der Gebäudeanlagentechnik zur Energiegewinnung und -versorgung (Heizung, Kühlung) gebracht. Über den Massivabsorberkreislauf und einem Flächen-Wärmetauscher und/oder einer Wärmepumpe wird ein Pufferspeicher für die Warmwasserbereitung und den Betrieb einer Niedertemperaturheizung gespeist.

Beim Betrieb einer monovalenten Wärmepumpe wird die Solarwärme aus dem Absorber in dem Wärmepumpenprozess auf Heizniveau „hoch gepumpt“. Bei gut ausgelegten Systemen ergibt sich ein Verhältnis von solarer Energie zu zusätzlich eingesetzter elektrischer Energie für den Verdichtungsprozess von ca. 75 % Solar und 25 % Fremdenergie. Die wirtschaftlichste Lösung wird von Systemen geboten, bei denen im Winter solarthermisch beheizt und im Sommer mit demselben System gekühlt wird. Diese Funktionserweiterung mit einer umschaltbaren Wärmepumpe bedarf nur geringer zusätzlicher Investitionen.

Aufgrund des hohen Wärmespeichervermögens des Betons kann die bei der Stromerzeugung gewonnene Abwärme auch zu einer Betonkernaktivierung -im Winter Heizung, im Sommer Kühlung- direkt in einem massiven Decken- und/oder Wandsystem, in einem Betonfundament oder auch in einem Erdspeicher oder Erdkollektor „geparkt“ werden.

Ein sehr wesentlicher ökologischer und ökonomischer Aspekt ist bei diesem System die Kühlung der PV-Module durch den permanenten Entzug der Abwärme mit dem Beton-Massivabsorber. Durch eine somit erzielte relativ konstante und niedrige Betriebstemperatur der Solaranlage (im Sommer max. 25°C bis 30°C), kann der Wirkungsgrad der PV-Module -d.h. die Energieausbeute bei der Stromerzeugung- deutlich gesteigert werden.

Nach dem EEG (Erneuerbare Energien-Gesetz) wird heute der erzeugte Strom in das Stromnetz der Energieversorger eingespeist. Hierfür werden mit den EVS langfristige Verträge (derzeit 20 Jahre Laufzeit) mit einer entsprechenden Einspeisevergütung abgeschlossen. Mittel- bzw. langfristig ist für Betreiber von Solaranlagen auch eine energieautarke Eigenversorgung denkbar. Bei Stromausfall ist heute bereits eine solare Notstromversorgung möglich, so dass dem Anlagenbetreiber für den Notfall eine unabhängige Versorgungssicherheit gewährleistet wird.

Bei der Entwicklung von iRoof / iWall wurde das Ziel verfolgt, neben einer innovativen Technologie auch ein architektonisch ansprechendes Dach- und Wandsystem zu schaffen. Anders als die meisten Produkte am Markt, wirkt dieses neu entwickelte Solarsystem nicht aufgesetzt oder deplatziert, sondern es erscheint als in sich geschlossene, gestalterische Einheit, unabhängig von dem Grad der Intelligenz, die in dem Bauteil stecken kann.

Gebäudehüllen werden künftig mehr leisten, als nur vor dem Wetter zu schützen. Regulierende bzw. filternde Aufgaben kommen hinzu. Neben der Informationsvermittlung wird künftig das Erzeugen und Sammeln von Energie eine der wichtigsten Aufgaben sein. Mit neuartigen Oberflächen werden Dachkonstruktionen und Fassaden auch immer stärker zum Imagerträger einer repräsentativen, gebauten Visitenkarte. Durch iRoof und iWall wird künftig in der Architektur eine zeitgemäße Gestaltung nach solaren Gesichtspunkten möglich, wobei Eleganz, Funktionalität und Modernität nach ökologischen Aspekten Ausdruck verliehen wird. Abbildung 1 zeigt die neue innovative iRoof-Dachfläche inmitten einer üblichen Dachlandschaft.



Abb. 1: iRoof-Dachfläche, BV Oberhausen

## 3 Konzept

In der Projektskizze wurde das Forschungsprojekt in folgende vier Bereiche gegliedert:

- Entwicklungsphase
- Erprobungsphase
- Umsetzungsphase

- Markteinführungsphase

In der Entwicklungs- und Erprobungsphase wurden verschiedene Wege und Lösungsansätze verfolgt. Primär sollten bei der Entwicklung nur bauaufsichtlich zugelassene Produkte und Bauteile sowie innovative Baustoffe und Bautechniken zur Anwendung kommen.

Bei der Untersuchung verschiedener Systeme hat sich die Kombination von Bauteilen aus selbstverdichtendem Beton (SVB) mit bereits am Markt etablierten PV-Dachfolien als die mit dem höchsten Vorfertigungsgrad und der besten Praktikabilität herausgestellt.

Die Entwicklung umfasste neben der Recherche und den Berechnungen auch praktische Versuche zu den folgenden Themen: Herstellung, Witterungsbeständigkeit (Hitze, Frost, Feuchtigkeit), Sturmsicherheit, Transport, Montage- sowie Reparaturfreundlichkeit.

Aufgrund der großen konstruktiven Flexibilität von iRoof / iWall kann sich der Planer und Bauherr für das einfache Beton-Massivdach oder für das Energiedach mit Photovoltaik und/oder Solarthermie entscheiden. Bei der Erstellung des Energiekonzeptes für das Gebäude kann er aus einem Baukastensystem verschiedene Varianten zur Energienutzung wählen, wie z.B. den Anschluss einer monovalenten Strahlungsheizung als Boden-, Wand- oder Deckenheizung, die Unterstützung konventioneller Heizsysteme oder einen sommerlichen Wärmeschutz durch eine so genannte Phasenverschiebung und/oder Kühlung durch eine Betonkernaktivierung.

Bei dem iRoof-Konzept kommen alle erdenklichen Unterkonstruktionen in Frage. Die Produktpalette ermöglicht alle gängigen Dachformen und Dachneigungen und bietet bauaufsichtlich zugelassene Lösungen für sämtliche Anschlussdetails in breiter Farbpalette.

Für die Anwendung von Photovoltaikmodulen mit der CIS-Technologie oder anderen Systemen auf Glas oder glasähnlichen Trägerschichten wurde im Rahmen des Forschungsprojektes ein Montage- und Abdichtungssystem entwickelt, mit dem sich durch die Ergänzung mit klassischen Flaschnerdetails ebenfalls das gesamte Spektrum abdecken lässt.

Beiden Systemen gemeinsam sind die durchgängige, variable Dämmebene und das scheibenförmige Element der Oberschale mit filigraner, eleganter Ansicht.

iRoof / iWall zeichnet sich durch folgende technische, wirtschaftliche und umweltrelevante Vorteile aus:

- Einfaches, rationelles Bauprinzip mit hohem „mehrWert“, d.h. wenig Materialien (Betonfertigteile, Absorberrohre, Dachfolie mit PV-Modul, druckfeste Wärmedämmung) mit nur zwei Gewerken auf dem Dach (bei der klassischen Sparrendachbauweise mit aufgeständerter Solartechnik sind deutlich mehr

Materialien und Gewerke, v.s. Schnittstellen, erforderlich)

- Herstellung des Daches (Wand) in drei verschiedenen Standards nach dem gleichen Bauprinzip:
  - Massives Dach (Wand)
  - Massives Dach (Wand) mit Absorber
  - Massives Dach (Wand) mit Absorber und PV
- Hohe Flexibilität und Variabilität im Dachaufbau (z.B. Ausbildung der tragenden Unterschale, Dicke und Qualität der Wärmedämmung, Dicke des Massivabsorbers, Auswahl der PV-Module, Auswahl der Folienfarbe etc.)
- Hohe Produktqualität durch den Einsatz von hochwertigen Bauprodukten und präziser werkmäßiger Fertigung
- Schnelle, kostengünstige Herstellung und Montage des Systems
- Massives Dach (Wand) als Komplettangebot, d.h. ein High-Tech-Produkt aus einer Hand
- Lange Produkt- und Leistungsgarantie

#### 4 Konstruktion / Statik

Die Konstruktion von „iRoof / iWall“ basiert auf einem thermisch getrennten dreischaligen, entkoppelten System, bestehend aus einer allein tragenden Betonunterschale (z.B. Massivdecke, Leichtbetondecke, Hohlplattendecke), einer druckfesten Wärmedämmschicht und einer „schwimmenden“ Betonoberschale als Massivabsorber mit integrierten Photovoltaikmodulen. In Abbildung 2 ist in einer Systemskizze der Querschnitt des Dachaufbaus dargestellt.

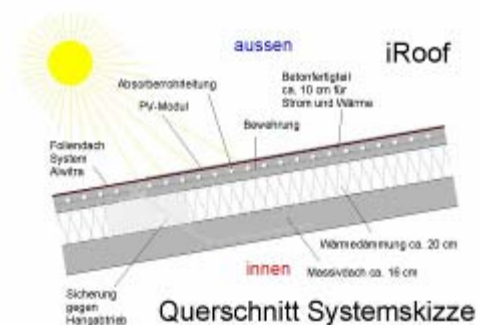


Abb. 2: Systemskizze „iRoof“ Dachaufbau

##### 4.1 Randbedingungen der Tragwerksplanung

Bei der Tragwerksplanung wurde als Standarddachform das Satteldach mit einer Dachneigung von  $\leq 35^\circ$  bzw. das Pultdach gewählt. Bei einer Spannrichtung Ortgang – Ortgang ist bei der aktuellen Konstruktion eine maximale Plattenlänge von 7,00 m möglich. Die maximale statische Spannweite liegt bei 6,50 m. Bei der Spannrichtung First – Traufe sind maximale Plattenlängen von 9,50 m realisierbar. In diesem Fall ist eine maximale statische Spannweite von 9,00 m gegeben. Für andere Haus- und Dachformen müssen die Standardlösungen entsprechend angepasst werden. Die statisch erforderliche Plattendicke einschließlich der PV-Module und Absorberrohre muss mindestens 80 mm betragen.

Die iRoof-Konstruktion ist bezüglich der Temperaturbelastung auf ein  $\Delta T \pm 45^\circ\text{C}$  bemessen. Im





Abb. 6: Oberschale an Montageankern

#### 4.2.4 Statische Anforderungen an die Oberschale auf dem Dach

Im eingebauten Zustand erfährt die Platte eine Belastung aus Eigengewicht, Schnee und Wind. Es ergibt sich eine relativ gleichmäßige Flächenlast senkrecht zur Dachfläche auf die druckfeste Wärmedämmung. Die Kraftkomponente in Richtung der Dachneigung (Hangabtriebskraft) wird punktuell am Ortsgang über ein Zug-Druck-Stab-System in die Unterkonstruktion geleitet. Der Vorteil dieser Art der Kraftübertragung liegt darin, dass das System auch für größere Dachneigungen bis ca. 38° einsetzbar ist. Außerdem ist die entstehende Wärmebrücke z.B. im Vergleich zu einer einbetonierten Stahlkonsole vernachlässigbar klein. Abbildung 7 zeigt die Hangabtriebsicherung mit der in der Unterschale verankerten ES-Gewindestange und dem ES-Halteschuh auf dem Iso-Kimstein.



Abb. 7: Hangabtriebsicherung

## 5 Herstellung der Betonfertigteile

Die Oberschale des massiven Dachsystems „iRoof“ wird als „großer Dachziegel“ im Fertigteilwerk hergestellt. Die Fertigteilabmessungen werden auf das System der PV-Anlage sowie auf die Spannweite und Spannrichtung des Daches abgestimmt. Um den Fugenteil zu minimieren wird immer die größte mögliche Fertigteilabmessung angestrebt.

Direkt in die Stahlschalung wird die Dachbahn bzw. die „alwitra EVALON V-Solar Bahn“ mit den entsprechenden Abmessungen des Betonfertigteils eingelegt. Das Grundmaß der PV-Dachbahn beträgt 6,00 m bzw. 3,36 m x 1,55 m. Die Bahnen können bereits werkseitig verschweißt mit dem entsprechenden Fertigteilmaß geliefert werden.

Die auf der Bewehrung verlegten und fixierten Absorberrohre werden auf der Folie mit Hilfe von Abstandhaltern in die erforderliche exakte Lage und Position gebracht. Die weiteren Einbauteile wie Transport- und Montageanker sowie die Befestigungs- und Justiereinrichtungen, werden an der konstruktiven Bewehrung fixiert. Abbildung 8 zeigt das Einlegen der Bewehrung mit dem Absorber in die Stahlschalung. Die Dachfolie ist bereits in der Schalung verlegt. In Abbildung 9 ist die Betonage einer iRoof-Oberschale mit SVB zu sehen.



Abb. 8: Einlegen der vorkonfektionierten Bewehrung (mit Absorber und Abstandhalter) in die Stahlschalung auf die bereits eingelegte Dachfolie



Abb. 9: Betonage einer iRoof-Oberschale mit SVB

Um eine hohe Qualität, Präzision und Maßhaltigkeit zu gewährleisten, wird das Bauteil mit einem schwindarmen SVB (Selbstverdichtender Beton) bzw. LVB (Leicht verarbeitbarer Beton) hergestellt,

d.h. ohne Rüttel- oder Schockenergie. Durch den Schwindreduzierer konnte das Schüsseln und Schwinden des SVB deutlich reduziert werden. Bei den Messungen wurde nach 3 Monaten das maximale Schwindmaß festgestellt. Am Nullbeton betrug das Schwinden 0,558 mm/m. Beim schwindreduzierten SVB wurden 0,439 mm/m (d.h. -21,3 %) gemessen. Tabelle 1 zeigt die SVB-Rezeptur. In Abbildung 10 ist die Verformung durch „Schüsseln“ grafisch dargestellt. Abbildung 11 und 12 zeigt die Messeinrichtungen für die Verformungsmessungen.

Sofern andere PV-Systeme wie z.B. THYSSEN-Solartec® oder WÜRTHSolar-CIS-Dünnschichtmodule o.a. zur Anwendung kommen, werden diese erst nachträglich auf dem bereits montierten Dach befestigt. Auch für die nachträgliche Befestigung der PV-Module wurden im Rahmen des Forschungsprojektes entsprechende Lösungen und Befestigungsmaterialien entwickelt.

Tab. 1: SVB-Rezeptur für iRoof-Oberschale

Sand	0/2 mm	715 kg/m <sup>3</sup>
Kiessand	2/8 mm	397 kg/m <sup>3</sup>
Kies	8/16 mm	476 kg/m <sup>3</sup>
Zement	CEM I 52,5 R	350 kg/m <sup>3</sup>
Flugasche	SFA	200 kg/m <sup>3</sup>
Wasser		175 kg/m <sup>3</sup>
Fließmittel (PCE)	1,4 % v. Zgw.	4,9 kg/m <sup>3</sup>
Stabilisierer	0,5 % v. Zgw.	1,8 kg/m <sup>3</sup>
Schwindreduzierer	2,0 % v. Zgw.	7,0 kg/m <sup>3</sup>
Druckfestigkeit	1 d / $f_{c,cube}$	9,3 N/mm <sup>2</sup>
Druckfestigkeit	7 d / $f_{c,cube}$	42,9 N/mm <sup>2</sup>
Druckfestigkeit	28 d / $f_{c,cube}$	61,7 N/mm <sup>2</sup>
max. Schwindmaß	3 Monate	0,439 mm/m
max. Schüsselmaß	3 Monate	1,91 mm/m

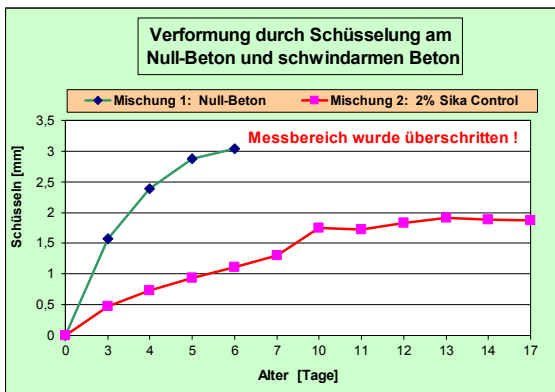


Abb. 10: Schüsselnungsverhalten von SVB mit und ohne Schwindreduzierer



Abb. 11: Verformungsmessung am Schüsselbalken (100 x 15 x 5 cm)



Abb. 12: Verformungsmessung am Schwindbalken (50 x 10 x 10 cm)

## 6 Dachabdichtung / Photovoltaik

Die einlagige multifunktionale Dachabdichtung des iRoof besteht aus einer 2,8 mm dicken hochwertigen Kunststoffdachbahn aus Ethylen-Vinyl-Acetat-Terpolymer (EVA) mit einer unterseitigen Polyester-Vlieskaschierung. Zur Stromerzeugung werden auf die Dachbahn flexible und leichte Photovoltaik-Module (4 – 4,3 kg/m<sup>2</sup>) von UNI-SOLAR auflaminiert. Die UNI-SOLAR-PV-Module bestehen aus flexiblen Solarzellen (240 x 340 mm) in Serienschaltung mit Bypass-Dioden zwischen allen Zellen und sind allseitig wetterfest, transparent und schmutzabweisend mit Teflon (TEFZEL®) polymerverpackelt. Die Solarzellen sind dreilagig, mit stromerzeugenden Schichtsystemen aus amorphem Silizium, bedampfte Edelstahlfolien (Minuspol) mit transparenter Elektrode und Abbeifgitter (Pluspol). Von den drei übereinander liegenden Silizium-Schichtsystemen werden jeweils unterschiedliche Wellenlängen des Sonnenlichts genutzt. Mit dieser neuen „Triple-Junction-Dünnschicht-Technology“ wird das Lichtspektrum optimal genutzt, so dass es folglich auch für nicht optimal geneigte und ausgerichtete Dachflächen geeignet ist. Durch Bypass-Dioden zwischen allen Zellen eines Moduls wird der Ausfall ganzer Module

wie z.B. bei Teilabschattung verhindert. Mit dieser Technologie werden bis zu 20 % höhere Erträge gegenüber kristallinen Solarzellen gleicher Nennleistung erreicht. In Deutschland liegen die solaren Erträge bei ca. 750 bis 950 kWh/kWp und Jahr. Abbildung 13 und 14 zeigt die optimale Nutzung des Lichtspektrums mit der „Triple-Junction-Dünnschicht-Technologie“

Beim iRoof-Konzept erfüllt die EVALON-Solar-Dachbahn drei wesentliche Parameter:

- sichere und langlebige Dachabdichtung
- effizienter Energiesammler durch dunkle Oberfläche der Dachfolie (Solarthermie)
- ressourcenschonende und rückstandsfree Stromerzeugung durch direkte Umwandlung von solarer Strahlungsenergie (Photovoltaik)

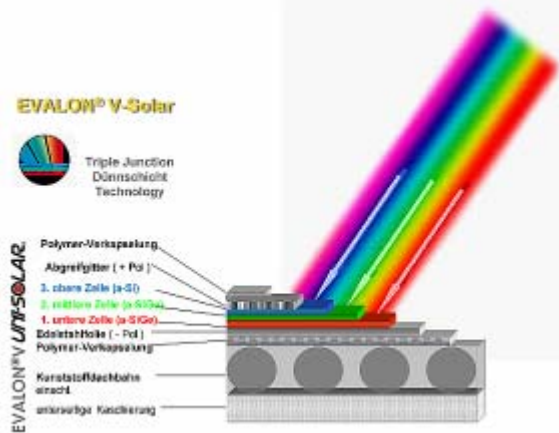


Abb. 13: Triple Junction Dünnschicht Technology

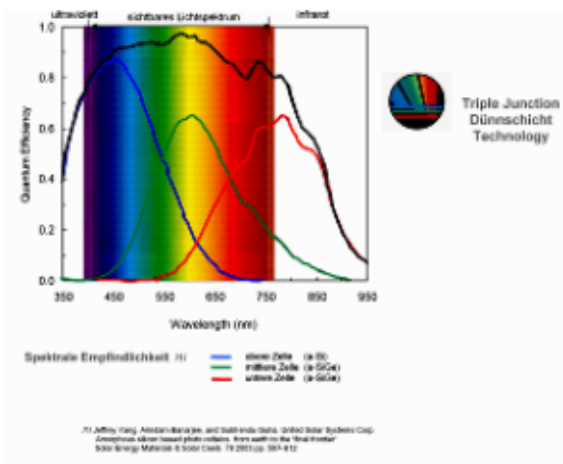


Abb. 14: Lichtspektrum in den Solarzellen

## 7 Energiekonzept für Pilotprojekt BV Oberhausen

### 7.1 Photovoltaik

#### 7.1.1 Technische Auslegung

Die Anlage wurde unter Berücksichtigung folgender Parameter konzipiert:

- Berücksichtigung von Windlasten
- Vermeidung von Abschattungen
- optimale Dachflächennutzung
- minimale Anzahl von Netzwechselrichter
- höchstmöglicher Stromertrag

Technische Anlagendaten:

iRoof-Pultdach: Dachfläche 230 m<sup>2</sup> (ca. 30 x 7,65 m)  
Ausrichtung nach Süden mit 6° Dachneigung  
Nutzbarer Bereich für EVALON V-Solar: 178,6 m<sup>2</sup> (77,8 %)

EVALON V-Solar 272: 24 Stck

Netzwechselrichter 4.600 W: 1 Stck

Die 1,24 m breiten, schiefergrauen EVALON V-Solar-Bahnen sind im direkten Verbund in die Stahlbeton-Dachplatten integriert. Die Dachbahn mit den PV-Modulen bildet gleichzeitig die Dachabdichtung. Die Anschlusskabel werden in Kabelschutzhäuten durch vorgesehene Aussparungen in der Dämmung und Unterschale in einen zentralen Versorgungsschacht im Gebäude geführt. Die PV-Module von je vier Bahnen sind in einer Anschlussdose in Reihe geschaltet.

Der Wechselrichter mit integrierter Einrichtung zur Netzüberwachung (ENS) ist im Kellerraum nahe der Einspeisestelle installiert. Die PV-Anlage ist einphasig an das vorhandene Niederspannungsnetz angeschlossen. Zur Überwachung der Anlage wurde in den Wechselrichtern ein LocalNet (ComCard, Datenlogger-Card) mit Modemanschluss installiert, so dass die Firma Alwitra permanent die aktuellen Zustandswerte der Anlage abrufen kann. Die Visualisierung von Leistung, Erträgen usw. erfolgt über die Wechselrichter-Displays und über ein großes externes Display an der westlichen Carportstirnseite.

#### 7.1.2 Leistung und Erträge

Die dachintegrierte PV-Anlage hat eine installierte Nennleistung von 6,5 kWp (Systemspannung 264 V DC) und eine AC-Anschlussleistung von 4,6 kW mit einem durchschnittlichen Jahresertrag von ca. 5.828 kWh. Bei dieser Berechnung ist die Leistungssteigerung durch den Kühleffekt des Absorbers noch nicht berücksichtigt. Mit dieser Anlage werden pro Jahr ca. 5.151 kg CO<sub>2</sub>-Emissionen vermieden.

Damit leistet der Investor zusätzlich einen aktiven Beitrag zu einer nachhaltigen, umweltfreundlichen Energieversorgung und effektiven Minderung des Treibhauseffektes durch CO<sub>2</sub>-Emissionsvermeidung.

#### 7.1.3 Kosten

Die Kosten für die Dachabdichtungsarbeiten, einschließlich der An- und Abschlüsse betragen ca. 8.500 € (37,- €/m<sup>2</sup> Dachfläche fertig verlegt). Für die Lieferung, Montage und Installation der netzgekoppelten PV-Anlage einschließlich der Kabeldurchführungen, Anschlusskasten, DC-Trenneinrichtungen und Netzwechselrichter betragen die zusätzlichen Kosten ca. 31.500 € (4.800 €/kWp). Darin sind ca. 1.300 € für Elektroinstallationsarbeiten enthalten.

#### 7.1.4 Förderung, Finanzierung, Wirtschaftlichkeit

Im Erneuerbare Energien-Gesetz (EEG) ist für Strom aus netzgekoppelten Photovoltaik-Anlagen u.a. eine Abnahmepflicht durch die Energie-Versorgungsunternehmen (EVU) - unabhängig von der Verwendung - und eine Einspeisevergütung für eine Dauer von jeweils 20 Jahren (plus Jahr der Inbetriebnahme) festgeschrieben.

Nach § 11 EEG vom 21. Juli 2004 beträgt bei Inbetriebnahme der Anlage in 2004 die Vergütung für Strom aus dachintegrierten PV-Anlagen 57,40 ct/kWh bis einschließlich einer Leistung von 30 kWp. Bei Inbetriebnahme der Anlage in 2005 ist die Einspeisevergütung 5 % geringer. Somit wird bei dem Pilotprojekt jede von der PV-Anlage bis einschließlich 2025 erzeugte Kilowattstunde (kWh) garantiert mit 54,53 ct vergütet. Folglich stehen den vorgenannten Investitionskosten in Höhe von ca. 40.000 € ca. 65.400 € Einnahmen aus der Einspeisevergütung gegenüber.

Die Kosten für die Errichtung einer PV-Anlage auf Wohngebäuden können nach dem CO<sub>2</sub>-Gebäude-sanierungsprogramm der KfW durch ein langfristiges, zinsgünstiges Darlehen finanziert werden. Da beim iRoof die PV-Module unlösbarer Bestandteil der Dachabdichtung sind, entsprechen die Gesamtkosten den förderfähigen Investitionskosten. Somit können auch die Kosten für die Dachabdichtung zu 100 % durch v.g. Darlehen finanziert werden.

Mit der PV-Anlage kann ein Gewinn erwirtschaftet werden, weshalb die Kosten für den Bau und Betrieb der PV-Anlage darüber hinaus steuerlich geltend gemacht werden können. Dadurch erhöht sich die Wirtschaftlichkeit der Investition weiter.

Die Realisierung des iRoof-Pilotprojektes bzw. die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung erfolgte komplett ohne Fördermittel.

Unter den vorgenannten Rahmenbedingungen ist die Investition eine betriebswirtschaftlich positiv zu bewertende Maßnahme. Die Investitionskosten für die Dachabdichtung und PV-Anlage und die Finanzierungskosten refinanzieren sich allein aus der Einspeisevergütung für den Solarstrom aus der PV-Anlage. Somit erhält der Bauherr **kostenlos** eine langlebige Dachabdichtung mit dachintegrierter PV-Anlage.

## 7.2 Solarthermie

### 7.2.1 Wärmeertrag mit dem Beton-Massivabsorber

Der Wärmeertrag mit dem Massivabsorber hängt von den folgenden relevanten Parametern ab:

- Größe der Absorberfläche
- Farbe des Absorbers
- Dachorientierung, Dachform, Dachneigung
- Intensität der Solareinstrahlung
- Dicke des Absorbers
- Rohrabstand, -querschnitt, Durchflussmenge
- Zusätzlicher Wärmeertrag durch PV
- Betriebsweise der Wärmepumpe

Somit kann bezüglich des Ertrages von Wärme mit dem Beton-Massivabsorber keine pauschale Aussage gemacht werden. Der solare Wärmeertrag muss immer individuell an dem jeweiligen Projekt errechnet bzw. ermittelt werden.

Aus der Praxis und Literatur liegen für den Beton-Massivabsorber Richtwerte vor, wo beispielsweise bei einer Sonneneinstrahlung von 2 kWh/m<sup>2</sup>d eine spezifische Flächenleistung von ca. 24 W/m<sup>2</sup>K erreicht wird. Bei 3 kWh/m<sup>2</sup>d sind es ca. 32 W/m<sup>2</sup>K und bei 4 kWh/m<sup>2</sup>d ca. 44 W/m<sup>2</sup>K.

Da es sich bei dem System iRoof<sup>®</sup> um eine in dieser Form erstmalig angewendeten Kombination von Photovoltaik und Solarthermie handelt, können erst am realen Objekt die Energieerträge aus den verschiedenen Energiequellen ermittelt werden. Grundsätzlich kann aber davon ausgegangen werden, dass durch die optimale Orientierung des Absorbers zur Sonne (Südausrichtung) und durch die große dunkle Absorberfläche mehr Strahlung absorbiert werden kann. Somit kann bei dem Pilotprojekt, im Vergleich zu anderen Wärmequellen (z.B. Erdreich, Luft), unter direkter Sonneneinstrahlung mit höheren Quellentemperaturen gerechnet werden. Beim System iRoof / iWall kommt noch der Wärmeertrag aus der Abwärme bei der Stromerzeugung d.h. von der Kühlung der PV-Module hinzu.

Alle diese relevanten Einflüsse der verschiedenen Parameter werden bei dem Forschungsprojekt „BV Oberhausen“ unter realen Praxisbedingungen ermittelt bzw. messtechnisch erfasst.

Nach den Prognosen und Berechnungen des IBP, Fraunhofer Institut für Bauphysik Stuttgart, ist bei dem Pilotprojekt in Oberhausen der Wärmeertrag mit dem Beton-Massivabsorber für einen ganzjährigen, wirtschaftlichen Betrieb einer monovalenten Wärmepumpenheizung einschließlich der Warmwasserbereitung gewährleistet.

Da es sich bei dem Projekt um ein Forschungsvorhaben handelt kann davon ausgegangen werden, dass in Bezug auf den Wirkungsgrad bzw. die Leistungsfähigkeit des Beton-Massivabsorbers noch entsprechendes Optimierungspotenzial vorhanden sein wird.

In einem nächsten Schritt soll das iRoof-Konzept in Kombination mit einer umschaltbaren Wärmepumpe -neben der Heizung und Warmwasserbereitung- auch für die Gebäudeklimatisierung (Kühlung) im Sommer eingesetzt werden.

## 7.3 Heizung / Warmwasserbereitung

Bei dem innovativen Heizungskonzept werden verschiedene Energiequellen für die Beheizung der Gebäude genutzt. Als Energiespender stehen die iRoof-Dächer mit Photovoltaik und Massivabsorber sowie Abluftkollektoren und bei Bedarf eine Zusatzenergiequelle zur Verfügung. Von den einzelnen Energiequellen kann jeweils Wärmeenergie in einen Sole-Pufferspeicher eingespeist werden. Eine Sole-Wasser-Wärmepumpe entzieht dem Pufferspeicher

die eingebrachte Wärmeenergie und bringt somit das Heizmedium auf eine höhere Nutzttemperatur von ca. 55°C. Auf diesem Temperaturniveau werden die Gebäude mit Heizwärme (Niedertemperaturheizung) und Warmwasser versorgt. In Abbildung 15 ist schematisch die Anlagentechnik zur Energiegewinnung dargestellt.

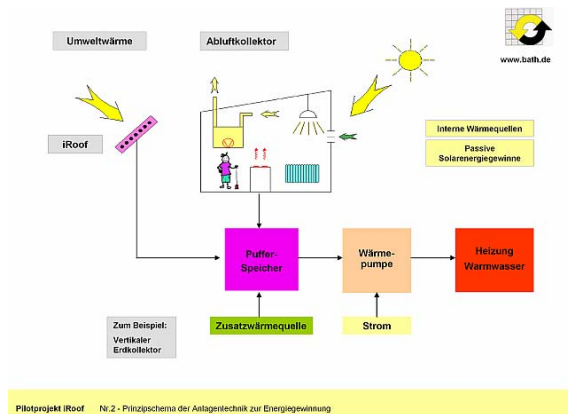


Abb. 15: Schema der Anlagentechnik

Bei dem Reihenhaus-Pilotprojekt wurden drei der sechs Häuser mit einem kombinierten iRoof-Dachabsorber mit integriertem Photovoltaiksystem ausgestattet, welches zur Nutzung der solarthermischen Umweltenergie und der Stromgewinnung dient. Die anderen drei baugleichen Häuser werden konventionell mit einer Gas-Brennwerttherme beheizt. Somit können bei dem Pilotprojekt die zwei unterschiedlichen Heizsysteme, bezüglich der Wirtschaftlichkeit und dem Energieverbrauch, direkt miteinander verglichen werden.

Die iRoof-Dachflächen sind als Beton-Massivabsorber mit integrierten Solewasserleitungen ausgestattet und entziehen über ein Pufferspeicher-Wärmepumpensystem den Betonflächen Wärmeenergie. In der ersten Erprobungsphase wird die Anlage mit einer Soletemperatur von maximal -5°C gefahren. In weiteren Tests wird dann schrittweise die Soletemperatur bis auf -15°C abgesenkt.

Das Rohrnetz des Absorbers - insgesamt ca. 1.200 m PE-Xc-Rohre,  $\varnothing$  20,2 x 2,6 mm - ist im Abstand von 125 bis 175 mm im Tichelmann-System verlegt und angeschlossen, wobei gewährleistet wird, dass die Abführung der Umweltenergie auf alle Dachflächen gleichmäßig verteilt wird. Die Sole-Umlaufwassermenge wird über eine elektronisch gesteuerte Solepumpe mengenvariabel eingestellt.

Bei einer Gesamtabsorberfläche von ca. 210 m<sup>2</sup> werden bei einer spezifischen Wärmeentzugsleistung von 50 W/m<sup>2</sup> ca. 10,2 kW Wärmeenergie für Heizzwecke umgesetzt. Genauere Ergebnisse bezüglich der realen Leistungswerte des iRoof werden die Messungen des Fraunhofer Institut für Bauphysik, Stuttgart bringen, die derzeit noch durchgeführt werden. Die aus den iRoof-Dachflächen entzogene Wärmeenergie wird in einen Sole-Puffer-

speicher eingespeist, der gleichzeitig die Funktion einer hydraulischen Weiche übernimmt, so dass die verschiedenen Solekreisläufe hydraulisch voneinander getrennt sind.

Als zweite Energiequelle für die Wärmepumpe wurde in jedem Haus ein Abluftkollektor installiert. Der Abluftkollektor ist eine so genannte Lüftungsbox, die aus einem Ventilator, Filter, Wärmetauscher, Solepumpe und einem Regelungssystem besteht. Bei diesem Lüftungssystem werden einerseits die in das Haus einwirkenden passiven Solarenergiegewinne und andererseits die Wärmeenergie der internen Energiequellen wie beispielsweise Beleuchtungs-, Personen-, Bad- und Küchenabwärme energetisch genutzt. Dabei wird über ein im Gebäude installiertes Lüftungssystem in mehreren Räumen die Luft abgesaugt und die in der Abluft vorhandene Wärmeenergie im Abluftkollektor mit dem Sole-Wärmetauscher entzogen. Die aus der Abluft gewonnene Energie wird in den Sole-Pufferspeicher der Wärmepumpe eingespeist.

Der Ersatz der entnommenen Raumluft ist durch das kontinuierliche Nachströmen von Frischluft, durch spezielle Nachströmventile in den Fenstern, gewährleistet, so dass durch den automatischen Luftaustausch ein angenehmes und gesundes Raumklima geschaffen werden kann.

Bei einem Abluftvolumenstrom von ca. 150 m<sup>3</sup>/h beträgt die Wärmeentzugsleistung des Lüftungssystems ca. 0,9 kW/h pro Haus. Die elektrische Leistungsaufnahme für Ventilator und Pumpe beträgt dabei ca. 0,11 kW/h.

Die installierte Sole-Wasser-Wärmepumpe mit einem Scroll-Verdichter der neuesten Generation hat eine Leistungszahl von 2,8 (COP-Wert bei 0/50°C und internen Pumpen) und bei 0/35°C von 4,3. Die Wärmepumpe für die drei Häuser bringt eine Heizleistung von ca. 15,8 kW. Die maximale Vorlauftemperatur für das Heizsystem beträgt 60°C. Neben der Heizwärmeversorgung der drei Wohnhäuser übernimmt die Wärmepumpe auch die Warmwasserbereitung. Das warme Brauchwasser wird in einem zentralen Warmwasserspeicher mit einem Fassungsvermögen von 430 Liter erzeugt, der speziell auf die Anlagentechnik der Wärmepumpe abgestimmt ist.

In den Gebäuden wurde ein Heizsystem als 2-Rohr-System installiert, das mit Systemtemperaturen von 55/40°C ausgelegt ist. In den Wohnräumen wurden konventionelle Niedertemperatur-Heizkörper eingebaut.

Für die gesamte Mess-, Steuerungs- und Regelungstechnik wurde im Technikraum ein zentraler Schaltschrank installiert. Durch den Einbau mehrerer Fühler in der iRoof-Oberschale und in den Gebäuden werden die verschiedenen Regelungsvorgänge automatisch gesteuert und durch den Einbau von Kälte- bzw. Wärmemengenzählern die Energie- und Verbrauchsströme der Anlagentechnik messtechnisch erfasst und dokumentiert.

In Abbildung 16 ist der installierte Sole-Pufferspeicher zu sehen. Abbildung 17 zeigt die Sole-Wasser-Wärmepumpe.



Abb. 16: Solar-Pufferspeicher



Abb. 17: Sole-Wasser-Wärmepumpe

In der Anfangsphase werden mehrere Messreihen gefahren und einzelne Varianten getestet mit dem Ziel, die optimalen Parameter für die installierte Anlagentechnik zu gewinnen. Erste Ergebnisse werden bereits zum Ende der Heizperiode 2006 vorliegen. Um jedoch bezüglich der Wirtschaftlichkeit und Energieeffizienz des iRoof-Konzeptes eine detaillierte Aussage treffen zu können, werden die Messungen noch über mehrere Jahre fortgeführt.

## 8 Kosten / Wirtschaftlichkeit

### 8.1 Herstellkosten

Das iRoof kann in den folgenden drei Standards ausgeführt werden:

- a) Massives Dach / Wand
- b) Massives Dach / Wand mit Massivabsorber
- c) Massives Dach / Wand mit Massivabsorber und PV-Modulen

Die Dachkonstruktion besteht grundsätzlich bei allen Varianten aus einer tragenden Unterschale, der druckfesten Wärmedämmung und einer Oberschale. Die in den drei Ebenen verwendeten Baustoffe und die Konstruktionsabmessungen der einzelnen Schichten sind variabel und können somit kostenmäßig stark beeinflusst werden.

Bei dem Pilotprojekt BV Oberhausen wurde die Variante a) und c) ausgeführt. Die Standardvariante a) hatte folgenden Aufbau:

Unterschale: BFT aus Normalbeton,  $d = 20$  cm

Wärmedämmung: druckfeste EPS 035,  $d = 20$  cm

Oberschale: BFT mit schwindarmem SVB und integrierter Foliendachhaut,  $d = 14$  cm

Für die Dachvariante a) lagen die Gesamtkosten bei ca.  $150 \text{ €/m}^2$ . Zur Realisierung der Variante b) muss für den Absorber mit einem Zuschlag von ca.  $20 \text{ €/m}^2$  gerechnet werden. Bei der Variante c) sind zusätzlich noch die Kosten der installierten Leistung der PV-Anlage anzusetzen. Je nach dem verwendeten PV-System kann derzeit von Investitionskosten in der Größenordnung von ca.  $4.800 \text{ €/kWp}$  bis  $5.200 \text{ €/kWp}$  ausgegangen werden.

Wie jedoch bereits in 7.1.4 aufgezeigt, muss derzeit vom Investor, aufgrund der vertraglich zugesicherten Einspeisevergütung, die PV-Anlage lediglich vorfinanziert werden. Nach einer Laufzeit von 10 bis 12 Jahren haben sich die Anlageninvestitionskosten amortisiert bzw. es wird ab diesem Zeitpunkt bis zum Vertragsende nach 20 Jahren ein Gewinn in der Größenordnung von ca.  $26.000 \text{ €}$  erwirtschaftet.

## 9 Ausblick

Durch den mess- und wahrnehmbaren Klimawandel bzw. durch die in jüngster Zeit immer häufiger aufgetretenen Naturkatastrophen wie Überschwemmungen, Stürme, Brände und Erdbeben hat sich das Umweltbewusstsein in der breiten Bevölkerung und Politik stark verändert. Eine neue richtungweisende Energie- und Umweltpolitik wird künftig das Bauen,

sowohl im Neubau als auch im Bestand, bestimmen. Neue, innovative Baustoffe und Bauweisen werden erforderlich sein, um die hochgesteckten politischen Ziele bezüglich einer effektiven Energieeinsparung und CO<sub>2</sub>-Minderung zu erreichen. Hierfür sind künftig hocheffiziente, saubere und nachhaltige Energiekonzepte erforderlich. Nach den mittel- und langfristigen Zielen der Bundesregierung soll der Anteil der umweltverträglichen und ressourcenschonenden erneuerbaren Energien am gesamten Energieverbrauch in Deutschland von 3,6 % (2004) auf 4,2 % im Jahr 2010 und 10 % bis 2020 gesteigert werden. Bis zur Mitte des Jahrhunderts sollen die Erneuerbaren Energien rund die Hälfte des gesamten Energieverbrauchs liefern. Im Strombereich soll der Anteil der erneuerbaren Energien am Stromverbrauch im Jahr 2020 auf mindestens 20 % ansteigen. Die aktuellen vielschichtigen Förderprogramme der Bundesregierung wie z.B. das „CO<sub>2</sub>-Gebäudesanierungsprogramm“, „Wohnraum Modernisieren Öko-Plus“, „Ökologisch Bauen“, „Energetische Sanierungsmaßnahmen an Wohngebäuden“ u.a. unterstreichen den politischen Willen und die dringende Notwendigkeit zum Handeln. Sie sind auch ein Beleg dafür, dass in Bezug auf die Verbesserung der Energieeffizienz, der Luftschadstoffemissionen (z.B. CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, Feinstaub etc.) und dem Schallschutz (Verkehrs-, Schienen- und Fluglärm) an Gebäuden noch große Modernisierungs- und Sanierungsinvestitionen zu tätigen sind.

Das iRoof / iWall-Konzept leistet mit seiner CO<sub>2</sub>-emissionsfreien Technologie einen nicht unerheblichen Beitrag zu einem nachhaltigen Klimaschutz. Durch die Verringerung des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes wird für eine bessere und sauberere Umwelt gesorgt.

iRoof / iWall wurde sowohl für den Neubau als auch für die Nachrüstung energetisch mangelhafter Bausubstanz und für die Aktivierung brachliegender Dach- und Fassadenflächen für die Energiegewinnung und Emissionsvermeidung entwickelt. Mit diesem neuen regenerativen Energiekonzept kann künftig eine hochwertige und nachhaltige Bausubstanz geschaffen werden. Für ein sicheres und ökonomisches Betreiben von iRoof / iWall kann auch in der Zukunft die Energie der Sonne als unendliche Quelle kostenlos genutzt werden.

Mit den folgenden Zahlen kann für die solare Energiegewinnung eine interessante Zukunftsperspektive aufgezeigt werden. Allein in Deutschland gibt ca. 2,5 Milliarden m<sup>2</sup> Dachflächen. Davon sind ca. 0,8 Milliarden m<sup>2</sup> für einen effizienten Einsatz von Photovoltaik und Solarthermie mit einer installierbaren Spitzenleistung von 80 MWp geeignet. Das entspricht einer Kraftwerkskapazität von 13.000 MW! Im Bereich der Gebäudefassaden steckt noch weiteres riesiges Potenzial für eine saubere und ressourcenschonende Energiegewinnung.



Abb. 16: iRoof-Pilotprojekt BV Oberhausen

## 10 Literatur

- [1] Erneuerbare Energien-Gesetz (EEG) vom 21. Juli 2004
- [2] Hersel, O., Middel, M., Schäfer, H.G. (2002) Das massive Dach im Wohnungsbau. Verlag Bau+Technik, Düsseldorf
- [3] König, N. (2001) Massive Steildachelemente im Modellbau. Bundesbaublatt 50, Heft 2, Bauverlag Wiesbaden
- [4] Primus, I. (1997) Bausubstanz als Wärmequelle für Wärmepumpen. VDI Berichte Nr. 1321 VDI Verlag, Düsseldorf
- [5] Primus, I. (1995) Massiv-Absorber – Die Wärmequelle für die Wärmepumpe. Beton-Verlag, Düsseldorf
- [6] Primus, I. (1994) Effiziente Solarwärmenutzung mit Massiv-Absorbern. Beton, Heft 8/1994, Beton-Verlag, Düsseldorf
- [7] Jastrow, R. (1997) Optimierung eines Wärmepumpen-Heizsystems mit Betonabsorbern – Messungen in der Solar-Thermie-Wohnanlage Oberhausen-Rheinhausen und mathematisches Modell. VDI Verlag Düsseldorf, Dissertation Universität Karlsruhe
- [8] Ebeling, K. (1994) Energiesparen mit Beton – Neue alte Heiztechnik. Betonwerk + Fertigteiltechnik BFT, Heft 12/1994, Bauverlag Wiesbaden
- [9] Schwarz, B. (1987) Wärme aus Beton: Systeme zur Nutzung der Sonnenenergie. Beton-Verlag, Düsseldorf
- [10] Middel, M., Pickhardt, R., Eifert, H., Lieblang, P., Lotter, S., Preis, W. (2003) Bauphysik nach Maß. Verlag Bau+Technik, Düsseldorf
- [11] Hammer, R., Jung, P. (2000) Beton in der Solararchitektur. AV-Druck plus GmbH, Wien
- [12] Brandt, J., Krieger, R., Moritz, H. (1990) Wärmeschutz nach Maß. Beton-Verlag, Düsseldorf