



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Energie BFE

Schlussbericht 16.03.2015

Testinstallation Entwicklungsmuster eines vorfabrizierten, grossflächigen Dachmodul- systems mit hybridisierter Photovoltaik

Subventionsgeberin:

Schweizerische Eidgenossenschaft, handelnd durch das
Bundesamt für Energie BFE
Sektion Cleantech
Pilot- und Demonstrationsprogramm
CH-3003 Bern
www.bfe.admin.ch

Subventionsempfänger:

ETH Zürich
Professur für Gebäudetechnik
John-von-Neumann-Weg 9
CH-8093 Zürich
www.busy.ethz.ch

Autoren:

Haller Niklaus, ETH Zürich, haller@arch.ethz.ch
Bätschmann Marc, ETH Zürich, BS2 AG, mbaetschmann@bs2.ch
Leibundgut Hansjürg, ETH Zürich, leibundgut@arch.ethz.ch

BFE-Programmleitung:

Yasmine Calisesi, Leiterin P+D-Programm
yasmine.calisesi@bfe.admin.ch

BFE-Projektbegleitung:

Marc Köhli, Stv. Leiter Forschungsprogramm Energie in Gebäuden
koehli@enerconom.ch

BFE-Vertragsnummer:

SI/500023-01

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen sind ausschliesslich die Autoren dieses Berichts verantwortlich.

Inhaltverzeichnis

Zusammenfassung.....	4
Résumé.....	4
Abstract	4
1. Ausgangslage	5
1.1 Konzept: Dach als Teil der Gebäudehülle und der Gebäudetechnik	6
2. Ziel der Arbeit.....	7
3. PT 2: Testinstallation unter realen Bedingungen	8
3.1 Vorgehen / Methode.....	8
3.1.1 Konstruktiver Aufbau	8
3.1.2 Messkonzept und Instrumentierung	14
3.2 Ergebnisse / Erkenntnisse.....	18
3.2.1 Resultate der Feuchtigkeitsmessungen	18
3.2.2 Thermische Leistungsermittlung	26
4. PT3: Energetische Performance unter Standardtestbedingungen STC	28
4.1 Vorgehen / Methode.....	28
4.1.1 Konstruktiver Aufbau	28
4.1.2 Messkonzept und Aufbau: Leistungsmessungen unter Standardtestbedingungen STC	31
4.2 Ergebnisse / Erkenntnisse.....	32
4.2.1 Resultate der Leistungsmessungen	32
5. Würdigung der Ergebnisse / Erkenntnisse / Diskussion	37
6. Schlussfolgerungen, Ausblick, nächste Schritte nach Projektabschluss	38
7. Referenzen	38

Zusammenfassung

Dieses Forschungsprojekt steht in direktem Zusammenhang zur Weiterentwicklung des an der ETH Zürich entwickelten ZE-LowEx Gebäudesystems 2Sol. Ein wesentlicher Bestandteil des Systems sind PVT Hybridkollektoren. Deren sommerliche Abwärme wird zur Regeneration von tiefen Erdwärmesonden verwendet.

Der vorliegende Forschungsbericht dokumentiert die erstmalige Umsetzung eines Konzepts zur Integration von PVT Kollektoren im Bauteil Dach. Dabei handelt es sich um ein konstruktives Prinzip, bei welchem neben der energetischen Performance die gestalterische Flexibilität und insgesamt tiefe Lebenszykluskosten im Vordergrund stehen. Anhand von zwei Prototypen im Massstab 1:1 wurde die generelle Umsetzbarkeit nachgewiesen. Einer der Prototypen wurde während einem Jahr unter realen Umgebungsbedingungen bauphysikalisch getestet. Der andere diente zur Ermittlung des thermischen und elektrischen Wirkungsgrades unter Standardtestbedingungen am SPF in Rapperswil.

Die kompakte Konstruktion stellt kein erhöhtes bezüglich Feuchteschäden dar. Im Vergleich zu herkömmlichen PVT Kollektoren liegt der thermische Wirkungsgrad 14 - 25% tiefer. Die elektrische Leistung entspricht den eingesetzten PV Modulen. Die Erhöhung des Gesamtwirkungsgrades ist Gegenstand eines Folgeprojektes. Bereits heute ist die Konstruktion jedoch aufgrund der viel höheren Flächenausnutzung und der tieferen Gesamtanlagekosten konkurrenzfähig.

Résumé

Ce projet est directement lié au développement du système ZE-LowEx 2Sol, mis au point par l'EPF Zürich. Une composante essentielle du système est le collecteur solaire hybride PVT. Le rejet thermique estival des PVT est utilisé pour la régénération des sondes géothermiques profondes.

Le rapport présent documente la première mise en œuvre d'un concept pour l'intégration constructive des panneaux PVT dans la toiture. Il s'agit d'un principe constructif, dont la flexibilité de conception et les faibles coûts totaux sont aussi importants que la performance énergétique. Sur la base de deux prototypes, échelle 1:1, la faisabilité générale a été démontrée. Pendant une année entière, un des prototypes a été soumis à des tests concernant les risques hygrothermiques dans des conditions environnementales réelles. L'autre a été utilisé pour déterminer l'efficacité thermique et électrique selon la procédure standard du test STC de l'SPF à Rapperswil.

La construction compacte n'augmente pas le risque des dommages d'humidité. En comparaison avec des collecteurs PVT traditionnels, le degré l'efficacité thermique est 14 – 25% plus bas. La performance électrique correspond à laquelle des modules PV utilisés. L'augmentation de l'efficacité globale est l'objet d'un projet consécutif. Cependant, la conception est déjà concurrentielle en raison de l'utilisation de la surface plus élevée et les coûts inférieurs de la construction globale.

Abstract

This research project is directly related to the development of the ZE-LowEx building system 2Sol, developed at ETH Zurich. Essential components of the system are hybrid PVT collectors. Their summer heat is used for regeneration of deep geothermal probes.

This research report documents the initial implementation of a concept for the integration of PVT collectors in roof constructions. In addition to the energetic performance of the active layers, this constructive principle addresses a high flexibility in design and low total life cycle costs. On the basis of two prototypes at a 1:1 scale, the general feasibility has been demonstrated. One of the prototypes was installed to test the hygrothermal behaviour under real conditions. The other was used to determine the thermal and electrical efficiency under standard test conditions STC at SPF in Rapperswil.

The compact construction doesn't raise the risk of moisture damages. Compared to conventional PVT collectors the thermal efficiency ratio is decreased by 14 - 25% whereas the electrical power corresponds to the nominal power of the used PV modules. The rise of the overall efficiency is an object of a subsequent project. Nevertheless, due to a higher exploitation of the roof surface and lower total costs, the construction is already today competitive.

1. Ausgangslage

Das Bundesamt für Energie (BFE) hat mit der Professur für Gebäudetechnik der ETH Zürich einen Vertrag abgeschlossen, in dem die Leistungserbringung der ETH einerseits und die finanzielle Unterstützung durch das BFE andererseits geregelt wird. Der vorliegende Schlussbericht beschreibt das Forschungsprojekt und fasst die gewonnenen Erkenntnisse zusammen.

Dieses Forschungsprojekt steht in direktem Zusammenhang zur Weiterentwicklung des an der Professur für Gebäudetechnik der ETH Zürich entwickelten ZE-LowEx Gebäudesystems 2Sol. Das übergeordnete Ziel von 2Sol besteht in der CO₂-freien Bereitstellung der thermischen Leistung in Gebäuden und mit einem tiefen maximalen Strombezug von ausserhalb im Auslegungsfall. Das Konzept wurde in den vergangenen Jahren mehrmals in der Realität umgesetzt, unter anderem beim Mehrfamilienhaus B35 in Zürich, welches ebenfalls vom BFE unterstützt wurde.[1]

2Sol besteht im Wesentlichen aus drei Kernelementen: einem saisonalen Erdwärmespeicher, einer Wärmepumpe mit tiefem Temperaturhub und konsekutiv hohen COP über 8 sowie PVT Kollektoren zur Regeneration des Erdwärmespeichers.[2]

PVT Kollektoren werden in der Forschung seit längerer Zeit intensiv behandelt, die Marktdurchdringung ist im Vergleich zur Photovoltaik und zu thermischen Solarkollektoren jedoch verschwindend klein. Der Hauptgrund dafür liegt in der Inkompatibilität zwischen den optimalen Betriebstemperaturen der Kollektoren und den Speichertemperaturen konventioneller solarthermischer Systeme. Diese Diskrepanz wird im 2Sol System gelöst. Die Regeneration des Erdwärmespeichers erfordert relativ tiefe Temperaturen im Bereich von 25-35°C. Stammt diese Wärme aus PVT Kollektoren, können diese im Sommer mit einem thermischen Wirkungsgrad nahe des Optimums betrieben werden. Weil die Temperaturdifferenz zwischen dem Kollektor und der Umgebung nur ca. 10K beträgt. Der thermische Absorber muss gegenüber dem Aussenklima nicht isoliert werden, sprich es können unverglaste PVT Kollektoren verwendet werden was die Konstruktion der Kollektoren vereinfacht. Interessant ist hingegen die rückseitige Isolation, welche den thermischen Wirkungsgrad um ca. 10-15% steigert.[3]

Sowohl die Forschung wie auch die industrielle Entwicklung betrachten PVT Kollektoren als modulare Produkte. Dabei wird der Fokus mehrheitlich auf die Steigerung der energetischen Effizienz gelegt (Steigerung des elektrischen und/oder thermischen Wirkungsgrades). Vergleichen mit reinen PV Modulen und thermischen Solarkollektoren ist der Installationsaufwand höher. Dies führt zusammen mit der geringen Marktdurchdringung zu hohen Preisen und einer sehr eingeschränkten Produktauswahl. Konsekutiv müssen die PVT Kollektoren möglichst flächeneffizient eingesetzt werden. Auf anderweitige Kriterien kann nur bedingt Rücksicht genommen werden. Im Hinblick auf die Gebäudeintegration entsteht eine grosse Diskrepanz zwischen den energietechnischen Bedingungen und den konstruktiven sowie gestalterischen Aspekte.

Im 2Sol Konzept übernehmen die PVT Kollektoren die Funktion der Regeneration des Erdwärmespeichers. In einem 4-6 Etagen hohen Hauses mit einem moderaten Wärmebedarf für Heizung und Warmwasser korrespondiert die notwendige Kollektorfläche in etwa mit der zur Verfügung stehenden Dachfläche.

Vor diesem Hintergrund wurde an der Professur für Gebäudetechnik ein neuartiges Konzept zur Integration von PVT Kollektoren entwickelt. Dabei stehen die synergetische Betrachtung von Gebäudehülle und Umwandlung der Solarstrahlung in Strom und Wärme sowie eine möglichst hohe Anwendungsflexibilität und tiefe Gesamtanlagekosten im Vordergrund.

1.1 Konzept: Dach als Teil der Gebäudehülle und der Gebäudetechnik

In diesem Abschnitt werden die wesentlichen Punkte des Konzeptes einer Dachkonstruktion für geneigte Dächer vorgestellt, welches die Umwandlung der solaren Einstrahlung in Niedertemperaturwärme und Elektrizität als neue Primärfunktion des Daches anerkennt. Das primäre Ziel des Konzeptes besteht in der Senkung der Gesamtanlagekosten und der gleichzeitigen Erhöhung der Anwendungsflexibilität. Die Strategie beruht im Wesentlichen auf den folgenden drei Ansätzen:

Integration der funktionalen Schichten des PVT in den konstruktiven Dachaufbau:

Sowohl die meisten Dachkonstruktionen als auch der PVT Kollektor sind mehrschichtige Bauteile die jeweils hinsichtlich ihrer Bestimmung entwickelt werden. Anstatt die beiden Bauteile zu überlagern, werden die funktionalen Schichten des PVT Kollektors in den Dachaufbau integriert. Damit sollen materielle und energetische Synergieeffekte zwischen den einzelnen Schichten genutzt und ein konstruktiv kohärenter Aufbau ausgebildet werden.

Konstruktives Prinzip anstatt Produkt:

Der PVT Kollektor ist ein Produkt. Es ist das Resultat einer technischen Entwicklung die eine möglichst hohe Effizienz und die Fertigung in großen Stückzahlen anstrebt. Abweichungen vom Basismodul sind meistens mit Leistungsreduktionen und höheren Kosten verbunden. Demgegenüber werden Baukonstruktionen nicht als Produkte sondern als konstruktive Prinzipien oder Typologien bezeichnet. Der Grund dafür liegt bei den von Projekt zu Projekt unterschiedlichen Rahmenbedingungen. Ein konstruktives Prinzip lässt im Gegensatz zu einem Produkt mehr Variationen zu.

Planungs- und Bauprozess:

Insbesondere bei Sanierungsprojekten und Aufstockungen ist der Einsatz von vorgefertigten, großflächigen Bauteilen oder ganzen Raummodulen in Holzbauweise vorteilhaft. Das Konzept strebt eine vollständige Vormontage der Dachkonstruktion inklusive der thermischen und elektrischen Schichten und sämtlichen Anschlüssen in der Werkhalle an.

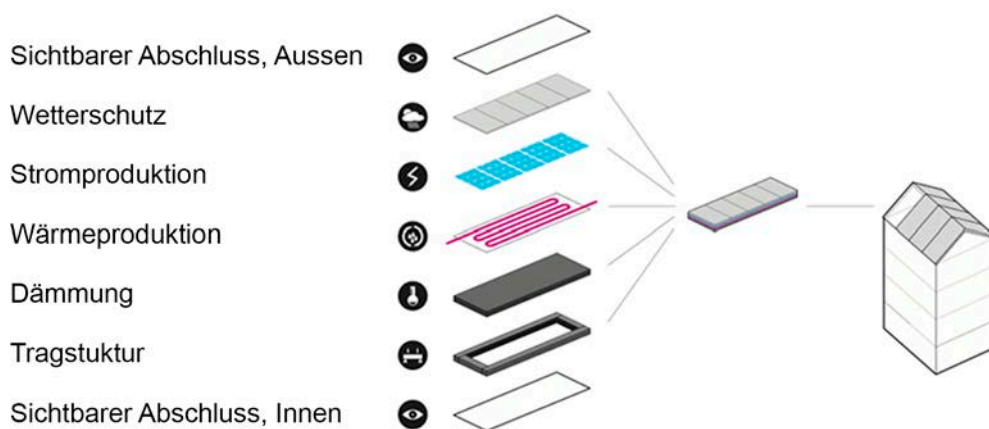


Abb. 1 Konzeptskizze zum Aufbau der Dachkonstruktion

Im Rahmen des Projektes *Archinsolar* wurden an der Professur für Gebäudetechnik Vorarbeiten im Bereich Systemintegration hybridisierter Photovoltaik mit Gebäudehüllendämmung durchgeführt.[4] Diese beruhten allerdings ebenfalls auf konventionellen, modularen PVT Kollektoren.

Das hier untersuchte baukonstruktive Konzept eines vorfabrizierten grossflächigen Dachmoduls wurde vollständig neu erarbeitet. Anhand eines kleinformatigen Musters (Prototyp PT1) wurde das Konzept veranschaulicht und die generelle Machbarkeit überprüft. Erste bauphysikalische Experimente zu den im nächsten Abschnitt formulierten Fragestellungen wurden durchgeführt.

2. Ziel der Arbeit

Im Vergleich zu einer konventionellen Schrägdachkonstruktion mit einer integrierten PV oder PVT Anlage beinhaltet das Konzept wesentliche Änderungen, welche weiterführende Untersuchungen bedurften.

Die erste Frage bezieht sich auf das hygrothermische Verhalten der Konstruktion unter realen Bedingungen. Die thermischen Absorber werden direkt auf der Dachdämmung verlegt. Die fehlende konvektive Schicht (Hinterlüftung der Dachhaut) erhöht potentiell den thermischen Ertrag der Absorber, gleichzeitig erhöht sich aber das Risiko hoher Feuchtigkeitsvorkommen. Eine hohe Materialfeuchte hat negative Auswirkungen auf die Langlebigkeit (Schimmelpilzbefall und strukturelle Integrität) sowie die Dämmeigenschaften der verwendeten Holzfaserdämmung.

Die zweite Fragestellung bezieht sich auf die energetische Performance im Vergleich zu konventionellen PVT Kollektoren. Die Trennung der PV Module von den thermischen Absorbern ermöglicht eine flexiblere, einfachere und günstigere Installation. Insbesondere die Überlappung der PV Module führt zu einem relativ niedrigen Abdeckungsfaktor der PV Module durch den Absorber und zu partiellen, permanenten Verschattungen der PV Zellen.

Die Untersuchung dieser zwei Fragestellungen erfolgte anhand von Experimenten im Massstab 1:1. Hierfür wurden in Zusammenarbeit den Firmen ERNE Holzbau AG und Pavatex SA zwei weitere Prototypen in unterschiedlichen Ausführungen hergestellt. Deren Aufbau, die daran durchgeführten Experimente und die Ergebnisse werden in den folgenden zwei Kapiteln zusammengefasst.

3. PT 2: Testinstallation unter realen Bedingungen

3.1 Vorgehen / Methode

PT2 ist die erste Ausführung des Konzeptes im Maßstab 1:1 mit sämtlichen Schichten. Der Prototyp wurde als Testanlage für den Bauablauf sowie für bauphysikalische Langzeitmessung und für Leistungsmessungen unter realen Bedingungen konzipiert. Die Produktion geschah vollständig in der Werkhalle. Die Elemente inklusive den PV Modulen wurden im September 2013 aus der Werkhalle von ERNE in Stein-Säckingen an ihren Bestimmungsort in Zürich transportiert und mit dem Kran auf dem Dach des Mehrfamilienhauses B35 montiert.

Seit dem Anschluss an die bestehende Gebäudetechnik im November 2013 leistet die Anlage einen Beitrag zur Regeneration des Erdreichspeichers. Gegenüber dem Konzept mussten aufgrund der Montage oberhalb des bestehenden Daches nur unwesentliche Änderungen an der Konstruktion vorgenommen werden. Weil das bestehende Dach die baurechtliche Maximalhöhe erreicht, deckt die neue Konstruktion die Fläche nicht vollständig ab. Die Bauhöhe wurde zudem aus statischen Gründen reduziert. Die Konstruktion ist wie das bestehende Dach 6° gegen Nord-Osten geneigt.

3.1.1 Konstruktiver Aufbau

Die Gesamtfläche der Anlage misst 31m², die aktive Fläche besteht aus 16 PV Modulen mit einer Fläche von 22m². Diese Differenz resultiert aus der Anforderung, wonach die Lastabtragung (die Konstruktion wiegt ca. 3t) über bestehende Dachanker erfolgen musste. In den dadurch entstandenen Randbereichen sind die hydraulischen Anschlüsse und die Messinstrumente untergebracht.

Tragkonstruktion

Die zweite Anpassung an das Bestandsgebäude besteht aus einer Unterkonstruktion zur gleichmäßigen Verteilung der Lasten auf die bestehenden Befestigungsanker. Diese Maßnahme ermöglicht gleichzeitig den für die bauphysikalischen Untersuchungen gewünschten Zwischenraum, führte allerdings zu einer Drehung der Spannrichtung der eigentlichen Tragkonstruktion um 90°. Die Tragkonstruktion der zwei Elemente wurde in Holzrahmenbauweise 100/80mm realisiert. Eine beidseitige Beplankung mit zwei 15mm starken OSB-Platten schließt die Tragkonstruktion ab.

Wärmedämmung

Die Wärmedämmung besteht aus mehreren Lagen unterschiedlicher Holzfaserplatten. Für die oberste Dämmschicht direkt unter den Absorberprofilen wurde eine Materialvariante mit größtmöglicher Sicherheit in Bezug auf die Feuchtetoleranz gewählt. Deswegen fiel die Materialwahl für sämtliche Schichten, die parallel zu den Absorbern verlaufen, auf Holzfaserplatten des Typs Pavatex Isolair.

Zwischen der oberen OSB Platte der Tragkonstruktion und den dazu schräg verlaufenden steifen Unterdachplatten sind flexible Weichfaserplatten und quer zur Dachneigung verlaufende Ausgleichshölzer in drei unterschiedlichen Höhen aufgebracht. Die Tragkonstruktion ist ebenfalls mit Weichfaserplatten ausgedämmt. Die oberen Schichten überdämmen die Tragkonstruktion, was sich positiv auf deren Formstabilität auswirkt, alles zusammen ergibt einen u-Wert von ca. 0,2W/m²K. Wird die Tragkonstruktion für eine Spannweite von 4-6m geplant und vollständig gedämmt, sinkt der u-Wert bis auf 0.12W/m²K. Die zwei Elemente sind bis auf einen Punkt identisch aufgebaut. Oberhalb der Tragkonstruktion wurde bei einem Element eine zusätzliche Dampfbremse zur Reduktion der Wasserdampfdiffusion von unten in die Überdämmung eingefügt (siehe Abb. 14).

Thermische Absorber

Die thermische Wärmeauskopplung geschieht über speziell konstruierte Aluminiumprofile mit den Grobdimensionen: 225mm x 5200mm (Breite x Länge) und einem Absatz von 18x80mm. Die stranggepressten Profile aus Aluminium weisen auf der Oberseite eine große Kontaktfläche zur rückseitigen Kühlung der PV Module und auf der Unterseite einen integrierten flüssigkeitsdurchströmten Kanal auf.

Die Profile werden wie die darunter liegende Dämmung mit einem Versatz versehen, der die schuppenartige Anordnung der Photovoltaik-Module ermöglicht. Die vertikale Verschiebung geschieht in der Nachbearbeitung und kann beliebig angeordnet werden. Zusätzlich muss der Kanal an den Profilen mittels Fräsen freigestellt werden. Danach können die einzelnen Kanäle mit Standardkomponenten beliebig verschaltet oder an die Sammelleitungen angeschlossen werden.

Der Absorber dient gleichzeitig als Montagesystem für die PV Module. Die Federstahlklammern, welche vorgängig an die Unterseite der PV Module geklebt werden, pressen die Module auf die Aluminiumflächen. Zu Beginn der Montage wurden die Absorberprofile mit jeweils zwei Holzschrauben im Bereich des vertikalen Versatzes befestigt (Abb. 3). Weil dies zu Torsionsbewegungen innerhalb des Profils und damit zu nicht ebenen Flächen führte, wurden die Absorber nicht mehr direkt sondern mit einem losen Band befestigt. Das Band hält die Deckung in der richtigen Position und schützt vor Sogkräften, lässt aber seitliche Bewegungen sowie leichte Drehungen zu, was den Kontakt zwischen dem Profil und den PV Modulen verbessert.

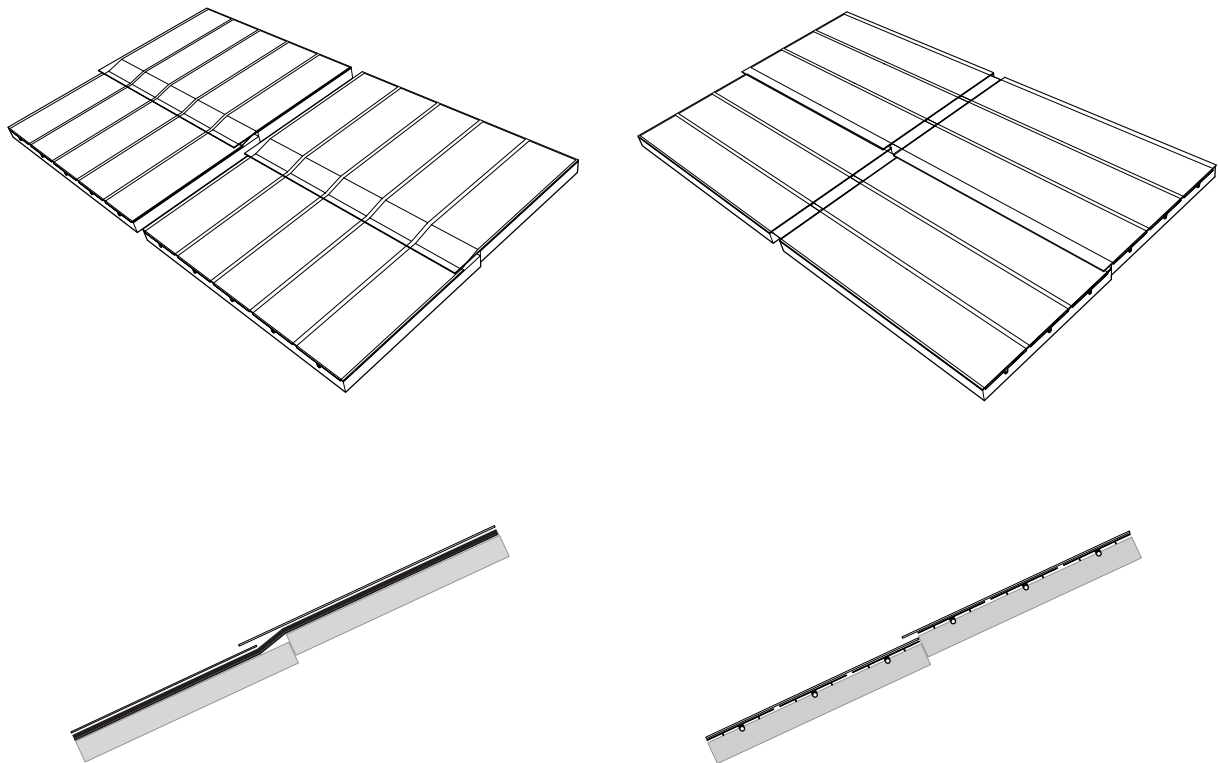


Abb. 2 Absorber als *Dachlatte*. Parallel zur Dachneigung (links) und horizontal (rechts). Bei der parallelen Anordnung ist die vertikale Fuge frei und ermöglicht damit ein ungehindertes Abfließen des Wassers in die Regenrinne. Bei der horizontalen Anordnung läuft das Wasser von den PV Modulen auf die Absorberprofile und kann von da aus in die Dachdämmung gelangen.

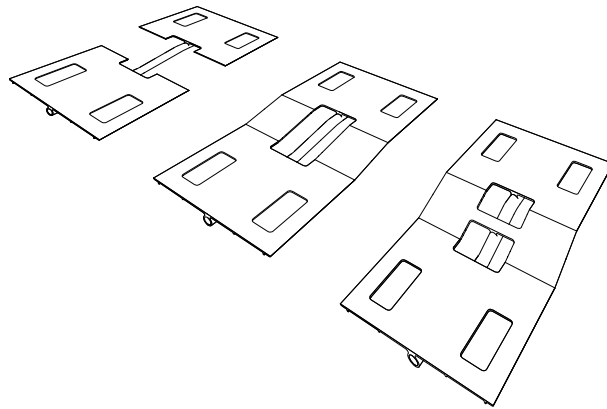


Abb. 3 Entwicklungsschritte Thermisches Absorberprofil. Die 1. Variante (links) ist instabil was zu hohen Materialbelastungen und damit zu Beschädigungen des Kanals führen kann. Die 2. und die 3. Variante bieten eine genügende Stabilität. Der Mittelsteg über dem Kanal bei der finalen Version (rechts) ermöglicht eine *schwimmende* Befestigung der Absorber gegen unten mit einem Band.

Hydraulik

Sämtliche hydraulischen Anschlussteile sind Standardkomponenten aus dem Solar- und Sanitärbereich. Aufgrund des bereits vorgängig bestimmten Durchmessers des Absorberkanals und der vom Gebäude vorgegebenen Durchflussmenge musste die hydraulische Verschaltung an das gegebene System angepasst werden. Um innerhalb der Kollektoren die selbe Größenordnung in der Durchfluggeschwindigkeit sowie Fluidmenge wie in der auf einem weiteren Dach des Gebäudes bereits installierten PVT Kollektoranlage zu erhalten, wurden jeweils vier Aluminiumabsorber seriell miteinander verschaltet. Somit sind die Absorber von vier PV Modulen einer Reihe verbunden. Die vier Reihen sind in einem Tichelmannsystem verbunden. Vor- und Rücklauf befinden sich auf der Giebelseite und können am höchsten Punkt entlüftet werden.

PV Module

Die Deckschicht der Anlage besteht aus 16 schwarzen, micromorphen Dünnschicht PV Modulen des Typs Tianwei SolarFilms TW-TF-120W-1. Ein Modul hat eine maximale Leistung von 120W. Die Masse sind 1300x1100x7mm und das Gewicht beträgt ca. 24kg. Die Anlage besteht aus einem String und weist eine elektrische Peakleistung von 1.92kWp auf. Im entwickelten Produktkonzept kann prinzipiell jedes rahmenlose Modul und Format eingesetzt werden. Bedingung ist eine Modulrückseite aus Glas, damit die statischen Kräfte gleichförmig aufgenommen werden können und im Zellaufbau keine unerwünschten Belastungen verursacht werden.

Idealerweise verfügen die Module auf einer Seite über eine Randverbreiterung oder einen inaktiven Zellbereich damit die Auswirkungen der Verschattung beim vertikalen Versatz minimiert werden. In PT2 sind die PV Module derart ausgerichtet, dass die Zellen in Richtung der Dachneigung verlaufen und somit nur teilverschattet sind. Die thermischen Absorber können einfach auf die Modulmasse angepasst werden. Der Aufbau ist theoretisch in einem Raster von ca. 25-30cm möglich, was ungefähr dem Maß eines Standarddachziegels entspricht.

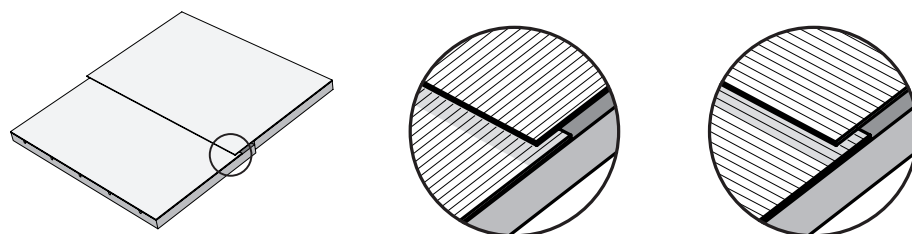


Abb. 4 Anordnung der PV Module. Die horizontale Anordnung (rechts) führt zu einer kompletten Verschattung mehrerer Zellen und blockiert damit das gesamte Modul respektive den gesamten String. Bei der vertikalen Anordnung (Mitte) führt die Teilverschattung zu einer minimalen Leistungsreduktion.

Befestigung der PV Module auf den thermischen Absorbern

Die PV Module werden auf der Rückseite mit rostfreien Federstahlklammern bestückt. Die Federkraft wirkt senkrecht auf die Module und presst die Photovoltaik großflächig auf die Absorberfläche. Auf jedem Photovoltaik-Modul werden 32 Stück (8 Stück je Absorber) eingesetzt. Die Geometrie und das Design der Klammern sind mit dem Hersteller speziell für eine entsprechende Federkraft entwickelt worden. Mehrere Iterationsschritte in der Entwicklung haben zum aktuellen Design geführt. Diese neue Form ermöglicht eine große Klebefläche und der integrierte Distanzhalter stellt eine konstante Kleberdicke von 3mm sicher. Die Federklammern werden mit Sikasil AS 785 auf die Rückseite des Photovoltaik-Moduls geklebt. Dieser wird aufgrund seiner hohen UV Beständigkeit und der Dauerhaftigkeit in zahlreichen Solaranwendungen eingesetzt. Die Anzahl der Klammern und deren Platzierung sind abhängig von den erwartenden Lasteinwirkungen auf die PV Module und können somit von einem Projekt zum anderen variieren.

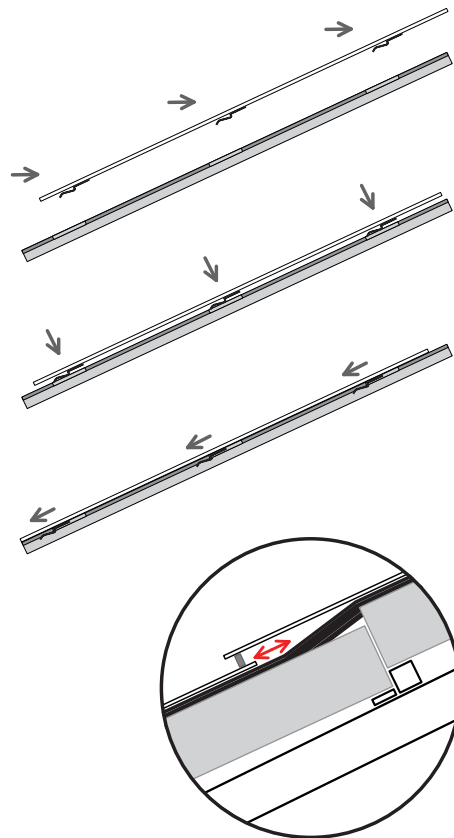


Abb. 5 Befestigung der PV Module auf Absorber. Bei einem Defekt eines PV Moduls kann dieses einfach ausgetauscht werden.

Dachentwässerung:

Die vertikale Entwässerung erfolgt über die Schuppung der PV Module. Die Überlappung der einzelnen Module beträgt 50mm, ein dampfdiffusionsoffenes aber schlagregendichtes Fugenband dichtet die Fuge ab. Die vertikale Fuge zwischen den PV Modulen ist nicht wie bei vielen PV Indachsystemen mit einem Gummiband abgedeckt sondern aus ästhetischen und praktischen Gründen offen gelassen. Bautoleranzen und die thermische Dilatation der Module sind so gewährleistet und die Module können einfacher ausgetauscht werden.

Unter den Absorbern in die Dämmung eingelassene Regenrinnen aus Blech führen das über die seitlichen Glaskanten abtropfende Wasser ab und leiten es in die Sammelrinne an der Traufe. In der Sammelrinne liegen auch die Anschlüsse der thermischen Absorber. Falls es zu einer Leckage kommt, fließt die Flüssigkeit in die Sammelrinne. Der Modulstoß der beiden Elemente befindet sich ebenfalls bei der vertikalen Regenrinne. Damit sind sämtliche kritischen Punkte in den sichtbaren Bereich gerückt.



Abb. 6 Aufbau mit Unterkonstruktion und Dämmung. Die Ausgleichshölzer (Bildmitte) garantieren einen genauen Höhenversatz der darüber liegenden Schichten.



Abb. 7 Fertige Unterkonstruktion. Zur Montage der aktiven Schichten vorbereitetes Dachelement.



Abb. 8 Montage thermische Absorber und PV Module. Sämtliche hydraulischen Anschlüsse liegen im Bereich der Dachentwässerung.



Abb. 9 Montage der vorfabrizierten Elemente. Installation als Testanlage auf dem Mehrfamilienhaus B35 in Zürich.



Abb. 10 Fertig installierter Prototyp PT2.

3.1.2 Messkonzept und Instrumentierung

Messziele

Die Messungen an PT2 auf dem Dach des Mehrfamilienhauses B35 sollten genauere Erkenntnisse über die bauphysikalischen Risiken der Konstruktion unter möglichst realen Bedingungen liefern. Zusätzlich wurde die thermische Leistung der Anlage gemessen.

Messkonzept thermische Leistung

Das Dachmodul ist hydraulisch an den Kühlkreislauf der bereits während dem Bau des Gebäudes installierten PVT Kollektoren angeschlossen. Die Messungen beziehen sich jedoch nur auf die neue Installation. Dafür ist an der Schnittstelle zwischen der bestehenden und der neuen Anlage ein zusätzlicher Volumenstromzähler sowie im Vor- und Rücklaufrohr jeweils ein Anlegefühler zur Bestimmung der Temperaturdifferenz eingebaut. Der thermische Energieertrag bezieht sich auf die gesamte aktive Fläche der Konstruktion. Weil die Anlage im bestehenden Kreislauf eingebunden ist, sind der Durchfluss und die Vorlauftemperatur vom System abhängig und können für die neue Anlage nicht separat gesteuert werden.

Messkonzept Bauphysik

Im Vergleich zu PT1 wurden bei PT2 möglichst reale Randbedingungen angestrebt. Der Konstruktionsaufbau verfügt über sämtliche Schichten, der thermische Absorber leitet die Wärme ab und unterhalb der Konstruktion befindet sich ein seitlich abgeschlossener und gedämmter Zwischenraum in den die Luft aus der Wärmerückgewinnungsanlage aus dem Gebäude eingeblasen wird. Im Zuluftkanal ist eine Widerstandheizung mit einem Ventilator eingebaut. Die eingeblasene Luftmenge und die Heizleistung sind über einen Temperaturfühler im Zwischenraum gesteuert.

Im Fokus der Untersuchungen steht die Aufzeichnung der Feuchtigkeitsverläufe in den verschiedenen Dämmschichten zwischen der Tragkonstruktion und den Absorberprofilen. Die Grenzwerte für das verwendete Dämmmaterial der Firma Pavatex liegen bei ca. 20% massenbezogener Materialfeuchte respektive bei einer konstanten Umgebungfeuchte von 85% relativer Luftfeuchtigkeit. Dieser Wert liegt aufgrund der Hydrophobierung durch Beimischung von Paraffin und Verdichtung der Oberfläche 5% über der für Holzkonstruktionen allgemein definierten kritischen Grenze. In den Experimenten wird jedoch der tiefere Wert als kritisch betrachtet. Die Ausgangswerte des Materials liegen bei ca. 7-9% Materialfeuchte. Dieser Zustand entspricht einer Umgebung mit einer Luftfeuchtigkeit von ca. 50%. Somit kann die Dämmschicht relativ viel Feuchtigkeit aufnehmen. Aufgrund der Experimente an PT1 wird davon ausgegangen, dass diese Feuchtigkeit in den Sommermonaten wieder entweicht. Im Hinblick auf die Langzeitstabilität der Konstruktion werden folgende spezifischen Fragen gestellt:

- In welchem Bereich befinden sich die Feuchtigkeitswerte? Werden die kritischen Grenzwerte erreicht?
- Wenn ja, wie lange dauern die kritischen Phasen?
- Ist die Austrocknung im Sommerhalbjahr möglich damit keine Feuchtigkeitsakkumulation von einem Jahr zum nächsten stattfindet?
- Welchen Einfluss hat die zusätzlich eingebaute Dampfbremse in einem der Dachelemente?

Eine abschließende Beurteilung der bauphysikalischen Risiken bedingt eine Langzeitbeobachtung über mindestens 2-3 Jahre. In diesem Bericht werden jedoch nur die Messungen vom Beginn der Aufzeichnungen von November 2013 bis Dezember 2014 betrachtet. Damit können in Bezug auf die formulierten Fragen Aussagen zum hygrothermischen Verhalten der Konstruktion unter den spezifischen Rahmenbedingungen im ersten Betriebsjahr gemacht werden.

Unter der Voraussetzung, dass die Konstruktion bis im Frühling gut austrocknet war ein Stress-test vorgesehen. Bereits gegen Ende April lagen die Werte sämtlicher Messpunkte innerhalb der Wärmedämmung unterhalb von 60% relativer Luftfeuchtigkeit. Damit war die Konstruktion bereits deutlich trockener als zu Beginn der Aufzeichnungen. Der Verlauf der Aufzeichnungen deutete zudem darauf hin, dass die Konstruktion wasserdicht ist. Obwohl es im Frühling mehrmals sehr intensive

Gewitter gab, konnten nie Werte nachgewiesen werden, die auf ein Eindringen von Wasser durch die Deckschicht schließen ließen. Zu den Wetterdaten in dieser Periode muss allerdings auch angemerkt werden, dass insbesondere der Monat April verhältnismäßig warm und trocken war wie die Aufzeichnungen der Wetterdaten in Kapitel 4.5.3 zeigen. Der Stresstest erfolgte Anfang Juni an einem Element. Das andere Element wurde nicht manipuliert und zeigt damit den Verlauf ohne Einwirkungen von außen.

Tab. 1 Zeitlicher Ablauf der Untersuchungen an PT2. Während den Messungen kam es immer wieder zu Teilausfällen einzelner Sensoren oder ganzer Gruppen. Diese sind auf den Aufzeichnungen sichtbar (Unterbrüche) und hier nicht einzeln aufgelistet.

Datum	Maßnahme/Ereignis	Bemerkungen
24.09.2013	Montage Dachelemente	
12.11.2013	Sensorik fertig installiert und Beginn der Aufzeichnungen	Einstrahlungsmesser und Durchflusszähler starten erst im Frühling.
21.11.2013	Hydraulischer Anschluss der Anlage	System noch nicht gefüllt.
09.01.2014	Einbau und Start der Widerstandsheizung in den Zuluftkanal	Zuluft war zu kalt und wird ab jetzt in Abhängigkeit der Temperatur im Zwischenraum konditioniert. Zielwert 20-26°C.
07.02.2014	Füllung hydraulisches System	Bis Anfang Februar läuft die Anlage nicht.
17.02.2014	Inbetriebnahme hydraulisches System	Pumpen des bestehenden Systems starten ab 400W/m ² Einstrahlung.
27.02.2014	Start Aufzeichnungen Einstrahlung und Durchflüsse	
05.06.-08.06.2014	Stresstest: Abdecken von 4 PV und Eingabe Wasser von oben	Wasser führt zu Teilausfall der Sensorik. Einzelne Sensoren gehen kaputt.
Ab Mitte Juni 2014	Normaler Betrieb	

Versuchsaufbau

Die Messungen der Feuchtigkeit in der Konstruktion erfolgen wiederum hygroskopisch. Das modular zusammengestellte Netzwerk wurde für die Experimente an PT 1 konzipiert, bei PT 2 jedoch mit mehr Messpunkten und zusätzlichen Sensortypen ausgebaut. Innerhalb der beiden Elemente sind insgesamt acht Sensorgruppen eingebaut. Eine Gruppe besteht jeweils aus drei T&rH-Sensoren und einem Temperaturanlegefühler auf der Unterseite der Absorberprofile. Die genaue Platzierung ist auf Abb. 15 ersichtlich. Vier Sensoren im Zwischenraum sowie eine Wetterstation komplettieren die Messinstrumente.

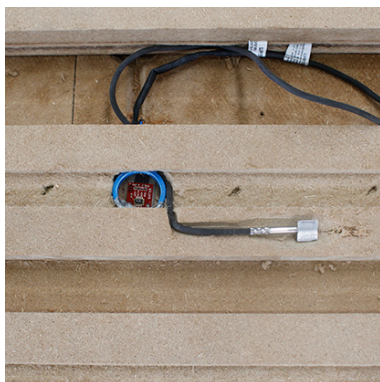


Abb. 11 Einbau Sensorik während der Produktion. Anlegefühler und T&rH-Sensor in der obersten Dämmschicht.



Abb. 12 Umgebungsklima. Links: Wetterstation mit Pyranometer, rechts: PVT Vor- und Rücklauf.



Abb. 13 Zwischenraumkonditionierung. Isolierter Zuluftkanal an Traufseite der Dachkonstruktion.

Alle Sensoren bis auf den Pyranometer werden kalibriert ausgeliefert. Aufgrund der Empfindlichkeit und der damit verbundenen Defektgefahr während den Vorbereitungsarbeiten (Löten und Verkabelung), wurde das gesamte Netzwerk zuerst im Labor aufgebaut und getestet. Die zweite Schwierigkeit bestand darin, dass die Sensoren bereits während der Produktion der Dachelemente eingebaut werden mussten. Der Großteil der Sensoren ist im Nachhinein nicht mehr zugänglich und damit bei einem Defekt auch nicht austauschbar. Aus diesem Grund wurde von Beginn weg ein redundantes System konzipiert. Jedes Dachelement verfügt über vier Gruppen, jeweils zwei befinden sich im oberen und zwei im unteren Bereich. Nach dem Einbau und der Montage auf dem Dach funktionierten alle Sensoren. Seit Beginn der Aufzeichnungen kam es jedoch mehrmals zu Teilausfällen einzelner Sensoren oder ganzer Gruppen. Zur Validierung der aufgezeichneten Umgebungsparameter wurden diese mehrmals mit der nächstgelegenen Wetterstation von Meteoschweiz in Zürich Fluntern verglichen.

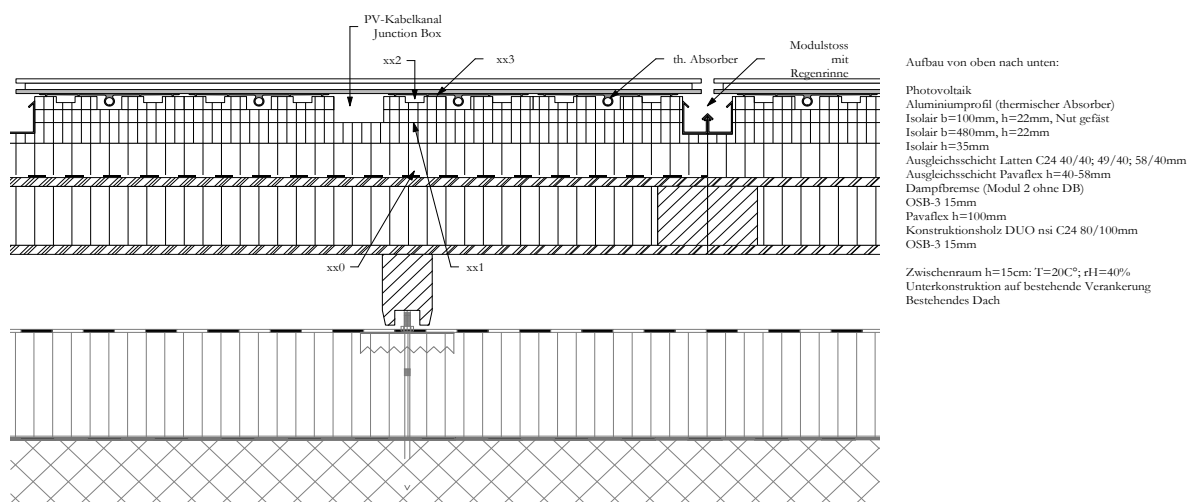
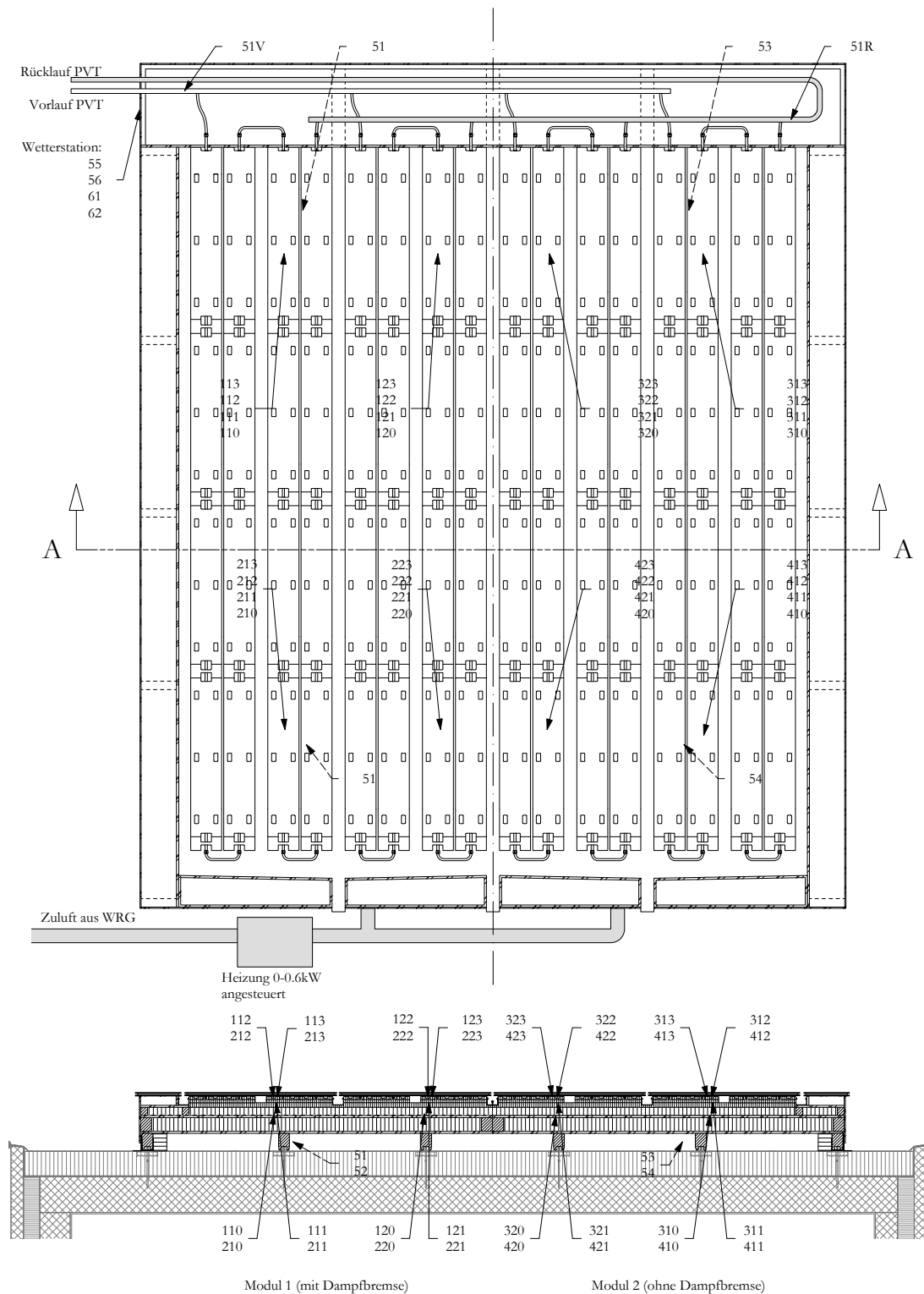


Abb. 14 Detailschnitt. mit der Platzierung der Sensoren sowie Beschreibung des konstruktiven Aufbaus.



Legende Sensoren:
SHT 15 (Temperatur & relative Luftfeuchtigkeit): xx0, xx1, xx2, xx
PT100 (Temperatur): xx2, 51V, 51R
Durchflusszähler: 62
Pyranometer: 61

Abb. 15 Pläne Sensorik. Draufsicht und Querschnitt mit Platzierung sämtlicher Sensoren.

3.2 Ergebnisse / Erkenntnisse

3.2.1 Resultate der Feuchtigkeitsmessungen

Die Analyse der Resultate ist wie folgt strukturiert: In einem ersten Schritt werden die Daten sämtlicher Messpunkte über die gesamte Periode anhand der aufgezeichneten Verläufe analysiert und untereinander verglichen. Daraufhin werden die kritischen Bereiche in der Konstruktion hinsichtlich des Schimmelpilzrisikos und der Materialfeuchte genauer betrachtet.

Analyse des Feuchteverlaufs über die gesamte Periode

In den beiden Dachelementen sind vier Gruppen mit jeweils vier Sensoren eingebaut. Entsprechend sind die Darstellungen zur Analyse aufgebaut. Abb. 16 zeigt exemplarisch die aufgezeichneten Daten für die Sensorgruppe R11. Die obersten vier Zeilen umfassen die vier Messpunkte in der Konstruktion zwischen der OSB Platte der Unterkonstruktion und dem thermischen Absorber von oben nach unten, wobei der oberste Sensor (S113) nur die Temperatur an der Rückseite des Aluminiumprofils misst. In der fünften Zeile ist das Klima im Zwischenraum und in der sechsten Zeile das Außenklima abgebildet. Die Messintervalle betragen 80 Sekunden was zu sehr starken Schwankungen im Tagesverlauf führt. Deshalb sind für jede Sensorgruppe zusätzlich die Tagesmittelwerte abgebildet.

Generell weisen alle Messpunkte einen deutlichen Verlauf zwischen Winter und Sommer auf. Diese Unterschiede sind in den oberen Lagen grösser als bei den Messpunkten, welche in der Dämmung eingeschlossen sind. In der obersten Lage liegt die gemessene relative Luftfeuchtigkeit im Winter bei sämtlichen Sensorgruppen über längere Zeit oberhalb der kritischen Grenze von 80%. Mit den steigenden Temperaturen ab März sinkt sie jedoch sehr rasch ab und erreicht bereits im April Mittelwerte um 60%. Im Sommer sinken sie schließlich bis auf 30% hinab bis sie schließlich im Herbst wieder auf die Ursprungswerte ansteigen. Im Vergleich dazu liegen die Werte in den unteren Lagen in einem engeren Bereich. Nur ein einziger Sensor (S311), der in der Holzfaserdämmung eingeschlossen ist, hat im Winter die kritische Grenze erreicht. Aufgrund dieser ersten Beobachtungen kann der Schluss gezogen werden, dass die Feuchtigkeit innerhalb der Dämmschichten oberhalb der Unterkonstruktion fast ausnahmslos unterhalb der Grenzwerte lag.

Die Feuchtigkeit, welche entweder von unten durch Diffusion aus dem Zwischenraum oder aufgrund von Tauwasserbildung an den Absorberprofilen in die Dämmplatten gelangte, konnte von den Holzfaserplatten aufgenommen, gespeichert und im Frühjahr rasch wieder abgegeben werden. Die Tatsache, dass der Feuchtigkeitsaustausch mit der Umgebung durch Adsorption und die Desorption langsam stattfindet, lässt auch darauf schließen, dass es kein Eindringen von Wasser durch die Deckschicht gab. Ein solches Ereignis hätte zu einem raschen und sehr hohen Anstieg der relativen Luftfeuchtigkeit geführt und wäre mit größter Wahrscheinlichkeit nur an einzelnen Punkten aufgetreten. Dieser Aspekt deutet darauf hin, dass die Konstruktion nach oben hin wasserdicht ist, obwohl die Dachneigung nur 6° beträgt. Die kritischsten Stellen sind die Fugen bei der Überlappung der PV Module. Die eingesetzten Fugenbänder erfüllen aber offensichtlich den Schutz vor auftreibendem Wasser auch bei starken Niederschlägen und hohen Windgeschwindigkeiten wie sie im Frühling mehrmals vorgekommen sind. Die Glasflächen der PV Module sind wasserdicht und auch wasserdampfdicht. Sie liegen direkt auf den Absorbern und es gibt keine durchgehende Belüftung zwischen der Dämmung und den Profilen.

Damit stellt sich die Frage, wie die Austrocknung der Dämmschicht stattfindet. Fällt die Konvektion weg, ist dies nur noch über die Diffusion nach außen oder innen möglich. Die treibende Kraft hinter der Diffusion ist der Partialdruckunterschied des Wasserdampfs in der Luft und damit vor allem der Temperaturunterschied. Daneben spielt aber der Diffusionswiderstand (sd-Wert) der einzelnen Schichten eine große Rolle. Aufgrund der höheren Temperaturen im Zwischenraum ist der Partialdruck im Winter im Zwischenraum höher als in den oberen Schichten. Im Frühling dreht sich dieses Verhältnis und die Feuchtigkeit könnte prinzipiell nach innen diffundieren. Dieser Effekt wird als Umkehrdiffusion bezeichnet.[5]

Der sd-Wert der gesamten Unterkonstruktion beträgt kumuliert ca. 6.2m gegenüber einem sd-Wert von ca. 0.4m der oberen Dämmplatten. Beim Element mit der Dampfbremse liegt der sd-Wert

der Unterkonstruktion entsprechend höher bei 16.2m. Diese Annahmen negieren zudem, dass die oberen Schichten nicht durchgehend homogen sind. Die zahlreichen Aussparungen in den oberen Dämmplatten und die Schuppung führen zu seitlich offenen Flächen und damit zu *Ventilen*. Somit steht der Diffusion nach innen ein vielfach höherer Widerstand entgegen als nach außen. Folglich muss davon ausgegangen werden dass die Austrocknung mehrheitlich nach oben erfolgt. Die vergleichende Untersuchung anhand der Elemente mit und ohne Dampfbremse verstärkt diese Annahme (siehe Abschnitt: Einfluss der Dampfbremse). Trotz der großflächigen Abdeckung durch die Absorber und die PV Module konnte die Feuchtigkeit in der betrachteten Periode also ohne durchgehende Konvektionsschicht entweichen.

Tab. 2 PT2, Risikoanalyse Feuchtigkeitswerte. Zusammenstellung der beobachteten kritischen Feuchtevorkommen. (relative Feuchtigkeit >80%).

Sensor	Element	Lage	Dauer	Bemerkungen
S112	1	2	65 Tage	
S122	1	2	44 Tage	
S212	1	2	55 Tage	
S222	1	2	66 Tage	
S311	2	1	51 Tage	Messunterbruch
S312	2	2	85 Tage	Messunterbruch, Ausfall nach Stresstest
S320	2	0	8 Tage	Stresstest
S322	2	2	58 Tage	Messunterbruch, Ausfall nach Stresstest
S412	2	2	51 Tage	
S420	2	0	12 Tage	Ausfall nach Stresstest
S422	2	2	77 Tage	
Legende				
Element		1: mit Dampfbremse, 2: ohne Dampfbremse		
Lage		Lage des Sensors; 0: auf Unterkonstruktion, 1: abgeschlossen in oberster Dämmschicht, 2: unter Absorberprofil, siehe auch Schnitt in Abb. 14 und Abb. 15.		
Dauer		Die Dauer bezieht sich auf den gesamten Zeitraum, in dem der Grenzwert überschritten wird, d.h. inklusive kurzen Unterbrüchen. Messunterbrüche bei einzelnen Sensoren werden nicht abgezogen.		

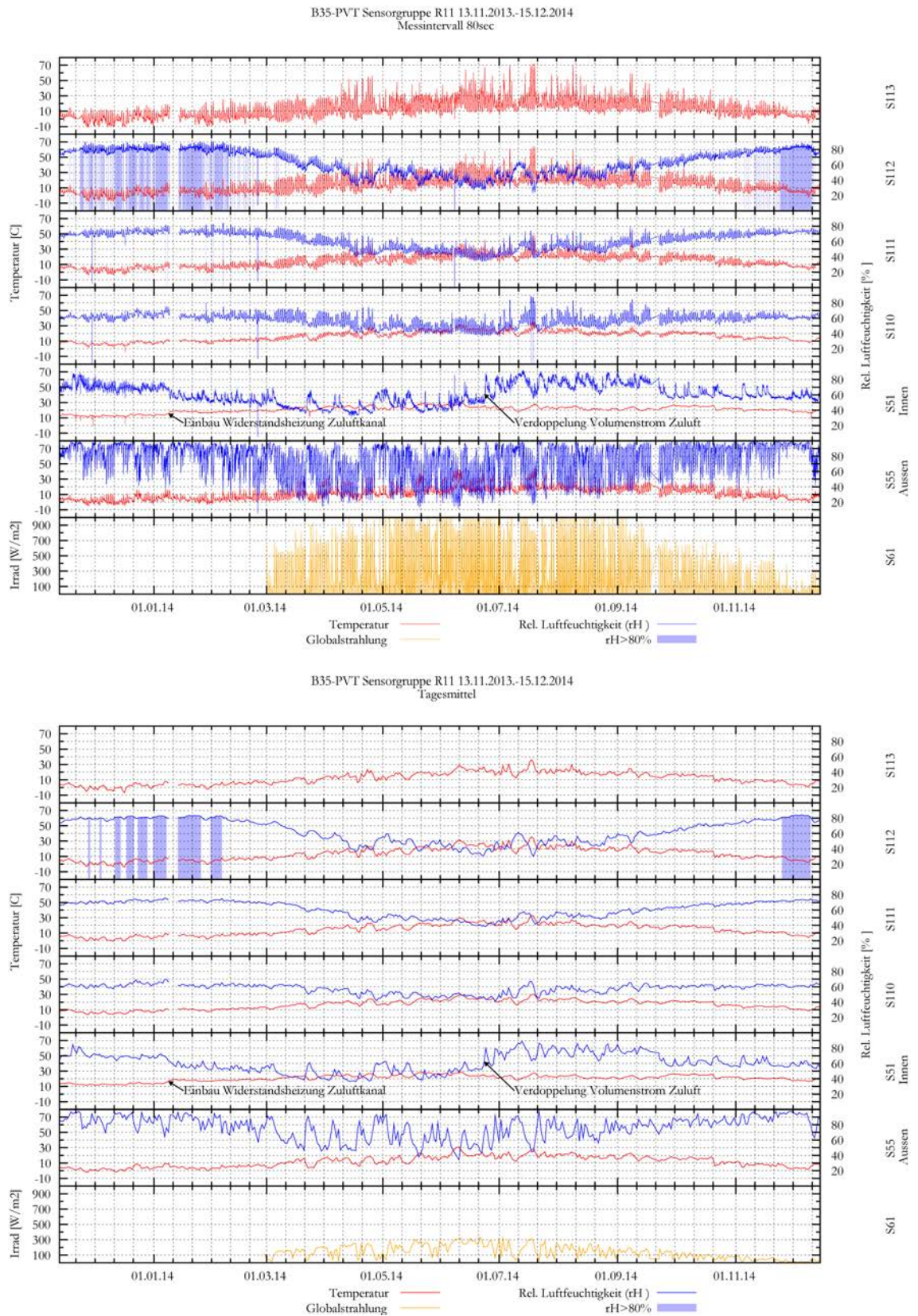


Abb. 16 Datenaufzeichnung. Exemplarische Darstellung der Aufzeichnungen sämtlicher Messwerte (oben) und gleitende Tagesmittelwerte (unten) für die Sensorgruppe R11. Die Plots sind nach der Lage der Sensoren im Konstruktionsschnitt strukturiert (obere vier Zeilen). Darunter sind Innen- sowie Außenkonditionen und zuunterst die solare Einstrahlung auf das Modul aufgezeichnet.

Analyse der Bereiche mit hohem Feuchtevorkommen hinsichtlich des Schimmelpilzrisikos

Eine langandauernde hohe relative Luftfeuchtigkeit ist die Grundlage für die Schimmelpilzkolonien. Das Wachstum holzschädigender Mikroorganismen ist neben der Feuchtigkeit aber auch maßgeblich von der Temperatur und der Dauer guter Bedingungen abhängig. Die relative Feuchtigkeit direkt unter den Absorberprofilen liegt bei allen Messpunkten im Winter über längere Zeit oberhalb der kritischen Grenze von 80%. Allerdings sind die Temperaturen in dieser Lage auch am tiefsten. Zur Abschätzung des Schimmelpilzrisikos werden die gemessenen relativen Feuchten deshalb in Abhängigkeit der Temperatur dargestellt und mit dem Schimmelpilzmodell von Hukka und Viitanen verglichen, welches das Schimmelpilzrisiko in Abhängigkeit der relativen Luftfeuchtigkeit und der Temperatur betrachtet.[6]

Abb. 17 zeigt die Resultate dieses Vergleichs anhand der Stundenmittelwerte der aufgezeichneten Daten von Sensor S422 auf. Punkte oberhalb der roten Kurve stellen nach dem Modell kritische Werte dar. Die unterschiedlichen Farben dienen der zeitlichen Eingrenzung, eine Farbe stellt jeweils die Werte eines Monats dar. Die niedrigen Temperaturen im Winter führen dazu, dass die Wachstumsbedingungen trotz der hohen Luftfeuchtigkeit nur während einzelnen Stunden gut sind. Diese wenigen Überschreitungen spiegeln jedoch die starken Schwankungen im Tagesverlauf wieder wie ein Vergleich mit Abb. 18 zeigt. Anstelle der Stundenmittelwerte sind die Tagesmittelwerte des gleichen Messpunktes abgebildet. Weil kein einziger mehr oberhalb der roten Linie liegt, kann davon ausgegangen werden, dass die drei maßgebenden Wachstumsbedingungen nicht zusammen aufgetreten sind.

Die gewählte Methode zur Analyse des Schimmelpilzrisikos anhand der schrittweisen Eingrenzung zeigt auf, dass die Konstruktion zumindest in den oberen Schichten und unter den gegebenen Umständen keinem erhöhten Risiko durch holzerstörende Pilze ausgesetzt war. Visuelle Kontrollen bestätigen diesen Befund zusätzlich. Mehrmals wurden einzelne PV Module zu Demonstrationszwecken oder für den Stresstest abgedeckt. Dabei konnten nie entsprechende Spuren festgestellt werden.

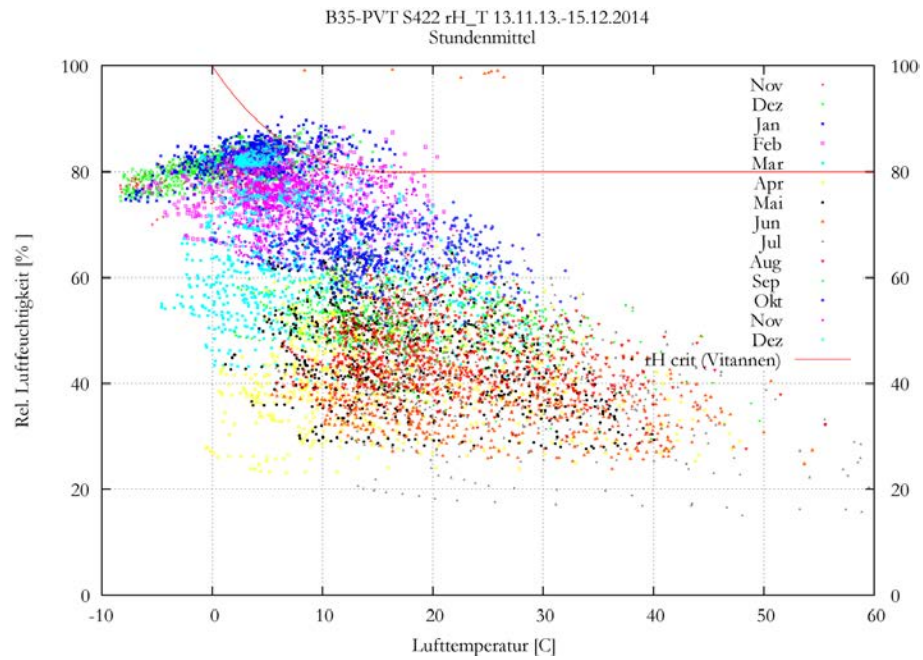


Abb. 17 Risikoanalyse Luftfeuchtigkeit, S422. Verteilung der Stundenmittelwerte der aufgezeichneten relativen Luftfeuchten und Temperaturen bei Sensor S422 unterhalb des thermischen Absorbers im Zeitraum November 2013 bis Dezember 2014. Punkte oberhalb der roten Linie stellen kritische Werte dar.

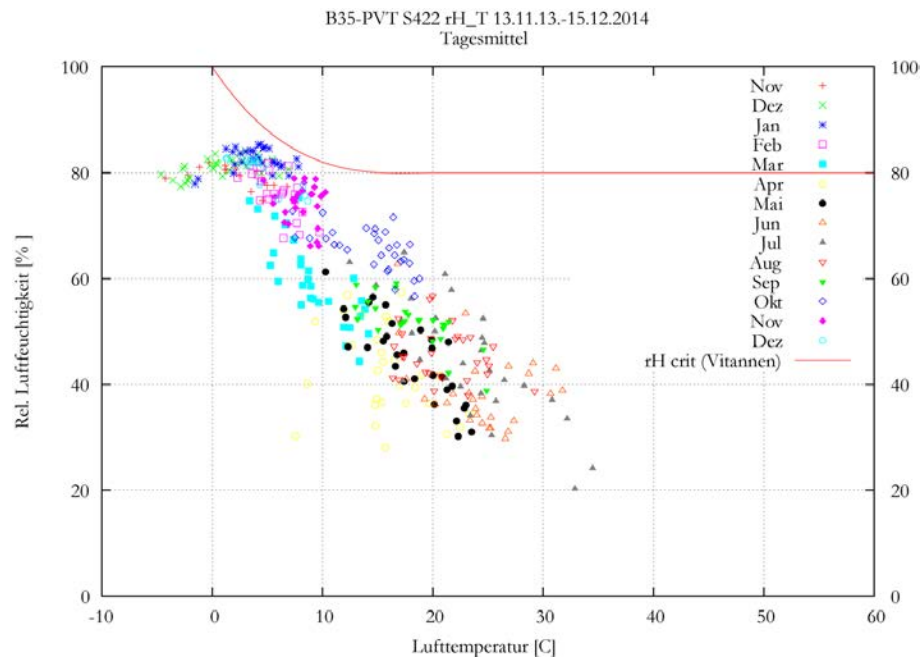


Abb. 18 Risikoanalyse Luftfeuchtigkeit, S422. Verteilung der Tagesmittelwerte der aufgezeichneten relativen Luftfeuchten und Temperaturen bei Sensor S422 unterhalb des thermischen Absorbers im Zeitraum November 2013 bis Dezember 2014. Punkte oberhalb der roten Linie stellen kritische Werte dar.

Einfluss der Dampfbremse

Dampfbremsen werden dazu verwendet, die meist winterliche Dampfdiffusion aus dem Innenraum in die Konstruktion abzuschwächen. Dadurch gelangt weniger Feuchtigkeit in den Bauteilquerschnitt und das Risiko der Tauwasserbildung sinkt. Sie werden üblicherweise auf der Raumseite der Wärmedämmung angebracht. Umgekehrt stellt die Dampfbremse im Sommer eine Barriere für die Diffusion in Richtung Innenraum dar.

Eines der beiden Dachelemente von PT2 verfügt über eine Dampfbremssfolie mit einem s_d -Wert von 10. Das andere Element hat keine zusätzliche Dampfbremse. Entgegen der üblichen Schichtenfolge ist die Dampfbremse bewusst nicht auf der Raumseite, sondern auf der oberen OSB-Platte der Unterkonstruktion angebracht. Damit erhöht sich natürlich das Risiko der Tauwasserbildung in der Dämmschicht der Unterkonstruktion. Im Zentrum dieser Untersuchungen stehen jedoch die Dämmschichten unter den Absorbern und deren Austrocknungsverhalten. Sollte es aufgrund der oben genannten Ursachen zu einer Umkehrdiffusion kommen, würde das beim Element mit der Dampfbremse bei gleicher Temperatur zu einer höheren Feuchtigkeit in der Überdämmung führen.

Dieser Effekt kann jedoch nicht nachgewiesen werden. Abb. 19 zeigt die überlagerten Verläufe der Sensorgruppen R21 und R41 und Abb. 20 diejenigen der Sensorgruppen R22 und R42. R21 und R41 liegen im äußeren Elementbereich und müssten somit größere Unterschiede aufweisen, weil der Effekt der Horizontaldiffusion aufgrund der größeren Distanz kleiner ist. Die Temperatur ist bei beiden Elementen exakt die gleiche, womit die Randbedingungen identisch sind. Auch die gemessenen Feuchteverläufe sind beinahe gleich. Nur die unterste Dämmschicht zeigt leichte Differenzen auf. In der gesamten Periode bis Juni liegt die Kurve beim Element ohne Dampfbremse minimal höher. Ab Januar steigt die Differenz auf ca. 5%, was auf die Inbetriebnahme der Zusatzheizung im Zwischenraum und damit auf eine erhöhte Diffusion von unten hinweist. Damit ist einerseits bestätigt, dass die Dampfbremse die Diffusion von unten abschwächt, andererseits jedoch auch, dass die Feuchtigkeit im Sommer aus dem Modul nach oben entweicht. Die Dampfbremse hat einen Einfluss auf das Feuchtevorkommen in der Überdämmung, allerdings sind die Unterschiede aufgrund des ohnehin bereits beträchtlichen Dampfdiffusionswiderstandes der Unterkonstruktion gegenüber der Überdämmung klein. Falls in einer realen Anwendung eine solche Folie eingebaut werden sollte, müsste sie auf jeden Fall raumseitig angebracht werden, um die Dampfdiffusion aus dem Innenraum zu verringern und das Risiko von Tauwasserausfall und hohen Feuchtwerten in der Konstruktion zu minimieren.

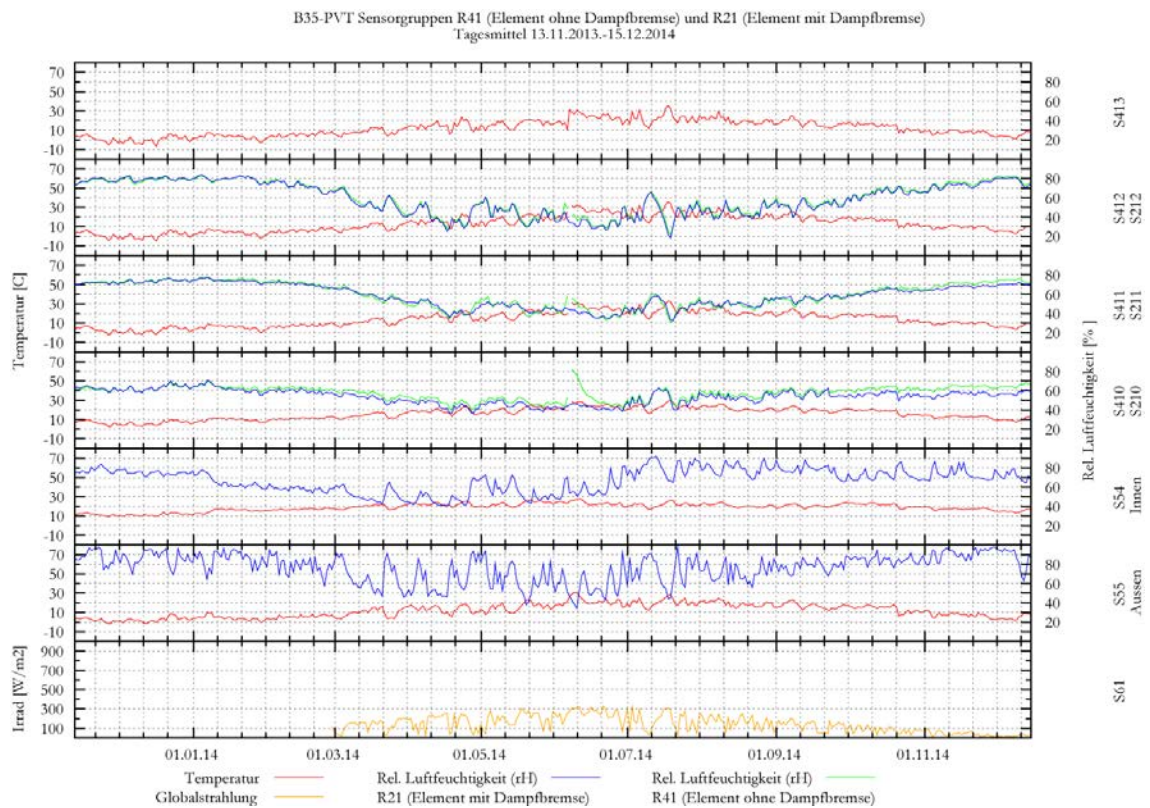


Abb. 19 Einfluss der Dampfbremse. Vergleich zwischen den beiden Elementen, außenliegende Sensorgruppen R41 (Element ohne Dampfbremse grün) und R21 (mit Dampfbremse blau).

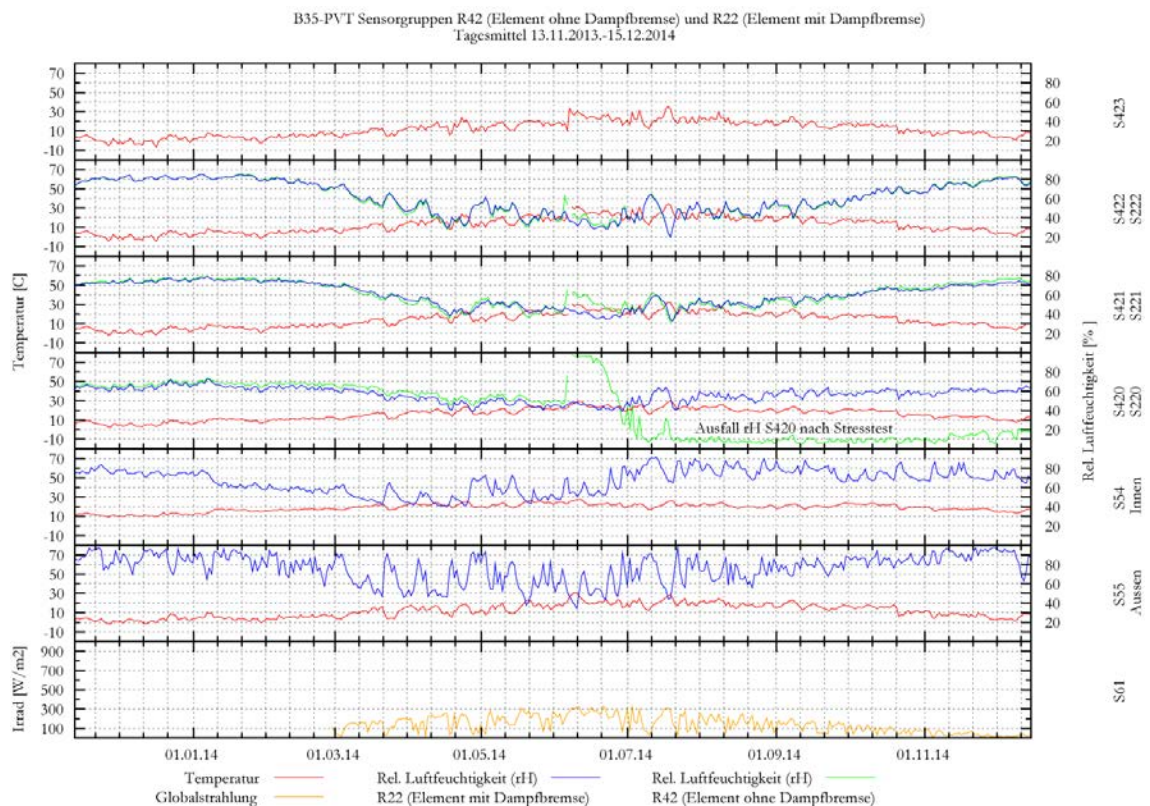


Abb. 20 Einfluss der Dampfbremse. Vergleich zwischen den beiden Elementen, innenliegende Sensorgruppen R42 (Element ohne Dampfbremse grün) und R22 (mit Dampfbremse blau).

Stresstest

In den bisherigen Untersuchungen konnte festgestellt werden, dass die während der Tauperiode akkumulierte Feuchtigkeit unter den gegebenen Rahmenbedingungen im Frühling relativ schnell wieder aus der Konstruktion entweichen kann. Aufgrund dieser positiven Ergebnisse sollte ein Stresstest an einem Teil der Anlage aufzeigen, ob und wie schnell die Konstruktion unter schlechteren Bedingungen austrocknet. Für das Experiment wurde die obere Hälfte des Dachelements ohne Dampfbremse freigelegt und die Überdämmung künstlich befeuchtet. Das Ziel bestand darin, die Dämmschichten oberhalb der Unterkonstruktion bis annähernd an ihre Fasersättigung zu durchnässen. Die dazu notwendige Wassermenge wurde mithilfe der Sorptionsisotherme von Pavatex Isolair ermittelt. Bei 50% relativer Luftfeuchtigkeit beträgt die Materialfeuchte ca. 9%. Die Differenz zum maximal adsorbierten Wasser in der Dämmung ergibt 2.2L/m^2 . Die Gesamtmenge von 12.3L Wasser für die betrachtete Fläche sollte sich möglichst gleichmäßig im Material verteilen. Weil die Adsorption jedoch sehr langsam stattfindet und das Wasser auf der hydrophoben Oberfläche der Platten abfließt, wurden die Aussparungen auf der Oberseite mehrmals mit Eiswürfeln gefüllt und während des Schmelzvorgangs mit einer Plastikfolie abgedeckt). Trotz dieser Maßnahme konnte nicht verhindert werden, dass das Schmelzwasser teilweise auch in die untere Hälfte des Dachelements floss. Dies zeigt sich anhand der Feuchteaufzeichnungen der Sensorgruppen R41 und R42. Aus diesem Grund wurde die initial berechnete Wassermenge erhöht bis die Sensoren in der untersten Dämmlage eine relative Luftfeuchtigkeit von ca. 90-95% erreichten. Nach insgesamt drei Tagen ist das Wasser bis in die untersten Dämmlagen vorgedrungen und die PV Module wurden wieder installiert.

Die Auswirkungen des eingegebenen Wassers sind auf den Verlaufsaufzeichnungen ersichtlich. Aufgrund des durchfließenden Wassers kam es bei einigen Sensoren intermittierend zu Funktionsverlusten. Drei Sensoren (S312, S322, S420) liefern seither keine plausiblen Daten mehr. Die verbleibenden Messpunkte liefern aber genügend Anhaltspunkte für die Analyse. Während die oberste Dämmplatte sehr rasch wieder austrocknete liegt die gemessene relative Luftfeuchtigkeit in der untersten Dämmschicht in der oberen Elementhälfte während 20 Tagen und in der nicht durch den Test beeinflussten unteren Elementhälfte während 13 Tagen über den Referenzwerten des anderen Dachelementes.

Der durchgeführte Test kann dahingehend interpretiert werden, dass die Konstruktion auch unter schlechteren Randbedingungen ein genügend hohes Austrocknungspotential aufweist. Selbst wenn die Austrocknungsphase später einsetzt als in der betrachteten Periode entweicht die Feuchtigkeit. Dieser Aspekt ist wichtig, weil die Deckschicht im Vergleich zu einer nicht aktiven Dachkonstruktion im Sommer wegen der Kühlung durch die Absorber tiefere Temperaturen aufweist.



Abb. 21 Stresstest künstliche Bewässerung. Ein Viertel der Anlage wurde frei gelegt und die maximal sorbierbare Wassermenge in Form von Eiswürfeln eingegeben. Auf dem Bild erkennbar ist die Abdeckung der freigelegten Absorber, damit das geschmolzene Wasser nicht verdunstet, sondern von den Dämmplatten langsam aufgenommen werden kann.

3.2.2 Thermische Leistungsermittlung

Neben der konstruktiven und bauphysikalischen Machbarkeit ist die energetische Performance der aktiven Komponenten die dritte Grösse, welche an den erstellten Prototypen PT2 und PT3 untersucht wird. Während PT3 auf dem Prüfstand der Hochschule Rapperswil unter Standardtestbedingungen getestet wurde und die Resultate deswegen besser mit anderen PVT Kollektoren verglichen werden können, handelt es sich bei PT2 um eine Aufzeichnung der gemessenen Werte und eine darauf basierende Leistungsberechnung unter den spezifischen Rahmenbedingungen der Anlage. Letztere gibt sowohl den Durchfluss als auch die Vorlauftemperatur vor. Zudem läuft die Pumpe des Solarkreislaufs ab einer solaren Einstrahlung von 400W/m^2 .

Abb. 22 zeigt die Auswertung der Messungen im Monat Mai 2014. Dargestellt sind die wesentlichen Temperaturen in der Anlage, das Umgebungsklima, die solare Einstrahlung sowie in den obersten beiden Zeilen der berechnete thermische Wirkungsgrad und die thermische Leistung. Neben dem Wind, der mit der installierten Wetterstation nicht registriert wird, haben die solare Einstrahlung und die Temperaturdifferenz zwischen dem Kollektor (mittlere Fluidtemperatur, kurz t_m) und der Umgebungstemperatur (T_a) den größten Einfluss auf die thermische Leistung. Je kleiner diese Differenz ist, desto kleiner ist der Verlust durch die Abstrahlung des Kollektors.

Aufgrund der sehr stark oszillierenden solaren Einstrahlung und der im Gegensatz dazu trägen Wärmeleitung innerhalb der aktiven Schichten basieren die Plots auf den Stundenmittelwerten. Die Berechnung der thermischen Leistung der Anlage ist pro m^2 aktive PVT Fläche ausgewiesen.

Generell weisen die Messresultate darauf hin, dass die Anlage relativ gut in den bestehenden Solarkreislauf eingebunden ist. Dies zeigt sich an den für die Regeneration der Erdwärmesonde nahezu idealen Temperaturen zwischen Vor- und Rücklauf und der daraus resultierenden Temperaturdifferenz $t_m - T_a$.

Der Kollektor wird durchgehend sehr nahe an der Außenlufttemperatur betrieben (Zeile 7). Die Fluidtemperatur liegt selten mehr als 5K über, zeitweilig sogar unterhalb von T_a . Der Kollektor befindet sich nahe einem thermischen Gleichgewicht mit der unmittelbaren Umgebung. Ist T_a grösser als t_m absorbiert der Kollektor zusätzlich zur Solarstrahlung noch Wärme aus der Umgebung. Kann der Kollektor derart betrieben werden, liegt der thermische Wirkungsgrad beim Maximum im Vergleich zur Wirkungsgradkennlinie welche unter Standardbedingungen ermittelt wurde. Dieser Aspekt ist interessant für den Vergleich mit Hochtemperatursystemen, da die entsprechenden Kollektoren immer oberhalb der Außenlufttemperatur betrieben werden müssen und dies ohne aufwändige Isolation zu hohen Verlusten führt.

Tab. 3 PT2, Leistungsmessungen. Legende und Bemerkungen zu Abb. 22.

Zeile	Abkürzung	Bezeichnung	Bemerkungen
1	n therm	Thermischer Wirkungsgrad	
2	P therm	Thermische Leistung pro m^2	
3	Vdot	Volumenstrom	
4	VL, RL	Temperaturen Vorlauf und Rücklauf	Die Messpunkte befinden sich ausserhalb der Anlage, die Leitungen sind nicht isoliert.
5	dT RL	Temperaturdifferenz zwischen VL und RL	VL/RL über Plattenwärmetauscher mit Erdwärmesonde verbunden (Regeneration EWS)
6	t_m , T_a	t_m : mittlere Fluidtemperatur im Kollektor T_a : Temperatur Wetterstation	
7	$t_m - T_a$	Temperaturdifferenz zwischen Fluid und Umgebung	Grundlage für die Einordnung des thermischen Wirkungsgrades auf der Kollektorkennlinie (x-Achse).
8	T_a , rH	Temperatur und relative Luftfeuchtigkeit Wetterstation	
9	Irrad	Globalstrahlung auf PV Module	

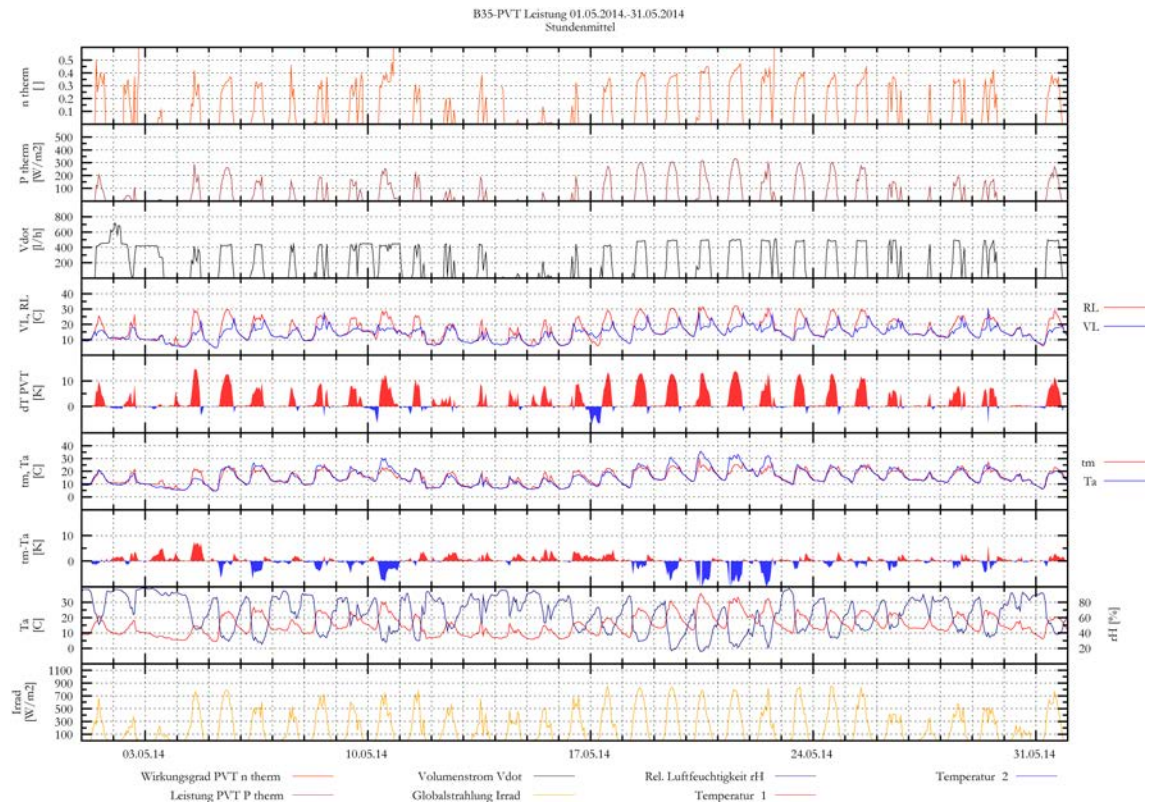


Abb. 22 Leistungsmessungen unter realen Bedingungen. Thermischer Wirkungsgrad, Leistungsverlauf und Umgebungsparameter der Pilotanlage PT2 auf dem Gebäude B35 in Zürich in Betrieb im Mai 2014. Bemerkung: Die Versuchsanlage ist zusammen mit der bereits installierten (modulbasierten) PVT Anlage über einen Plattenwärmetauscher mit der Erdwärmesonde verbunden. Das bedeutet, dass V_L , R_L und t_m stark von den Temperaturen und dem Betrieb der EWS abhängig sind.

4. PT3: Energetische Performance unter Standardtestbedingungen STC

4.1 Vorgehen / Methode

PT3 diente als Demonstrationsobjekt anlässlich der Pressekonferenz am 4. November 2013. Das Dachelement wurde wie PT2 vollständig in der Werkhalle vorfabriziert und schließlich vor *laufenden Kameras* vor dem Architekturgebäude der ETH Zürich installiert. Danach wurde PT3 zur Ermittlung der thermischen und elektrischen Leistung unter Standardtestbedingungen an die Hochschule Rapperswil transportiert. Diese Tests stellen den Kern dieses Abschnitts dar. Sie bilden die Grundlage für den Vergleich der energetischen Performance der Konstruktion mit konventionellen PVT Kollektoren.



Abb. 23 Präsentation des Prototypen PT3 anlässlich der Pressekonferenz am 4. November 2013 auf dem Campus Hönggerberg der ETH Zürich. Rechts unten ein orangefarbenes PV Modul welches zu Demonstrationszwecken ausgetauscht wurde. Das Element zeigt einen Dachausschnitt mit Randdetail beim Ortgang und Fassadenanschluss (links).

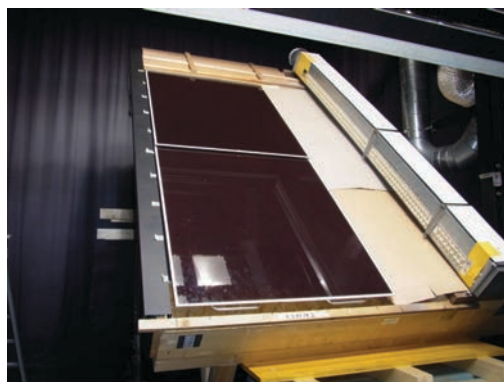
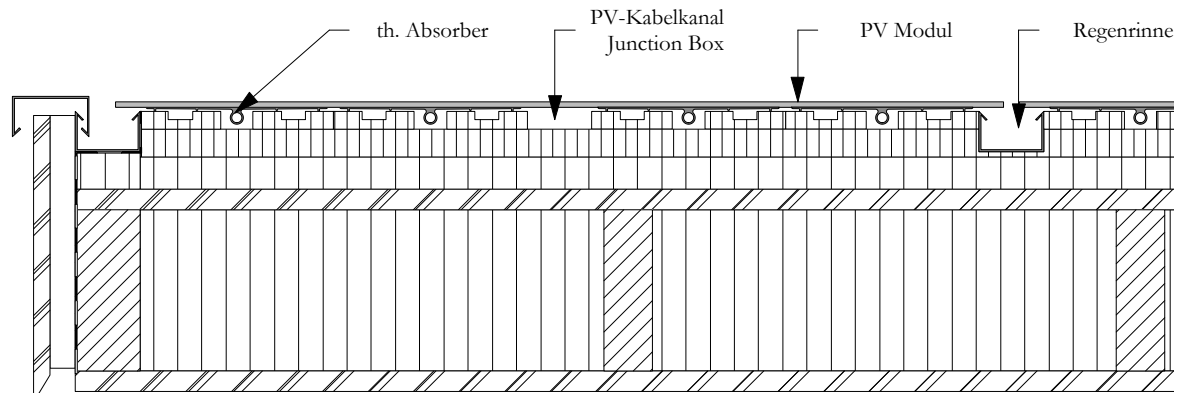


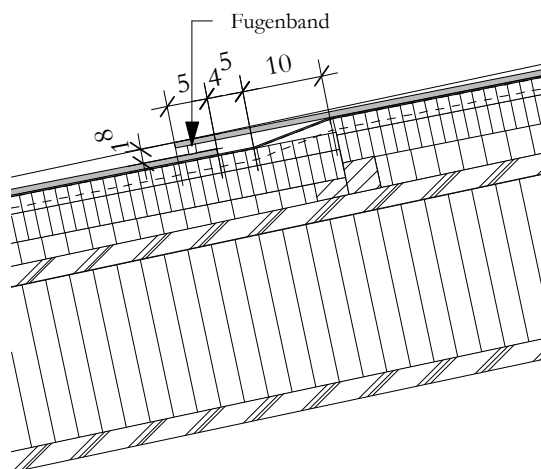
Abb. 24 Leistungsmessungen unter Standardtestbedingungen STC. Installation auf dem Prüfstand des Instituts für Solarenergie an der Hochschule Rapperswil. Sämtliche Tests beziehen sich jeweils auf die Fläche von zwei PV Modulen (2.794m²). Die 4 thermischen Absorber sind in einer Serie geschaltet.

4.1.1 Konstruktiver Aufbau

Der konstruktive Aufbau entspricht weitestgehend demjenigen von PT2. Die Anlage besteht aus einem Element mit vier PV Modulen und stellt einen Ausschnitt aus einem Dachelement im Randbereich dar. Aus diesem Grund wurde an einer Seite ein Ortgang mit einem Attikablech in der Ebene der PV Module ausgebildet (Abb. 23). Die Anlage unterscheidet sich im Vergleich zu PT2 durch die dickere Unterkonstruktion. Das Element wurde für eine Spannweite von 5m dimensioniert. Der resultierende 20cm dicke Holzrahmen ist mit Weichfaserplatten vollständig ausgedämmt. Damit erreicht die Konstruktion einen u-Wert von 0.14W/m²K. Die zweite Veränderung liegt in der Reduktion der Überdämmung um eine Dämmplatte, was eine schnellere Montage ermöglicht. Die aktiven Schichten sind identisch aufgebaut, aufgrund der reduzierten Elementlänge ist die Länge der Absorber kürzer.



Detail Ortgang
Querschnitt AA 1/10

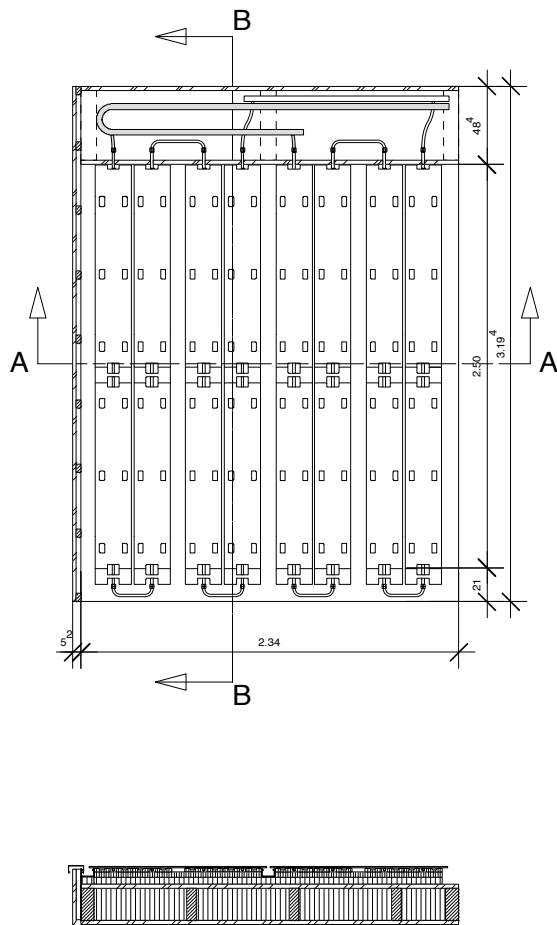


Detail PV Überlappung
Längsschnitt BB 1/10

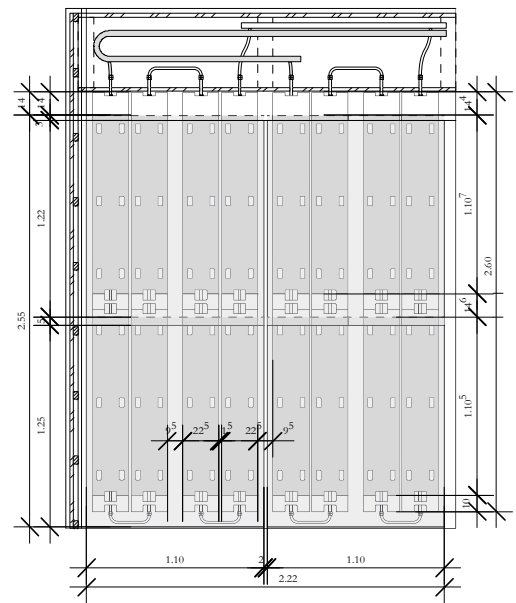
Aufbau von oben nach unten:

Photovoltaik Micromorph Si, SolarFilms TW-TF-120-1
 Aluminiumprofil (thermischer Absorber)
 Isolair b=100mm, h=22mm, Nut gefräst
 Isolair h=35mm
 Ausgleichsschicht Latten C24 22/40; 31/40; 40/40mm
 Ausgleichsschicht Pavaflex h=22-40mm
 OSB-3 25mm
 Pavaflex h=200mm
 Konstruktionsholz DUO nsi C24 80/200; 60/200mm
 OSB-3 25mm

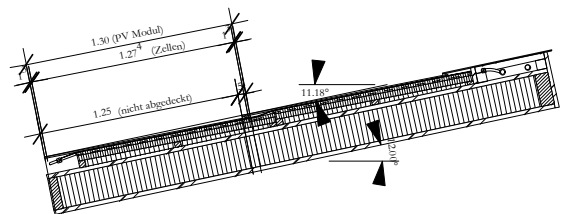
Abb. 25 PT3, Detailschnitte Konstruktiver Aufbau.



Querschnitt AA 1/50

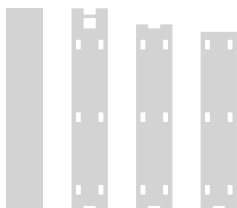


Längsschnitt BB 1/50



Kontaktfläche zwischen PV
und thermischem Absorber 1/50

Modul 0.28 0.26 0.245 aktiv 0.24m²



Flächen:

PV

1 Modul:
Breite: 1.10m
Länge: 1.30m
Fläche: 1.43m²
unabgedeckt: 1.37m²

4 Module:
Gesamt: 5.72m²
Überlappung: 0.22m²
unabgedeckt: 5.50m²

Kontakt th: 3.84m²

Absorber (fertiges Profil)

1 Modul:
Material: 1.04m²
aktiv: 0.96m²

16 Module:
Material: 4.16m²
Kontakt PV: 3.84m²

Dach (ohne Rand)

Breite: 2.24m
Länge: 2.55m
Fläche: 5.71m²

Material/m² Dach:
Absorber/m²: 0.78m²
PV/m²: 1.01m²

Packing Factor: 70%

Abb. 26 PT3, Pläne und Schnitte. Ermittlung der aktiven Kontaktflächen zwischen den PV Modulen und den thermischen Absorbern. Der resultierende Abdeckungsfaktor (Packing Factor) über die gesamte aktive Fläche beträgt 70%.

4.1.2 Messkonzept und Aufbau: Leistungsmessungen unter Standardtestbedingungen STC

Die Motivation, Leistungstests unter Standardtestbedingungen durchzuführen liegt in der besseren Vergleichbarkeit der Resultate. Im Rahmen der Untersuchungen an PT3 standen folgende Fragen im Vordergrund:

- Wie hoch ist der thermische Wirkungsgrad im Vergleich zu modulbasierten PVT Kollektoren?
- Welche Auswirkungen haben die durchgehende Absorberanordnung und die vertikale Überlappung der PV Module?
- Ermöglicht die gewählte Befestigungsart mit den Federklammern einen homogenen und genügend hohen Kontakt zur Wärmeübertragung?
- Welchen Einfluss hat die Verwendung von unterschiedlichen PV Modulen auf den thermischen Wirkungsgrad?

Dazu ist die Anlage in insgesamt 9 unterschiedlichen Konfigurationen getestet worden. Tab. 4 zeigt die Variationen zwischen den einzelnen Messungen. Die verwendeten PV Module sind beides Dünnschichtmodule der Firma TianWei Solarfilms. Bei den schwarzen Modulen handelt es sich um mikromorphe Siliziummodule ($\mu\text{m-Si}$) mit einer Peakleistung von 120W/Modul. Die orangefarbenen, amorphen Siliziummodule (a-Si) wurden im Rahmen des Projekts Archinsolar entwickelt.[7] Aufgrund der Farbe und dem zusätzlichen Deckglas mit strukturierter Antireflexoberfläche sind sie prädestiniert für den Einsatz in gestalterisch sensiblen Umgebungen, dafür ist die maximale elektrische Leistung von 68.5W/Modul markant tiefer.

Die Referenzkollektoren für den Vergleich haben allesamt monokristalline PV Module mit einer entsprechend höheren elektrischen Leistung von bis zu $240W_{\text{peak}}$ im Falle des Kollektors von 3S PV (C1423). Der Vergleich mit den modulbasierten Kollektoren kann sich demnach nur auf den thermischen Wirkungsgrad ohne elektrische Last beziehen.

Bei den Referenzmessungen X172 und X172II handelt es sich um den PVT Kollektor, der ebenfalls am Lehrstuhl für Gebäudetechnik der ETH Zürich entwickelt wurde. Die thermischen Absorber sind aus denselben Aluminiumprofilen aufgebaut wie bei der hybriden Dachkonstruktion. Jeweils vier Elemente in der Länge des PV Moduls sind fest auf dessen Rückseite angebracht und in Serie geschaltet. Die Profile decken 79% der PV Modul ab. Dieses Verhältnis, bezeichnet als Packing Factor, hat große Auswirkungen auf die Wärmeübertragung vom PV Modul auf den Absorber. Zudem treten bei den nicht gekühlten Stellen im PV Modul im Betrieb sehr hohe Temperaturen auf. Dies führt zu erhöhten Belastungen für das Glas und konsekutiver Leistungsreduktion der PV Zellen.[8] Kollektor X172II ist im Unterschied zu X172 auf der Rückseite gedämmt um den thermischen Wirkungsgrad zu steigern. Beim Kollektor C1423 besteht der thermische Absorber aus einem durchgehenden Aluminiumblech mit einer mäandrierenden Kühlschleife. Der Absorber ist durch ein Vakuum am PV Modul befestigt und der Packing Factor liegt bei 88%. Diese Optimierungen führen zu einer markant höheren und homogenen Wärmeübertragung. C1423 entspricht weitestgehend der Konstruktion der heute erhältlichen PVT Kollektoren der Firma MeyerBurger AG.

Neben der Art der PV Module haben die Durchflussmenge und die Kühlung durch Wind den größten Einfluss auf den thermischen Wirkungsgrad. Aus dieser Parameterauswahl entsteht schließlich die Vielzahl der Testanordnungen. Der Frage des Kontaktes zwischen den Absorbern und dem Glas ist ein spezieller Versuch gewidmet (X285-4).

Tab. 4 PT3, Leistungsmessungen unter STC. Übersicht der durchgeführten Tests an PT3 (PVT Hybriddach) und Referenztests an modulbasierten PVT Kollektoren. Sämtliche Messungen inklusive den Referenztests wurden auf dem Prüfstand des SPF an der Fachhochschule Rapperswil durchgeführt.

Nr.	PV Modul		Durchfluss		Elektr. Last			Bemerkungen
	schwarz	orange	100L/h	200L/h	Ohne	Mit	Nur	
Messreihe PVT Hybriddach								
X285-2	µm-Si			x	x			Ohne Wärmeleitpaste
X285-3	µm-Si		x		x			Ohne Wärmeleitpaste
X285-4	µm-Si		x		x			Mit Wärmeleitpaste
X286-1	µm-Si			x		x		Ohne Wärmeleitpaste
X286-2	µm-Si		x			x		Ohne Wärmeleitpaste
X287-1	µm-Si						x	Ohne Wärmeleitpaste
X288-1		a-Si	x		x			Ohne Wärmeleitpaste
X289-1		a-Si	x			x		Ohne Wärmeleitpaste
X290-1		a-Si					x	Ohne Wärmeleitpaste
Referenzmessungen PVT Module								
X172	mc-Si		x		x	x		ETH Prototyp, ungedämmt
X172II	mc-Si		x		x			ETH Prototyp, gedämmt
C1423	mc-Si		120		x	x		3S Prototyp Vakuum

4.2 Ergebnisse / Erkenntnisse

4.2.1 Resultate der Leistungsmessungen

Abb. 27 stellt die Resultate der durchgeführten Messungen für den maximal ermittelten thermischen Wirkungsgrad bei einer Temperaturdifferenz von 0K zwischen der Mitteltemperatur des Fluid (t_m) und der Umgebungstemperatur (T_a) jeweils mit und ohne Wind zusammen.

Darauf ist klar ersichtlich, dass die thermische Performance der Dachkonstruktion unterhalb der Referenzmessungen liegt. Der höchste gemessene Wert von 0.46 wird bei einem Durchfluss von 200 Liter pro Stunde und ohne elektrische Last (MPP) erreicht (X285-2). Bei gleichzeitiger elektrischer Last reduziert sich der thermische Wirkungsgrad von 0.46 auf 0.43 (X286-1), was einer Reduktion von ca. 6.5% entspricht. Die an diesem Betriebspunkt gemessene elektrische Leistung ist 63.7W/m^2 . Damit liegt der energetische Gesamtwirkungsgrad mit elektrischer Last sowohl quantitativ als auch qualitativ höher (Abb. 28) als ohne elektrische Last. Allerdings ist die gemessene elektrische Leistung beinahe 25% tiefer als die deklarierte Peakleistung.¹ Die Ursache liegt einerseits sicherlich an der Verschattung aufgrund der Überlappung der PV Module und andererseits möglicherweise am Testaufbau. Dieser Frage wurde vorerst nicht weiter nachgegangen.

Bei den orangefarbenen a-Si Modulen (X289-1) wurde ein gleich hoher thermischer Wirkungsgrad gemessen wie bei den schwarzen µm-Si Modulen (X286-2). Allerdings weisen die orangefarbenen Module aufgrund der Farbe und dem zusätzlichen Deckglas einen fast halb so hohen elektrischen Wirkungsgrad auf was zu einem tieferen Gesamtenergieertrag und vor allem zu einem tieferen exergetischen Wirkungsgrad führt.

Im Vergleich zu den Referenzmessungen ist die Auswirkung der elektrischen Last weniger ausschlaggebend da die beiden verwendeten Dünnschichtmodule einen tieferen Wirkungsgrad haben und deshalb einen verhältnismäßig kleineren Anteil der solaren Einstrahlung in Elektrizität umwandeln

¹ Die nominale Peakleistung ist 120W/Modul , umgerechnet auf 1m^2 sollte die Leistung 83W betragen.

als die effizienteren monokristallinen Module. Demzufolge müsste ein Vergleich der gesamtenergetischen Leistung zwischen den modulbasierten PVT Kollektoren und der hybriden Dachkonstruktion mit denselben PV Modulen durchgeführt werden.

In Bezug auf die eingangs gestellte Frage nach der Auswirkung der durchgehenden Absorberanordnung kann mithilfe des Vergleichs zwischen den Referenzkollektoren X172 und X172II und der Messung X285-2 gemacht werden. Ohne elektrische Last ist der thermische Wirkungsgrad von X285-2 ohne Wind 20.7% und mit Wind 21.7% tiefer als bei 172II. Der Unterschied zum nicht rückseitig gedämmten Kollektor X172 beträgt 15% ohne und 14.3% mit Wind. Aus diesen beiden Vergleichen wird ersichtlich, dass die Holzfaserplatten der Dachkonstruktion die Absorber isolieren (Vergleich mit dem nicht gedämmten Kollektor), der Effekt aber weniger stark ist als beim gedämmten Kollektor. Der Grund dafür ist, dass X172II rückseitig vollständig mit Mineralwolle gedämmt ist, während die Dämmung bei der Dachkonstruktion erstens nicht vollflächig ist und zweitens Hohlräume zwischen den Absorberprofilen und den verwendeten steifen Dämmplatten bestehen.

Weil die Befestigung der PV Module bei beiden Varianten mit ähnlichen Klammern auf den gleichen Absorberprofilen ausgeführt ist, muss davon ausgegangen werden, dass die tiefere Effizienz der integrierten Variante primär auf die kleinere Kontaktfläche zwischen den Absorbern und den PV Modulen zurück zu führen ist. Damit bestätigt sich die Vermutung, dass die Überlappung der PV Module zwar konstruktiv und gestalterisch interessant ist, andererseits aber zu einem thermischen Minderertrag führt.

Zusätzlich zu den gemessenen maximalen Wirkungsgraden bei Standardtestbedingungen der unterschiedlichen Anordnungen sind in Tab. 5 die Einflüsse der wechselnden Umgebungsbedingungen exemplarisch anhand der Messungen am Kollektor X281-1 aufgeführt. Angegeben ist jeweils die thermische Leistung pro m² Kollektorfläche in Abhängigkeit der Windstärke, der solaren Einstrahlung und der Temperaturdifferenz $t_m - T_a$.

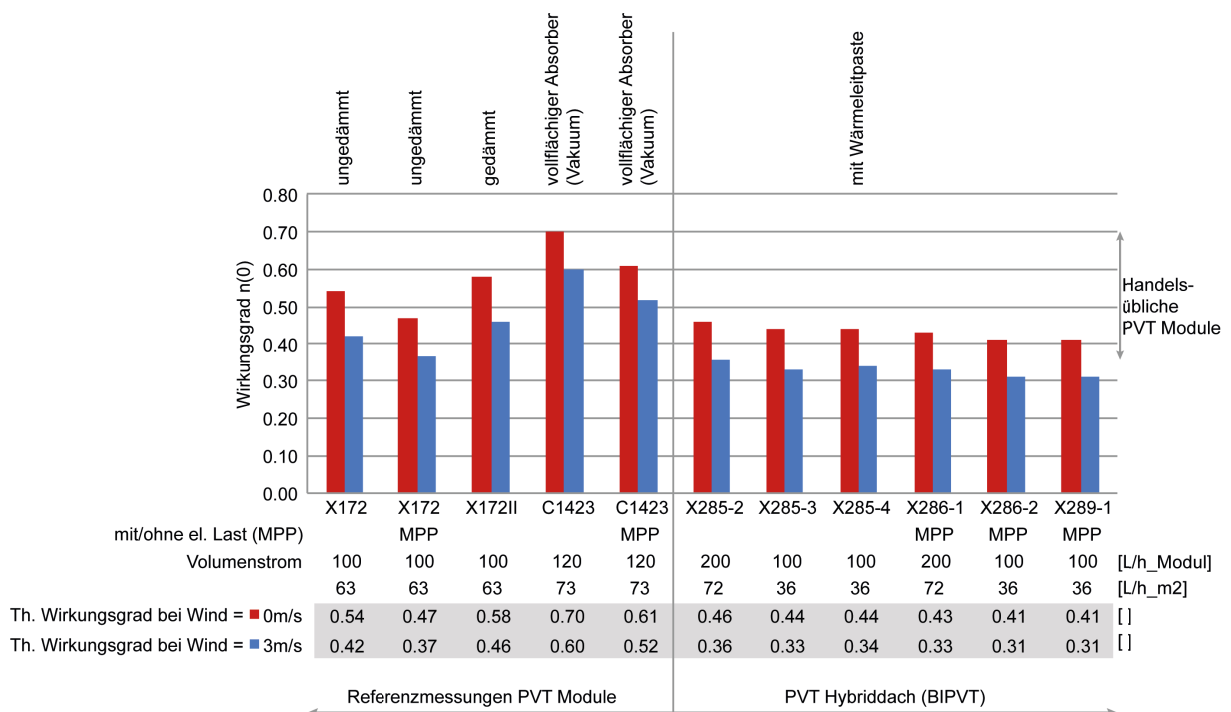


Abb. 27 PT3, Leistungsmessungen unter STC. Messresultate thermischer Wirkungsgrad bei $\Delta T=0$, jeweils ohne/mit Wind und Gegenüberstellung mit modulbasierten Kollektoren (X172, X172II, C1423). Die Referenztests wurden ebenfalls vom SPF durchgeführt. MPP: Test mit elektrischer Last. Darunter sind die Durchflussmengen pro Kollektor respektive pro m² Kollektorfläche angegeben.

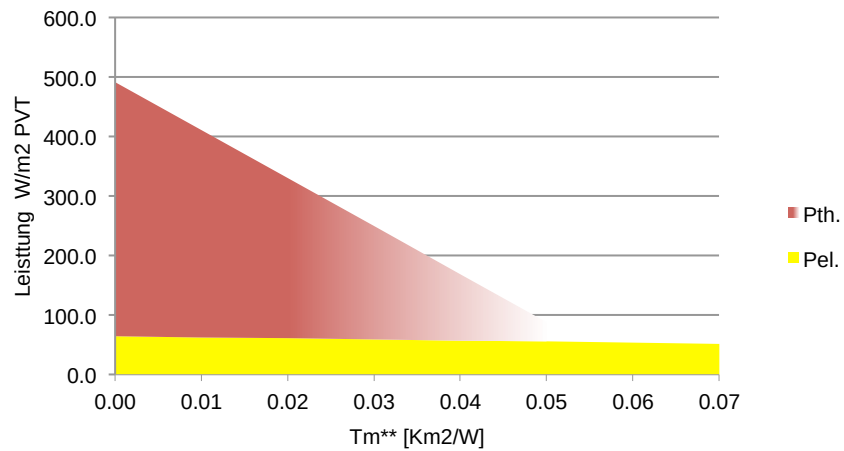


Abb. 28 PT3, Kollektorkennlinie. Test X286-1: Thermische und elektrische Leistung bei 1000 W/m^2 Einstrahlung, Wind 0 m/sec , Umgebungstemperatur 25°C , AM 1,5.

Tab. 5 PT3, Thermische Leistung. Test X286-1: Thermische Leistung pro m^2 Kollektorfläche in Abhängigkeit der Temperaturdifferenz zwischen der Mitteltemperatur des Fluid (t_m) und der Umgebungstemperatur (T_a) sowie in Abhängigkeit von der Einstrahlung auf den Kollektor (G'') und der Windstärke.

Wind (m/s)		0	3	0	3	0	3	0	3	0	3	0	3
ΔT	G''	1000 W/m^2		900 W/m^2		800 W/m^2		700 W/m^2		600 W/m^2		500 W/m^2	
$t_m - T_a = 0\text{K}$		427	335	384	301	341	268	299	234	256	201	214	168
$t_m - T_a = 10\text{K}$		347	233	305	200	262	166	219	133	176	99	134	66
$t_m - T_a = 20\text{K}$		267	131	225	98	182	64	139	31	97	--	54	--
$t_m - T_a = 30\text{K}$		188	30	145	--	102	--	59	--	17	--	--	--
$t_m - T_a = 40\text{K}$		108	--	65	--	23	--	--	--	--	--	--	--
$t_m - T_a = 50\text{K}$		28	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

Untersuchung zum Kontakt zwischen den PV Modulen und den thermischen Absorberprofilen

Für die Wärmeauskopplung ist ein möglichst guter und homogener Kontakt zwischen den aktiven Schichten erstrebenswert da die Übertragung bei niedrigen Temperaturen primär durch die Wärmeleitung geschieht. Bei der Konzeption und mehr noch bei der Herstellung der Dachelemente wurde vermutet, dass dieser Kontakt unregelmäßig sein könnte. Zweitens wurde bei der Montage festgestellt, dass die Aluminiumprofile im Querschnitt leichte Beugungen aufweisen, die wahrscheinlich bei der nachträglichen Bearbeitung entstanden sind.

Für die Klärung dieser Frage wurden während den Tests mehrmals Infrarotaufnahmen der Module gemacht. Die Temperaturverteilung der Deckschicht gibt Hinweise auf den Kühleffekt und damit auf den Kontakt. Abb. 29 zeigt eine solche Aufnahme während dem Testdurchlauf X285-2 ohne Wind. Deutlich sichtbar sind die nicht von den thermischen Absorbern gekühlten Bereiche der PV Module im Bereich der Überlappung sowie zwischen dem zweiten und dritten Profil in der Mitte, wo die Kanäle aufgrund der elektrischen Anschlüsse weiter auseinander liegen. Die maximale Temperaturdifferenz beträgt 34,5K. Im Bereich der abgedeckten Fläche sind die Unterschiede viel kleiner (ca. 15K). Ob diese Unterschiede auf das Temperaturprofil im Absorber selber oder auf den Kontakt zurück zu führen sind kann mit dieser Methode nicht abschließend beurteilt werden.

Ein zusätzlicher Versuch sollte deshalb aufzeigen, ob sich der Kontakt durch das Aufbringen von Wärmeleitpaste verbessern lässt (X285-4). Wie auf Abb. 30 ersichtlich ist, wurde die Kontaktfläche zwischen dem Aluminium und dem Glas zur Eliminierung etwaiger Zwischenräume vollständig mit Wärmeleitpaste versehen.

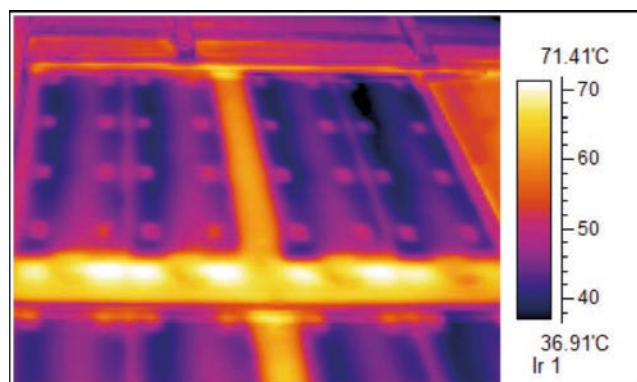


Abb. 29 PT3, Prüfung der Wärmeleitung. Infrarotaufnahme des Dachmoduls während dem Leistungstest X285-2. Testbedingungen: Vorlauftemperatur: 21°C, Rücklauftemperatur: 28,5°C, Fluidmitteltemperatur: 24,8°C, Einstrahlung: 880W/m². Die ausgewiesenen Temperaturen sind nach Angaben der Mitarbeiter des SPF mit einer gewissen Vorsicht zu betrachten. Die Bilder dienen der qualitativen Beurteilung. Das bedeutet, dass die absoluten Temperaturen nicht unbedingt stimmen, die Verteilung hingegen schon.

Die Gegenüberstellung der ermittelten thermischen Wirkungsgradkennlinie mit derjenigen aus dem Test X285-3, welcher unter exakt den gleichen Rahmenbedingungen durchgeführt wurde, zeigt auf, dass die Wärmeleitpaste keinen Einfluss hat. Die Klammern sorgen damit für einen ausreichend guten Kontakt. Diese Erkenntnis ist für die Weiterentwicklung des Konzeptes wichtig. Die Befestigung mit den Klammern ist einfach und ermöglicht eine schnelle Montage sowie die spätere Auswechslung der Module. Auf der Grundlage dieses Versuches kann zumindest mit Bezug auf den Kontakt am Befestigungskonzept festgehalten werden.

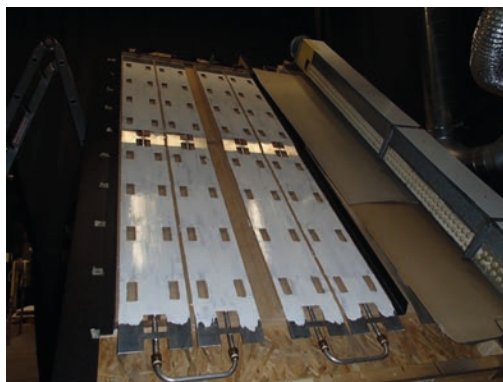


Abb. 30 PT3, Test zur Erhöhung der Wärmeleitung. Absorberprofile mit Wärmeleitpaste in der Testanordnung X285-4.

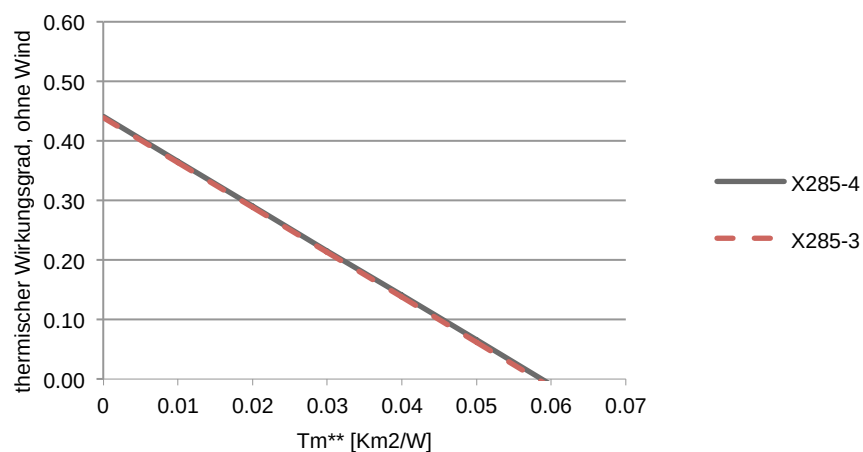


Abb. 31 PT3, Test zur Erhöhung der Wärmeleitung. Vergleich der Messungen mit (X285-4) und ohne (X285-3) Wärmeleitpaste zur Überprüfung des Kontaktes zwischen den PV Modulen und den Absorberprofilen. Die Messresultate zeigen, dass die Wärmeleitpaste keinen signifikanten Einfluss auf die thermische Leistung hat. Demzufolge ist davon auszugehen, dass die Federklammern einen genügend hohen und homogenen Kontakt zwischen den Absorberprofilen und den PV Modulen herstellen.

5. Würdigung der Ergebnisse / Erkenntnisse / Diskussion

Im Rahmen dieses Projektes konnte das Konzept des vofabrizierten Dachmoduls mit integrierten PVT Kollektoren erstmalig in Form von 2 Prototypen umgesetzt werden. Die Testinstallation auf dem Mehrfamilienhaus B35 in Zürich liefert wertvolle Erkenntnisse über das hygrothermische Verhalten der Konstruktion unter realen Umgebungsbedingungen. Dabei stellte sich heraus, dass die bauphysikalisch als kritisch betrachtete direkte Montage der aktiven Schichten (thermische Absorber und PV Module) auf der Dachdämmung unter den gegebenen Rahmenbedingungen nicht problematisch ist. Die aufgezeichneten Messwerte erreichten im ersten Winter teilweise die als kritisch erachteten Feuchtigkeitswerte von mehr als 80% relativer Luftfeuchtigkeit. Die genauere Analyse der Werte zeigt jedoch, dass diese hohen Feuchtigkeitswerte nur bei relativ tiefen Temperaturen vorgekommen sind. Damit war das Risiko der Schimmelpilzbildung als Indikator für das Vorkommen anderer holzerstörenden Mikroorganismen zu keinem Zeitpunkt gegeben. Zusätzliche, visuelle Kontrollen bescheinigten die Unversehrtheit der Konstruktion.

Der Verlauf der Messwerte über die gesamte Betrachtungsperiode bestätigt die Hypothese, wonach die, während der Tauperiode akkumulierte Feuchte von der Holzfaserdämmung aufgenommen und in der Trocknungsphase wieder an die Umgebung abgegeben werden kann. Nach einem Jahr befinden sich die Feuchtwerte in den verschiedenen Dämmlagen im Bereich der Ausgangsfeuchte der Konstruktion. Zusätzlich wurde ein Teil der Konstruktion einem Stresstest unterzogen. Dabei handelte es sich um eine „Simulation“ eines Wassereintruchs, bei welchem die Holzfaserdämmung in kurzer Zeit sehr viel Feuchte aufnimmt. Der Test führte zu einem Ausfall der Messanlage (was bedeutet, dass das Wasser bis in die unteren Sensorlagen vorgedrungen ist). Gleichzeitig zeigt der Test aber auch, dass selbst ein Wassereintruch dieser Grössenordnung nicht zu einem dauerhaften Schaden führen würde.

Zur abschliessenden Beurteilung der bauphysikalischen Risiken wird die Messanlage für ein bis zwei Jahre weiter betrieben. Damit kann schliesslich untersucht werden, ob sich der Feuchtegehalt über mehrere Jahre verändert und sich ein Trend einstellt, der nach einem Jahr nicht ersichtlich ist.

Neben der Feuchteentwicklung innerhalb der Konstruktion sollten die Messungen ebenfalls eine Aussage zur energetischen Performance der Konstruktion liefern. Hydraulisch wurde die Anlage an die bestehende PVT Anlage auf dem Dach angeschlossen und mit einem separaten Volumenstromzähler und Temperaturfühlern ausgerüstet. Dabei konnte der thermische Wirkungsgrad mittels nachträglicher Umrechnung ermittelt werden. Er erreichte während der beobachteten Periode im Mai 2014 Höchstwerte oberhalb 0.4.

Weil die Anlage auf dem Mehrfamilienhaus B35 jedoch nicht separat gesteuert werden kann und die Leistung damit keine Vergleichbarkeit ermöglicht, wurde eine zweite Testanlage auf dem Prüfstand des SPF in Rapperswil unter Standardtestbedingungen aufgebaut. Die durchgeführten Tests attestieren der Konstruktion einen im Vergleich zu kommerziell erhältlichen PVT Kollektoren ca. 14 - 25% tieferen thermischen Wirkungsgrad. Der elektrische Wirkungsgrad entspricht nahezu der Leistung der PV Module (welche frei gewählt werden kann). Die Optimierung der Hydraulik und des Absorberdesigns waren nicht Gegenstand der Untersuchungen in diesem Projekt. Der vergleichsweise tiefere Wirkungsgrad wird jedoch in den bereits anvisierten Folgeprojekten Gegenstand weiterführender Untersuchungen sein (siehe Kapitel 6.).

Die tiefere Leistung pro Quadratmeter Kollektorfläche wird relativiert, wenn erstens die Kosten für die installierte Fläche sowie zweitens, die insgesamt viel höhere Fläche, welche die Konstruktion aktiviert, in Betracht gezogen werden. Dem Konzept folgend, besteht das Dach abgesehen von ein paar Fugen, den Dachrändern und Dachfenstern zu 100% aus thermisch aktiven Flächen. An hierfür sinnvollen Flächen, decken PV Module die thermischen Absorber ab. An Stellen, wo der tiefe Stromertrag den Einsatz von PV nicht rechtfertigt, besteht die Dachdeckung aus anderen witterungsbeständigen Materialien. Massgebend bei der Entwicklung der Dachkonstruktion war und ist deshalb nicht alleinig die energetische Performance der aktiven Schichten sondern zusätzlich die Robustheit, Einfachheit und Flexibilität der Gesamtkonstruktion in der Anwendung.

6. Schlussfolgerungen, Ausblick, nächste Schritte nach Projektabschluss

Die durchgeführten Versuche im Massstab 1:1 belegen, dass die anvisierten Ziele grösstenteils erreicht worden sind. Insgesamt ist die Konstruktion sehr simpel im Aufbau und kann somit im Prinzip von jedem Zimmereibetrieb umgesetzt werden. Ist ein Deckungselement defekt, wird es wie ein Ziegel ausgetauscht und der hydraulische Kreislauf bleibt intakt.

Weiterer Entwicklungsbedarf besteht einerseits bei der bereits erwähnten Verbesserung der Hydraulik und der Absorber zur Erhöhung des thermischen Wirkungsgrades. Andererseits hat die Herstellung der beiden Prototypen aufgezeigt, dass der Planungs-, Herstellungs- und Installationsablauf eine grosse Herausforderung an alle beteiligten Gewerke darstellt. Die Problematik der gewerkeübergreifenden Planung ist erkannt und wird als zentraler Punkt im Folgeprojekt bearbeitet. Dafür wurde Anfang Januar ein KTI Projekt zwischen der Hochschule Rapperswil und den Firmen ERNE Holzbau AG und BS2 AG als Umsetzungspartner eingegeben.

Im April 2015 wird das erste reale Bauprojekt mit 280m² hybriden Dachelementen in Freiburg abgeschlossen. Der Entscheid für die integrale Dachkonstruktion und gegen eine konventionelle Dachkonstruktion mit aufgesetzten PVT Kollektoren wurde durch die in diesem Bericht durchgeführten Experimente ermöglicht. Gegenüber dem Konzept wurde das Dach jedoch aus Kostengründen nur partiell im Werk vorfabriziert. Deshalb liegt der zweite Fokus beim Folgeprojekt im Bereich der konstruktiven und organisatorischen Kostenoptimierung.

7. Referenzen

1. Ullmann, L., R. Furter, and A.T. De Neef, *Schlussbericht P&D Projekt ZeroEmission-LowEx Mehrfamilienhaus B35 Zürich*, 2014, Bern.
2. Leibundgut, H., N. Haller, and N. Abt, *ZE-2Sol*, 2013, Zürich.
3. Bättschmann, M. and H. Leibundgut, *LowEx Solar Building Systems: Integration of PV/T collectors into low exergy building systems*, in *Solar Heating and Cooling SHC*, 2012, San Francisco.
4. Ballif, C., *Archinsolar: Unique and Innovative Solution of Thin Silicon Films Modules Building Integration*, 2012, Villigen.
5. Künzel, H.M., *Feuchteschutz unbelüfteter Steildächer - Vereinbarkeit von DIN 68800-2 und des Neuentwurfs der DIN 4108-3 aus bauphysikalischer Sicht*, in *Holzbautag DGfH*, 2000, Friedrichshafen.
6. Hukka, A. and H.A. Viitanen, *A mathematical model of mould growth on wooden material*. Wood Science and Technology, 1999. 33(6): p. 475-485.
7. Ballif, C., *Archinsolar: Unique and Innovative Solution of Thin Silicon Films Modules Building Integration*, 2014, Villigen.
8. Charalambous, P.G., et al., *Photovoltaic thermal (PV/T) collectors: A review*. Applied Thermal Engineering, 2007. 27(2-3): p. 275-286.