



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und
Kommunikation UVEK

Bundesamt für Energie BFE
Sektion Cleantech

Schlussbericht vom 18.12.2015

Photovoltaik im Verbund mit Dämmstoff Foamglas



Datum: 18.12.2015

Ort: Bern

Subventionsgeberin:

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

Subventionsempfänger:

Pittsburgh Corning (Schweiz) AG
Schöngrund 26
CH-6343 Rotkreuz
www.foamglas.com

Autoren:

Eric Langenskiöld, Basler & Hofman AG, eric.langenskiold@baslerhofmann.ch
Michael Stoll, Basler & Hofman AG, michael.stoll@baslerhofmann.ch

BFE-Programmleitung: Yasmine Calisesi, yasmine.calisesi@bfe.admin.ch
BFE-Projektbegleitung: Stefan Nowak, stefan.nowak@netenergy.ch
BFE-Vertragsnummer: SI/500582-01

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

Bundesamt für Energie BFE

Mühlestrasse 4, CH-3063 Ittigen; Postadresse: CH-3003 Bern
Tel. +41 58 462 56 11 · Fax +41 58 463 25 00 · contact@bfe.admin.ch · www.bfe.admin.ch



Photovoltaik im Verbund mit Dämmstoff Foamglas

Schlussbericht

Autor und Koautoren	Eric Langenskiöld, Michael Stoll
Beauftragte Institution	Pittsburgh Corning (Schweiz) AG,
Adresse	Schöngrund 26, 6343 Rotkreuz
Telefon, E-Mail, Internetadresse	+41 44 387 13 86, eric.langenskiold@baslerhofmann.ch
BFE Projekt-/Vertrag-Nummer	SI/500582 / TP Nr.: 8100146-02
BFE-Projektleiter	Stefan Nowak
Dauer des Projekts (von – bis)	Dezember 2010 - Dezember 2015
Datum	18. Dezember 2015

Zusammenfassung

Fast gänzlich unbekannt sind Systeme, bei welchen Photovoltaik die Funktion der Wärmedämmung übernimmt. Im Rahmen dieses Projekts wurde diese Funktion untersucht. Eine Demonstrationsanlage wurde mit einem eigens dafür entwickelten Produkt aus PV und Foamglas gebaut. Das Projekt "Photovoltaik im Verbund mit Dämmstoff Foamglas" wurde im Dezember 2010 gestartet. Es entstanden mehrere Konzepte und mehrere Tests wurden durchgeführt. Der Einsatz von PV-Elementen mit Isolationsfunktion in der Fassade wies das grösste Potential aus und wurde als Pilotanlage in Beromünster realisiert.

Fazit: Werden Skaleneffekte bei der Herstellung und Optimierungen beim Verbauen umgesetzt, so hat das Konzept bezüglich Kosten und Qualität Vorteile gegenüber herkömmlich vorgehängten PV-Fassaden. Auch vorteilhaft sind die dünnen Aussenwände, da die Hinterlegung wegfällt. Dies führt zu einer höheren Nutzfläche im Gebäude. Es wurde zudem nachgewiesen, dass bei microamorphen Siliziumzellen keine Ertragseinbussen durch die rückseitige Dämmung der Module entstehen. Herkömmliche PV-Fassadensysteme sind jedoch bei Montage auf unebenen Wänden und beim Auswechseln eines Modules im Servicefall überlegen.

Abstract

Systems in which photovoltaic is not only used for electric energy production but also fulfils the function of thermal insulation are little known. These functions were examined within this project by combining thin film photovoltaic and Foamglas insulation in a demonstration project in a facade. Conclusion: If scale effects in production and process optimisation on construction site are implemented, the concept has cost and quality advantages in comparison to conventional photovoltaic facade systems. Furthermore, the exterior walls can be built leaner. This results in more space inside the building. Moreover, tests show that no yield loss results in micro morph silicon cells due to the higher temperatures. However, conventional photovoltaic facade systems are superior in case of mounting on uneven walls and in case of module replacement in service.

Inhaltsverzeichnis

1. Ausgangslage	4
2. Projektziele	4
3. Vorgehensweise / Methodik	6
3.1 Marktpreisanalyse	6
3.2 Tests und Prüfungen	6
3.3 Umsetzung	6
3.4 Projektpakte	6
4. Festlegung der Anwendung.....	7
4.1 Marktpreise.....	7
4.2 Fokussierung auf Applikationen.....	9
4.3 Priorität 1: Fassade Integriert (verklebt)	9
4.4 Priorität 2: Andere Anwendungen.....	9
4.4.1 Fassade abgesetzt (vorgehängt)	10
4.4.2 Flachdach integriert	10
4.4.3 Hybridkollektoren mit Foamglas.....	10
5. Lösungen für integrierte Fassade (Priorität 1)	10
5.1 Einsatz von amorphen Zellen.....	10
5.2 Verbindung PV-Modul und Foamglas	11
5.3 Klebeversuche	11
5.3.1 Glas-Glas Modul.....	12
5.3.2 Glas-Tedlar Modul.....	13
5.3.3 Hybridmodul	13
5.4 Kabelführung.....	14
5.5 Abdichtung Fugen	14
5.6 Befestigung Foamglasmodul an Wand.....	15
6. Konzepte für weitere Anwendungen	17
6.1 Fassade abgesetzt (vorgehängt)	17
6.2 Flachdach abgesetzt.....	19
6.3 Flachdach integriert (Wintergarten)	19

6.3.1 Hybridkollektoren mit Foamglas.....	20
7. Mechanische Tests.....	21
8. Feldtest Aufbau und Leistungsmessung	23
8.1 Testanlage.....	23
8.2 Modultemperatur	24
8.3 Performance Ratio	25
8.4 Performance bei Standard Test Konditionen (STC)	25
9. Pilotanlage.....	26
9.1 Anlagendaten.....	27
9.2 Produktion der PV-Foamglasmodule	27
9.3 Montage auf der Baustelle	28
9.4 Stringverkabelung (Anlagenverkabelung)	29
10. Diskussion und Fazit	29
10.1 Beurteilung der fertigen Pilotanlage	29
10.2 Beurteilung des Prozesses.....	30
10.3 Beurteilung Kostenstruktur	31
10.4 Leistungsbeurteilung	33
10.5 Schadensfall	34
10.6 SUPSI Feldversuch	34
10.7 Verbesserungsvorschläge	35

1. Ausgangslage

Ende 2010 lancierte das BFE ein Pilot- und Demonstrationsprojekt, in welchem Anforderungen und Konzepte für die Verbindung von Photovoltaikmodulen mit dem Dämmstoff Foamglas erarbeitet worden sind. Für diese Aufgabe wurden drei Partner ausgewählt; die Pittsburgh Corning (Schweiz) AG als Hersteller von Foamglas, die Basler & Hofmann AG als Spezialist für Photovoltaik und das schweizerische Prüfzentrum für Photovoltaik ISAAC-DACD-SUPSI, welches seine Kompetenzen im Bereich Modul- und Systemtest in das Projekt einfließen liess.

2. Projektziele

Das Ziel dieses Projektes war mindestens ein Produkt aus PV und Foamglas konzeptionell zu prüfen. Folgende Ziele wurden dabei avisiert:

- **Verbund PV-Foamglas**

PV-Module oder Zellen sollen dauerhaft (min. 25 Jahre) stabil mit Foamglas verbunden werden können. Aus einer Reihe von Lösungsvorschlägen sollen die besten Optionen getestet werden. Parallel dazu werden Versuche und Testverfahren unternommen, insbesondere zu den Möglichkeiten der Verklebung von ungerahmten PV-Modulen (PV-Lamine). Die Kabelführung soll dabei derart geschehen, dass einerseits die Funktion des Dämmstoffes und andererseits die Möglichkeit zur Wartung der PV-Anlage bestehen bleiben.

Hauptziel ist, eine Lösung aufzuzeigen, welche von Beginn weg im Markt bestehen kann. Neben den technischen Funktionen sollen auch architektonische Aspekte wie Formgebung, Farbe, Randabschlüsse etc. berücksichtigt werden.

Des Weiteren sollen die Umweltverträglichkeit sowie die Möglichkeit zur Rezyklierung geprüft werden.

- **Ertrags- und Unterhaltsprognosen**

Die Auswirkungen der Kombination PV und Foamglas in Bezug auf Betrieb und Unterhalt sollen aufgezeigt werden. Folgende Fragen gilt es dabei zu beantworten:

- Wie stark verändert sich der Energieertrag der PV-Module bei einseitiger Wärmedämmung der Module?
- Welches sind die zulässigen thermischen und mechanischen Lastgrenzen?
- Wie gestaltet sich der Unterhalt, namentlich das Austauschen einzelner Module, Kabel oder Stecker von Solarmodulen, die im Verbund mit Foamglas eingesetzt werden?

- **Potenzieller Markt / Einsatzbereich**

In einer Marktbetrachtung soll festgestellt werden, wo mit der Kombination PV- Foamglas Vorteile für den Anlagebesitzer zu tragen kommen, resp. in welchen Einsatzgebieten bisherige Systeme nicht erfolgreich eingesetzt werden konnten. Die Gebäude- und Anlageplaner sollen auf die Möglichkeit der Doppelnutzung des Dämmmaterials als Dämmstoff und Unterkonstruktion für PV-Module aufmerksam gemacht werden.

- **Mögliche Synergien aufzeigen**

Die Kombination eines Dämmstoffes mit Photovoltaik wirkt auf den ersten Blick paradox: Wird doch bei der Gebäudeintegration von kristallinen PV-Modulen meist darauf geachtet, diese möglichst gut zu hinterlüften. Im Verbund mit einem Dämmstoff kann diese Hinterlüftung gänzlich verloren gehen. Hingegen ist zu beachten, dass eine Vielzahl von integrierten PV-Anlagen an eine gedämmte Gebäudehülle gebaut ist. Und genau da soll dieses Projekt ansetzen. Synergien sollen aufgezeigt und genutzt werden.

Welche Synergien ergeben sich aus der Kombination von PV und Foamglas? Wie lassen sich Kosten derart einsparen, dass zwei hochwertige Produkte im Verbund Vorteile gegenüber herkömmlichen Systemen aufweisen?

- **Wirtschaftlichkeit**

Durch die gefundenen Synergien sollen Kosten eingespart werden können. Mit einer Kostenanalyse soll das Einsparpotenzial aufgezeigt werden.

3. Vorgehensweise / Methodik

Als erstes wurden diverse technische Konzepte skizziert, welche dann mit unterschiedlichen Prioritäten versehen wurden. Es wurde jenes Konzept mit dem höchsten Potential in einem Feldversuch gemessen und als eine Pilotanlage gebaut.

3.1 Marktpreisanalyse

Um die Wirtschaftlichkeit eines PV-Dämmstoffverbundes abzuschätzen, wurde eine Marktpreiserhebung von unterschiedlichen Dämmungen und PV-Montagesystemen durchgeführt.

3.2 Tests und Prüfungen

Zur Überprüfung der Umsetzbarkeit des PV-Dämmstoffverbundes wurden verschiedene Tests mit unterschiedlichen PV-Modulen durch SUPSI durchgeführt. So wurden Klima- und Zugversuche durchgeführt und verschiedene Klebstoffe überprüft.

Weiter wurden in einem Langzeitfeldversuch der Aufbau, die Montage und der Temperatureinfluss auf den Stromertrag überprüft.

3.3 Umsetzung

Ausgehend von den Erfahrungen des Feldversuches wurde eine Pilotanlage gebaut.

3.4 Projektpakte

Das Projekt wurde in folgende Pakete aufgeteilt:

Tabelle 1: Projektpakete (Quelle: Basler & Hofmann AG).

	2011				2012				2013			
	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4
<i>Anforderungen definieren</i>	x											
<i>Verbindung PV-Foamglas</i>												
- Anforderungen		x										
- Konzept - Variantenentscheid		x										
- Konstruktion			x									
- Labortest			x									
- Feldtest				x								
<i>Kabelführung u. Steckverbindung</i>												
- Anforderungen			x									
- Konzept - Variantenentscheid			x									
- Konstruktion				x								
- Labortest					x							
- Feldtest						x						
<i>Eigenschaften (Wirkungsgrad.....)</i>												
- Anforderungen				x								
- Konstruktion				x								

- Labortest				x								
- Feldtest					x							
<i>Befestigung der Elemente</i>												
- Anforderungen					x							
- Konzept - Variantenentscheid					x							
- Konstruktion						x						
- Labortest						x						
- Feldtest							x					
<i>Demo Anlagenbau</i>												
- Anforderungen						x						
- Variantenentscheid						x						
- Konstruktion / Bau							x	x	x			
- Langzeittest										x	x	
<i>Wirtschaftlichkeit und Einsatzgebiet</i>												
- Betrachtung Markt												x

4. Festlegung der Anwendung

4.1 Marktpreise

In Tabelle 2 sind die erhobenen Marktpreise für die komplette Gebäudehülle inkl. PV-Unterkonstruktion, Material und Arbeit erhoben. Die Bezugsgrösse für die Preise ist eine Fassade mit der Fläche von 200 m². Folgende Funktionen wurden in der Preisbetrachtung abgebildet:

- Dämmung, Dampfsperre
- Dichtung
- Witterungsschutz
- PV-Befestigungssystem ohne PV-Module

Die Preise stellen für die Entwicklung von Lösungskonzepten die Zielgrösse dar, welche unterschritten werden muss, damit das Produkt auf dem Markt lebensfähig ist (Targetpricing).

Es wurden Deutsche Preise erhoben. Für Schweizer Preise müsste mit einem Aufschlag von ca. 20% gerechnet werden.

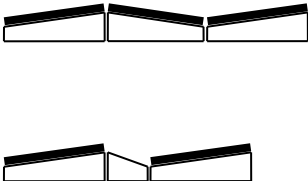
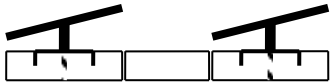
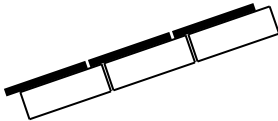
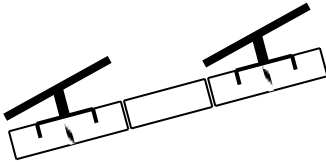
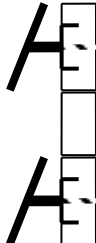
Tabelle 2: Übersicht Abschätzung Marktpreise für Isolation, Witterungsschutz und PV-Montagesystem, 2011.

Marktpreis Neubau	Starke Dämmung	Mittlere Dämmung	Leichte Dämmung
Fassade	U: 0.15 126.00 EUR/m ²	U: 0.24 115.00 EUR/m ²	U: 0.35 110.00 EUR/m ²
Flachdach Beton	U: 0.15 156.00 EUR/m ²	U: 0.20 141.00 EUR/m ²	U: 0.30 125.00 EUR/m ²
Flachdach Leichtbau (Trapez, Holz)	U: 0.15 154.00 EUR/m ²	U: 0.20 139.00 EUR/m ²	U: 0.30 123.00 EUR/m ²
Schrägdach Unten Holz, oben Ziegel	U: 0.15 127.00 EUR/m ²	U: 0.20 120.00 EUR/m ²	U: 0.30 112.00 EUR/m ²
Schrägdach unten Beton, oben Falzblech	U: 0.15 156.00 EUR/m ²	U: 0.20 139.00 EUR/m ²	U: 0.30 139.00 EUR/m ²
Schrägdach unten Trapez- schale, oben Falzblech	U: 0.15 101.00 EUR/m ²	U: 0.20 94.00 EUR/m ²	U: 0.30 86.00 EUR/m ²
Schrägdach Sandwich	U: 0.15 70.00 EUR/m ²	U: 0.20 64.00 EUR/m ²	U: 0.30 60.00 EUR/m ²

4.2 Fokussierung auf Applikationen

Aufgrund der Marktpreissituation wurden die Potentiale für eine PV Lösung mit Foamglas auf folgende Felder fokussiert:

Tabelle 3: Fokus der Anwendungen aufgrund der Marktpreise.

	Integriert (verklebt)	Integriert / geformt (verklebt)	abgesetzt
Flachdach			 Priorität 2
Schrägdach			
Fassade	 Priorität 1		 Priorität 2

4.3 Priorität 1: Fassade Integriert (verklebt)

Fassadenelemente, welche Solarstrom produzieren und gleichzeitig dämmen sind neuartig. Der Aufbau von PV-Modulen mit Foamglasdämmung in einem Bauteil kann trotz dem teureren Dämmstoff Foamglas preislich vorteilhaft sein, da auf die Vorhängekonstruktion verzichtet werden kann. Diesem Konzept wurde das grösste Potential anerkannt.

4.4 Priorität 2: Andere Anwendungen

Ebenfalls behandelt, jedoch nicht vertieft, wurden folgende Konzepte:

4.4.1 Fassade abgesetzt (vorgehängt)

Als Alternative zur verklebten PV-Fassade wurde ein Konzept für eine vorgehängte Fassade erarbeitet.

4.4.2 Flachdach integriert

Das erarbeitete Konzept mit dem Übernamen "Wintergarten" hat sich nach der Evaluation von unzähligen Varianten für Flachdächer durchgesetzt. Die meisten Lösungen mussten aufgrund der hohen Kosten für die Abdichtung oder der hohen Materialkosten für Foamglas aufgegeben werden.

4.4.3 Hybridkollektoren mit Foamglas

Ein neues Konzept wurde entdeckt, welche mehrere photovoltaisch-thermische (PVT) Hybridmodule und Foamglas isolation in grösseren vorgefertigten Bauteilen kombiniert. Das Potential der Rationalisierung der verschiedenen Gewerke auf dem Bau hätte ähnliche Dimensionen wie die Einführung der Sandwichpaneele bei Leichtbauhallen. Bei Sandwichpaneelen werden Tragkraft, Dachhaut und Isolation als 6 x 1 Meter Bauteilen sehr rasch und in einem Arbeitsschritt auf der Baustelle verbaut und führen zu massiven Kostenreduktionen.

5. Lösungen für integrierte Fassade (Priorität 1)

In der Anwendung des integrierten PV-Foamglasverbundes in der Fassade wurde das grösste Potential gesehen. In diesem Kapitel wird auf die einzelnen Teillösungen eingegangen.

5.1 Einsatz von amorphen Zellen

Ein Resultat des Deskresearches erbrachte folgende Resultate: Der direkte Verbund von Photovoltaikmodulen und Foamglas verschlechtert die Wärmeableitung im Vergleich zu hinterlüfteten Installationen. Die resultierenden hohen Temperaturen führen bei den meisten Solarzellen zu einem Leistungsverlust, der je nach Zellentyp zwischen 2% und 8% liegt. Bei den amorphen Zellen kann dieser Verlust durch das Annealing teilweise oder ganz kompensiert werden. Beachtet werden sollte, dass die Solarzellen meistens nur bis 85°C getestet werden und deshalb keine Garantie auf fehlerfreie Funktion bei höheren Temperaturen geben.

Daraus abgeleitet wird für die integrierte Fassade auf amorphe Zellen gesetzt.

5.2 Verbindung PV-Modul und Foamglas

Standard PV-Module werden mit dem Dämmstoff Foamglas in der Werkstatt verklebt. Die Elemente aus PV-Foamglas haben dadurch die Grösse von Standardmodulen, welche typischerweise 1,6 m x 1,0 m oder 1,3 m x 1,1 m messen.



Bild 1: PV-Modul mit Foamglas (Quelle Basler & Hofmann AG).

5.3 Klebeversuche

Erste Klebeversuche mit Foamglas wurden in Zusammenarbeit mit der Firma Henkel durchgeführt.

Es wurden diverse Klebetests durchgeführt, um die Haftung zum Foamglas zu prüfen sowie verschiedene Optionen für die diskutierten Anwendungen zu haben. Es hat sich dabei herausgestellt, dass sowohl elastische Produkte auf Basis SMP (Terostat MS-Produkte) als auch harte bzw. hart-elastische Produkte auf Basis Polyurethan (Macroplast UK bzw. CR) eine gute Haftung zum Foamglas aufbauen können.

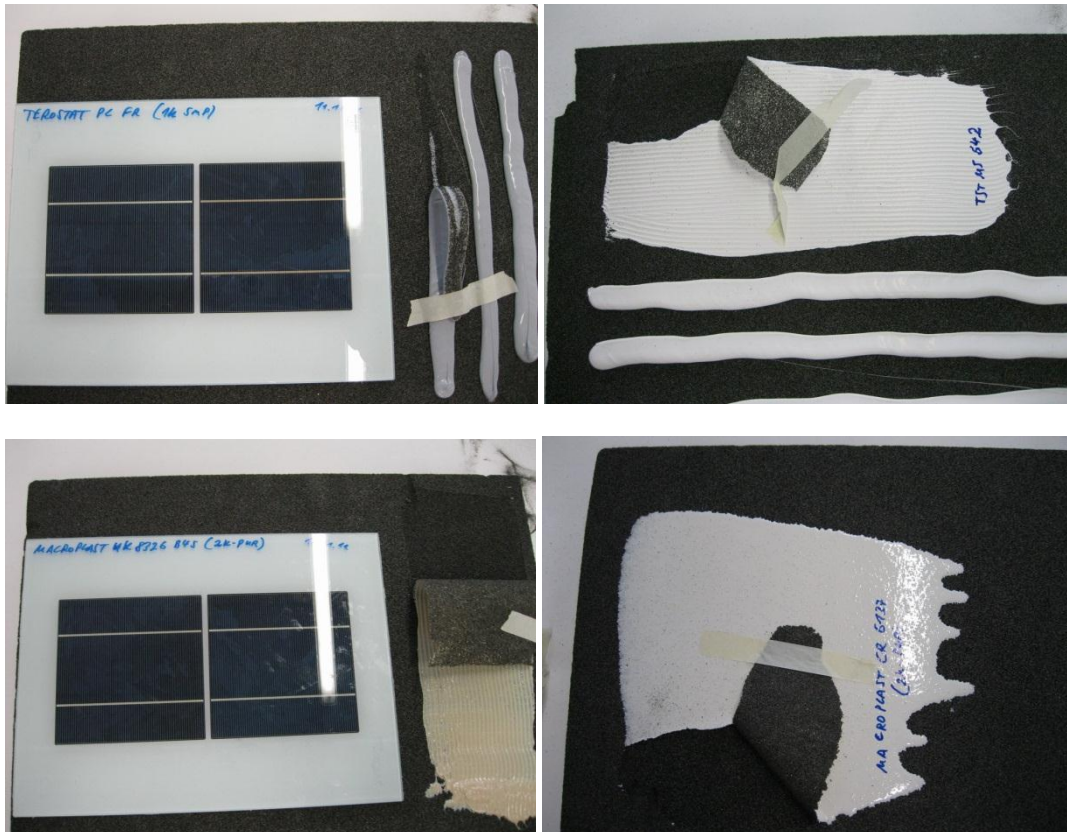


Bild 2 Versuche mit verschiedenen Klebern (Quelle: Henkel AG).

Die Klebeverbindung wurde mit 3 Modultypen durchgeführt:

Glas-Glas Modul

- 1,3 x 1,1 m
- Typ a-Si Dünnschichtmodul
- Hersteller Pramac (Oerlikon Solar)

Glas-Tedlar Modul

- 1,6 x 1,0 m
- Typ monokristallin, gerahmt Black Design, 4 mm Glas und Tedlar
- Hersteller 3S

Hybrid Modul

- 1,6 x 1,0 m
- Typ Hybridkollektor (Prototyp aus PV-Modul mit rückseitigem Alu-Flachprofil für den Wasserdurchfluss)
- Hersteller 3S

5.3.1 Glas-Glas Modul

Der Kleber Terostat MS 642 1 resp. Zweikomponentenkleber von Henkel wurde für die Glas-Foamglas Verbindung verwendet. Für das 1,3 m x 1,1 m grosse Modul von Pramac (Oerlikon Solar) wurden 1,8

Liter (2,7 kg) Klebstoff verwendet. Diese Menge könnte in einem industriellen Klebprozess noch deutlich reduziert werden.

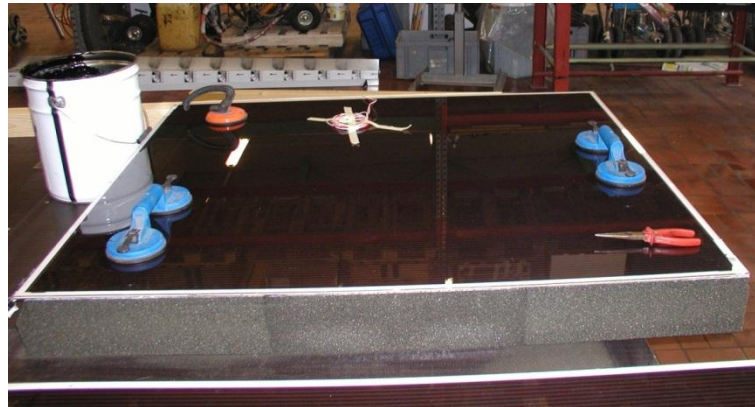


Bild 3 Glas-Glas Modul mit Foamglas verklebt (Quelle: Pittsburgh Corning (Schweiz) AG).

5.3.2 Glas-Tedlar Modul

Der Kleber Terostat MS 642 Ein- resp. Zweikomponenten von Henkel wurde für die Tedlar-Foamglas Verbindung verwendet. Für das 1,6 m x 1,0 m grosse Modul von 3 S wurden 2,2 Liter (3,3 kg) verwendet.



Bild 4 Gerahmtes Modul mit Tedlarrückseite in Vorbereitung für die Verklebung mit Foamglas (Quelle: Pittsburgh Corning (Schweiz) AG).

5.3.3 Hybridmodul

Der Kleber Terostat MS 930 von Henkel wurde für die Aluminium-Foamglas Verbindung verwendet. Für das 1,6 m x 1,0 m grosse Modul von 3 S wurden 1.8 Liter (2.7 kg) verwendet.



Bild 5 links: Hybridmodul der Firma 3S, rechts: Fomaglas mit Aussparungen für die Verklebung (Quelle: Pittsburgh Corning (Schweiz) AG).

5.4 Kabelführung

Da zurzeit mit Standardmodulen gearbeitet wird, ist eine Schlaufung der Kabel, welche von der Anschlussbox abgehen, notwendig. Als Alternative dazu können die Kabel abgelängt und gerade geführt werden. Wichtig ist, dass keine Hohlräume zwischen Modul und Dämmung entstehen. Deshalb sollten die Kabelvertiefungen genau so tief sein wie die Kabeldurchmesser. Ein vollautomatisches Fräsen der Kabelaussparung und der Aussparung der Anschlussbox ist gut denkbar. Bei grossen Serien würden die Kabel und Anschlussbox komplett in den Rand gelegt, so wie es bei semitransparenten Fassade-modulen heute bereits gemacht wird.



Bild 6 Kabelführung links: Vorbereitung einer Schablone für die Aussparungen, rechts: eigefräste Aussparungen (Quelle: Basler & Hofmann AG).

5.5 Abdichtung Fugen

Die Dichtung der horizontalen und vertikalen Stösse erfolgt durch in den Seiten des Foamglas aus-gefrästen Fugen. Diese werden zuerst mit zellig geschlossenem PE Schaum halb gefüllt und dann mit einkomponentigem Kleber versiegelt. Auch können Kabel in der Fuge geführt werden.

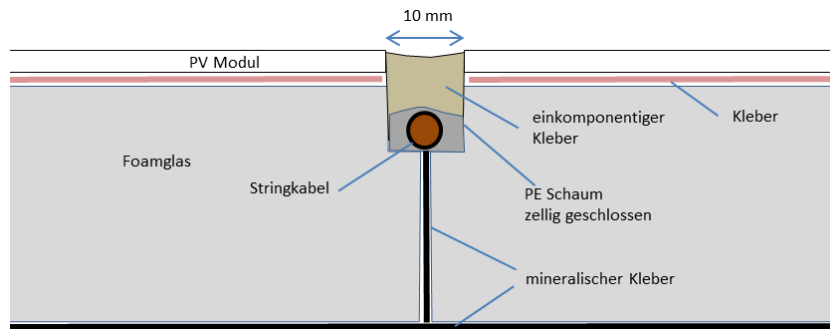


Bild 7 Schematische Darstellung der Fugen (Quelle: Basler & Hofmann AG).

Beim Auswechseln eines Modules wird die Fuge zerstört und das Modul kann mit seiner Dämmung ausgebaut werden. Nach entfernen der Dämmreste kann ein neues Element eingeklebt werden und die Fugen können wieder verschlossen werden.

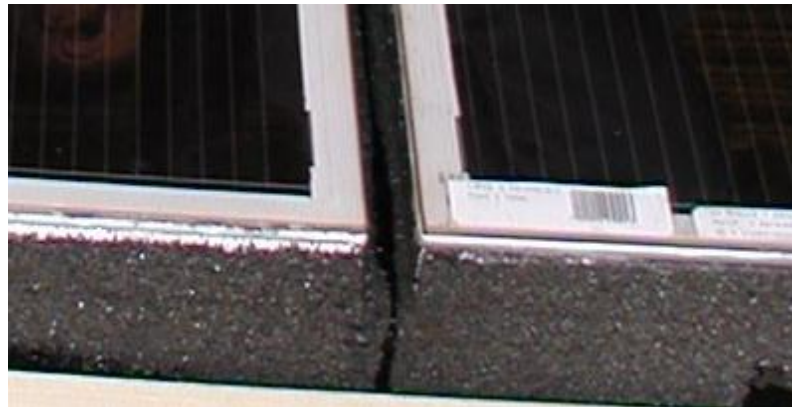


Bild 8 Bild der vorbereiteten PV-Foamglas Elemente vor der Fugendichtung (Quelle: Pittsburgh Corning (Schweiz) AG).

5.6 Befestigung Foamglasmodul an Wand

Um die PV-Foamglaselemente an der Wand zu befestigen, wird das Standardverfahren für Foamglasdämmung eingesetzt. Neben dem bituminösen Kleber werden die PV-Foamglaselemente mit Z-Winkel zusätzlich im Mauerwerk verankert. Dies zur Fixierung, bis der Kleber bindet. Weiter stellt der Z-Winkel eine zusätzliche Sicherheit dar. Dabei bilden die Z-Winkel keine Kältebrücken, da sie in der Mitte der Dämmung ansetzen.



Bild 9 PV-Modul mit Foamglas und Sicherheitsverankerung mittels Z-Winkel (Quelle: Pittsburgh Corning (Schweiz) AG).



Bild 10 Z-Winkel, Standardmaterial Foamglas (Quelle: Pittsburgh Corning (Schweiz) AG).

6. Konzepte für weitere Anwendungen

6.1 Fassade abgesetzt (vorgehängt)

Als Alternative zur verklebten PV-Fassade wurde ein Konzept für eine vorgehängte Fassade erarbeitet. Dieses Kapitel erläutert die hierzu nötigen Konstruktionen und Befestigungsverfahren.

Haken, welche bezüglich Höhe und Wandabstand verstellbar sind, wurden in den verklebten Krallenplatten und in die Wand durchgeschraubt. An den Haken wurde mit Nutsteinen das Befestigungsprofil angeschraubt.



Bild 11 Vorbereitete Foamglasfassade für vorgehängte Module (Quelle: SUPSI).

Die Module der Firma Pramac mit Produktionsmaschinen der Oerlikon Solar werden standardmässig mit vier an der Rückseite angeklebten Adaptern ausgeliefert. Diese Adapter lassen sich in extrudal gepresste Aluprofilschienen "Optibond" einklicken.

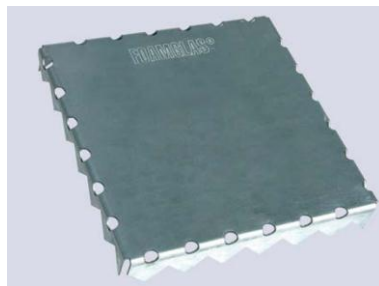
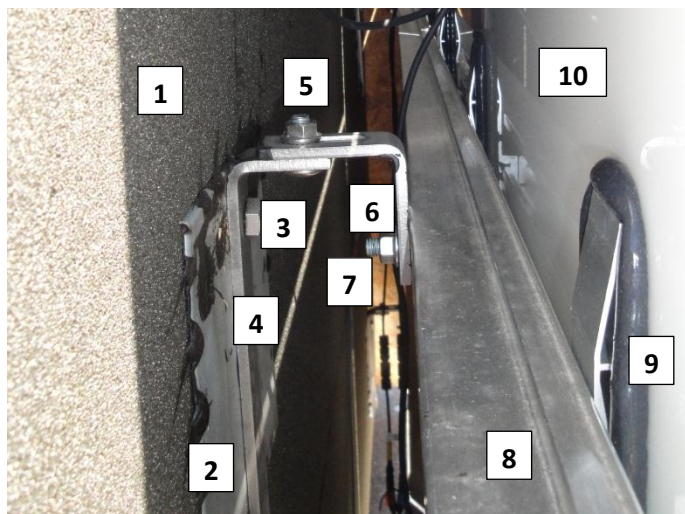


Bild 12 Krallenplatte Standardmaterial Foamglas (Quelle: Pittsburgh Corning (Schweiz) AG).



Bild 13 Moduladapter (ohne Modul) und Querprofil Optibond (Quelle: Schletter AG).

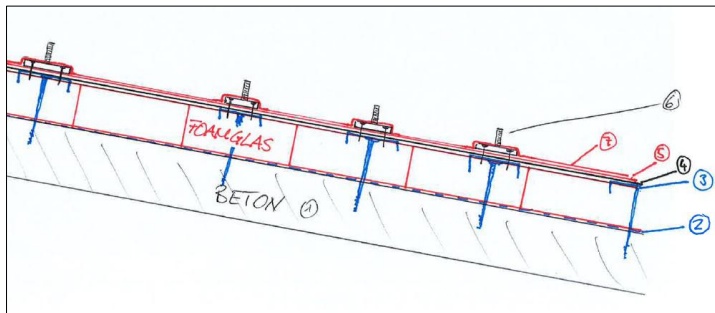
Eine in Foamglas eingeklebte Krallenplatte trägt das Drehmoment der Wandschraube ab.



1. Foamglas
2. Krallenplatte
3. Wandschraube
4. Haken (wie Ziegeldachhaken)
5. Langloch für Wandabstand
6. Langloch für Höhe
7. Nutstein
8. Optibondschiene
9. Optibondadapter angeklebt
10. Glas-Glasmodul

Bild 14 Detailansicht vorgehängte PV-Foamglas-Fassade
(Quelle: Basler & Hofmann AG).

6.2 Flachdach abgesetzt



1. Beton
2. Heissbitumenkleber
3. Krallenplatte in Beton befestigt
4. Bitumen Abdichtungsbahn
5. 1. Lage Kunststoffabdichtung
6. Montageplatten für UK PV-Module in Krallenplatte befestigt
7. 2. Lage Kunststoffabdichtung (UV beständig)

Bild 15 Prinzip Flachdachverankerung (Quelle: Pittsburgh Corning (Schweiz) AG).



Bild 16 Flachdachverankerung, links: Krallenplatte in Foamglas vor dem Setzen der Stockschraube und Abdichten, rechts: Flachdachverankerung fertig abgedichtet (Quelle: Pittsburgh Corning (Schweiz) AG).

Die fast wärmebrückenfreie Befestigung zur Aufnahme der Windsogkräfte erfolgt durch die Krallenplatte in die Unterkonstruktion aus Beton. Auf die Krallenplatte werden die Halter für das PV-Modul mit einer Ausgleichsmasse aus Silikon versehen und dann verschraubt. Diese Teile werden dann wieder mit Flüssigkunststoff abgedichtet und an die bestehenden Abdichtungen befestigt. Die anderen Teile der Unterkonstruktion sind Standard-Dachdeckermaterial.

6.3 Flachdach integriert (Wintergarten)

Das erarbeitete Konzept mit dem Übernamen "Wintergarten" hat sich nach der Evaluation von unzähligen Varianten durchgesetzt. Die meisten Lösungen mussten aufgrund der hohen Kosten für die Abdichtung oder der Materialkosten für Foamglas aufgegeben werden. Zur Favorisierung des Konzeptes "Wintergarten" hat das neu auf dem Markt erschienene Indachsystem "NICER" der Firma Megasol verholfen. Das Indachsystem bleibt bis 3° Neigung dicht. Der Vorteil des Konzeptes besteht darin, dass das Gefälle für die Dachentwässerung nicht mehr durch Masszuschneiden der Dämmung auf verschiedene Dicken und Neigungen erfolgen muss.



Bild 17: Foamglas mit Neigung (Quelle: Pittsburgh Corning (Schweiz) AG).

Weiter braucht die Deckschicht der Dämmung nur noch Unterdachqualität aufzuweisen. Da Foamglas die punktuellen Schnee- und Windlasten aufnehmen kann, erübrigt sich die Dachdurchdringung und Kältebrücken werden vermieden. Eine Verwendung der Warmluft unter dem Dach ist denkbar.

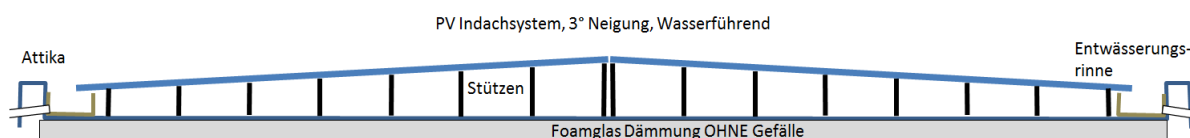


Bild 18 Prinzip Flachdach mit Attika und integrierter Flachdachlösung "Wintergarten" (Quelle: Basler & Hofmann AG).

Als Stützen können z.B. Stützen von Doppelböden eingesetzt werden. Diese gibt es in verschiedenen Längen. Diese können auf dem Dach fein eingestellt werden.

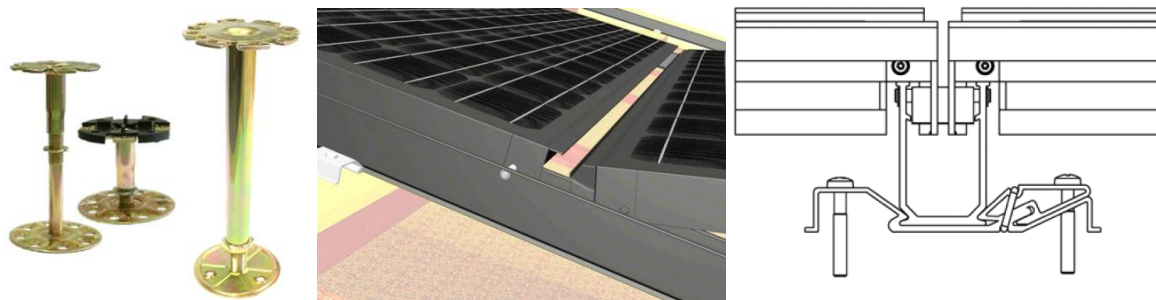


Bild 19 links: Standard Stützen für Doppelböden, Mitte: Detail Querstoss Indachsystem NICER vor dem Einklappen des Modules, rechts: Horizontalschnitt Indachsystem NICER mit Modulen, U-Schiene und Haltefuss mit Holzschrauben (Quelle www.doboplan.de; MegaSol AG).

Der Aufbau einer möglichen Pilotanlage für das Konzept "Wintergarten" soll ausserhalb des BEF Projektes erfolgen.

6.3.1 Hybridkollektoren mit Foamglas

Ein Konzept wurde aufgezeigt, welche mehrere PVT Hybridmodule und Foamglas Isolation in grösseren vorgefertigten Bauteilen kombiniert. Das Potential der Rationalisierung der verschiedenen Gewerke auf dem Bau hat ähnliche Dimensionen wie die Einführung der Sandwichpanele bei Leichtbauhallen. Die Elemente würden also die Stromerzeugung, die Warmwassererzeugung, den

Witterungsschutz, die wasserführende Schicht, Dämmung und die Dachtragkraft (Statik) in einem Bauteil vereinen. Ein weiterer Vorteil ist, dass die Verkabelung der PV-Elemente und der Wasseranschlüsse in der Werkstatt durchgeführt werden kann. Zudem können die Wasserrohre in der Dämmung integriert werden, so dass die Verluste minimiert werden. Dies alles erfolgt in der effizient ausgestatteten Werkstatt. Bereits heute werden Solarkollektoren als grosse Bauteile montiert.



Bild 20: Montage von grösseren Solarkollektorelementen, Fotos: Gerold Weber Solartechnik GmbH, (Quelle: solarserver).

Das Bauteil würde direkt auf die Pfetten geschraubt. Ein Unterdach wäre nicht nötig.

7. Mechanische Tests

Die Module Glas-Glas und Hybrid wurden im SUPSI einem Klimatest mit 200 Zyklen (TC200) unterzogen. Die Visuelle Inspektion danach sowie der Elektrolumineszenztest wurden bei allen 3 Prüflingen bestanden.

Nach dem Klimakammertest (TC200) wurden die Elemente auf Zugbeanspruchung geprüft. Die Belastung erfolgte zuerst über 30 Minuten mit 3000 Pa. Bei 5000 Pa hat sich nach 5 min das Modul abgelöst.



Bild 21 Zugmaschine für Belastungstest, Eingespanntes Glas-Glas Modul nach Versagen (Quelle: SUPSI).

Resultat: Die sichtbare Modulrückseite zeigte, dass in der grossen Modulmitte eine Verbindung zwischen Kleber und Modul nicht stattgefunden hat. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Foamglasblöcke im Format des Moduls vorgängig zusammengeklebt wurden. Dadurch war die Andruckfläche für eine komplette Verbindung zu gross.



Bild 22 Zusammengeklebte Foamglasblöcke im Modulformat (Quelle: Pittsburgh Corning (Schweiz) AG).

Die Produktion wurde umgestellt. Neu wurden in einer Schablone einzelne Foamglasplatten auf die Modulrückseite geklebt. Nun waren eine vollflächige Verklebung und eine innige Verbindung möglich, welche während der Produktion kontrollierbar sind.



Bild 23 neue Arbeitsreihenfolge einzelverkleben der Fomaglasblöcke auf Glas-Glas Modul (Quelle: Pittsburgh Corning (Schweiz) AG).

Resultat: In einem weiteren Versuch hat das Glas-Glas Modul den Zugversuch mit 10.000 Pa bestanden. Das zeigt, dass bei vollflächiger Verklebung diese Zyklen problemlos aufgenommen werden können.

3. Micromorph PV module

The module passed the tested up to the maximum traction force of 10'000 pa.



Bild 24 Erfolgreicher Zugtest, eingespanntes Glas-Glas Modul im Test (Quelle: SUPSI).

Beim Element mit dem Hybridmodul mit Aluminiumkühlprofil löste sich das Foamglas vom Holzaufbau. Die Verbindung zwischen Modul und Foamglas war gut. Der Test wurde nicht wiederholt.

8. Feldtest Aufbau und Leistungsmessung

8.1 Testanlage

Aus den Erkenntnissen aus den vorangegangenen Tests wurden 2 Versuchsaufbauten gefertigt. Die Montage und die Wand wurden erprobt. Weiter wurden die Module und die Temperatur in der Feldtestanlage über 10 Monate überwacht.



Bild 25: Feldtestanlage Links hinterlüftete Fassade, rechts verklebte Fassade (Quelle: SUPSI).

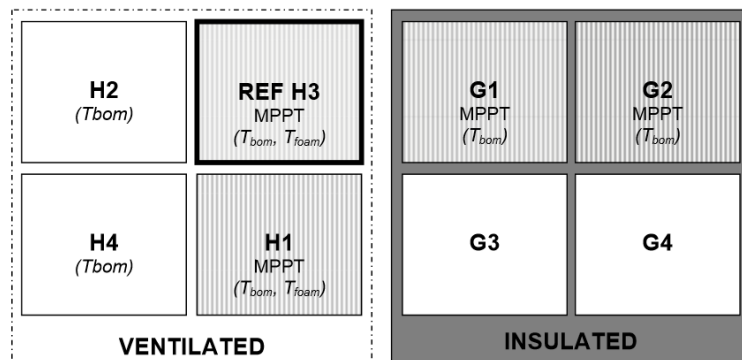


Bild 26: Konzept der Feldtestmessungen (Quelle: SUPSI).

Um die Auswirkung der Dämmstoffe auf die Energieerträge der Module zu bestimmen wurde das hinterlüftete Modul mit der besten Performance, das Modul H3, als Referenzmodul gewählt. Das Modul H3 hat die höchste STC- und Schwachlicht-Initialleistung.

8.2 Modultemperatur

Das tägliche Profil zeigt eine systematisch höhere Temperatur für das obere hinterlüftete Modul im Vergleich zum unteren und für die isolierten Module im Vergleich zu den hinterlüfteten. Die isolierten Module sind im Durchschnitt 4 °C wärmer als die hinterlüfteten. Würde kein thermischer Annealing Effekt auftreten, müssten die isolierten Module eine leicht schlechtere Performance aufweisen als die hinterlüfteten. Allerdings kompensiert der thermische Annealing Effekt, wie dies später gezeigt wird, die thermischen Verluste mehrheitlich, was zu einem fast identischen Energieertrag der isolierten Module im Vergleich zu den hinterlüfteten führt.

8.3 Performance Ratio

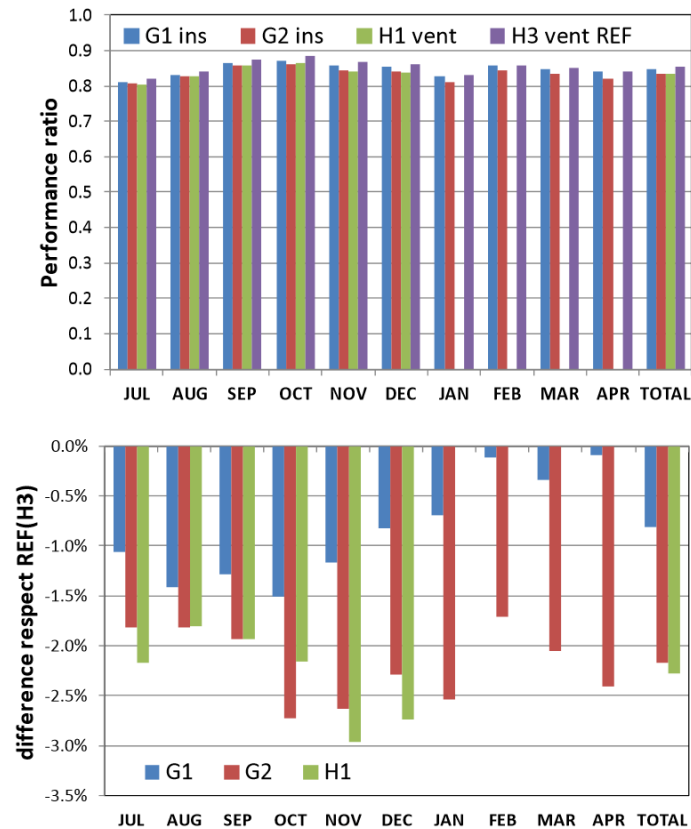


Bild 27: Resultate der Feldtestmessungen. Die Legenden G1 bis H3 verweisen auf Bild 24 (Quelle: SUPSI).

Mit der nominalen Leistung P_{nom} als Referenzwert betragen die Differenzen der einzelnen PR der Module im Vergleich zum Modul H3 zwischen 0% - 3%. Die PR-Differenzen sind somit tiefer als die vom Hersteller angegebene Toleranz. Die Genauigkeit der STC-Leistungsmessung kann somit konsequenterweise als insignifikant betrachtet werden.

Der referenzierte technologische Vergleich mit der gemessenen STC Leistung (P1) führt zu einer nahezu identischen Performance der hinterlüfteten und isolierten mikromorphen Modulen. Die höheren thermischen Verluste aufgrund der Isolierung und des negativen Temperaturkoeffizienten werden aufgrund des thermischen Annealing Effekts vollkommen kompensiert.

8.4 Performance bei Standard Test Konditionen (STC)

Um eine möglichst hohe Genauigkeit zu erreichen, wurde die Referenz STC Leistung für die kWh/kWp Berechnungen mit einem Solarsimulator der Klasse A+A+A+ und einer spektral angepassten Zelle gemessen. Die Module wurden vor und nach dem Freiluftversuch gemessen.

Insgesamt wurden negative Änderungen im Bereich von 2% bis 6% gemessen. Welcher Anteil davon effektiv durch Degradation der Module verursacht wurde und wieviel aufgrund von Messungenauigkeiten oder Stabilisationsprozessen ist dabei unklar. Die Unterschiede liegen tatsächlich aber inner-

halb der heutzutage üblichen Messgenauigkeit für Multi-Junktion Geräte und liefern so an dieser Stelle keine wirkliche Schlussfolgerung bezüglich Degradation.

9. Pilotanlage

Ursprünglich war eine Pilotanlage in Zusammenarbeit mit Oerlikon Solar geplant. Dieser Grossversuch hätte die Praxistauglichkeit sowohl in der Serienherstellung der Elemente als auch deren Handhabbarkeit auf der Baustelle unter Beweis stellen sollen.



Bild 28: geplante Pilotanlage bei Oerlikon Solar (Quelle: Basler & Hofmann AG).

Die Pilotanlage verzögerte sich aufgrund des Verkaufs von Oerlikon Solar an Tokio Elektorn Limited (TEL). Aus diesem Grund wurde nach einem neuen Standort für die Pilotanlage gesucht.

Als Ersatz für die mit Oerlikon Solar geplante Anlage konnte in Beromünster auf dem Areal des ehemaligen Landessenders eine Pilotanlage mit 50 m² gebaut werden. Das Areal wird für Kunstausstellungen und Events genutzt und ist öffentlich zugänglich. Der Bauherr ist die Firma BE Netz AG, einer der marktführenden Schweizer PV-Installateure.



Bild 29: Ansicht der Fassade vor dem Anbau der Anlage (Basler & Hofmann AG).



Bild 30: Ansicht der fertigen Anlage (Quelle: Basler & Hofmann AG).

9.1 Anlagendaten

Tabelle 4: Anlagendaten.

DC Leistung	3,3 kW
Ausrichtung	40° westliche Südabweichung
Module	30 Stk. 1.1 x 1.3 m Bosch μ m-Si plus EU1510 110 W (micromorphe Silizium Glas-Glas Module hergestellt auf Maschinen der Firma TEL Solar) Auf der Modulhinterseite sind 18 cm dicke Foamglasblöcke mit einem Zweikomponentenkleber fixiert.
Wechselrichter	1 Stk. Solar Edge SE4K
Leistungsoptimierer	15 Stk. P300 SolarEdge Leistungsoptimierer
Modultemperaturmessung	SE1000-SEN-TMOD-S1, -10 bis 120 °C bei Modul Feldmitte und beim oberen Feldrand
Umgebungstemperaturmessung	SE1000-SEN-TAMB-S1, -50 bis 50 °C
Einstrahlungsmessung	SE1000-SEN-IRR-S1, 0–1.400 W/m ²
Datenerfassung	SE1000-CCG

9.2 Produktion der PV-Foamglasmodule

Die Firma Boschert Maschinenbau war in der Lage, die Foamglasblöcke maschinell zu bearbeiten. Dies war eines der Ziele des Pilotprojektes. Mit Schablonen und CNC-Fräsen wurden die Foamglasblöcke bearbeitet, bevor sie auf die Glasmodule geklebt werden konnten. Mittels eines Richttisches wurden die mit einem Zweikomponentenkleber der Firma Henkel beschichteten Foamglasblöcke auf dem PV-Glas positioniert.



Bild 31: Maschinelle Bearbeitung des Foamglases (Quelle: Basler & Hofmann AG).

9.3 Montage auf der Baustelle

Berater von Foamglas zusammen mit PV-Installateuren montierten die PV-Foamglasmodule auf der Baustelle in Beromünster.

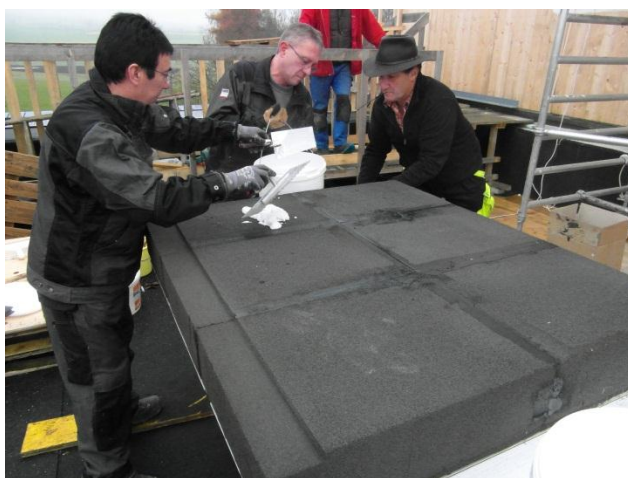


Bild 32: links: Auftragen des Klebers auf der Rückseite des PV-Foamglasmoduls; rechts: Auftragen der seitlichen Abdichtung mit Kartusche. Zwei Z-Anker sichern das Modul, bis der Kleber bindet. Das unterste Modul wird auf einen Stahlwinkel gesetzt. Die Kabel werden in den Stößen versenkt. Die Kerben zur Versenkung der Kabel können einfach auf der Baustelle mit einem Schraubenzieher gezogen werden. (Quelle: Basler & Hofmann AG).

Am Ende wurden die Fugen abgedichtet.

9.4 Stringverkabelung (Anlagenverkabelung)

Es wurden jeweils zwei Module parallel geschaltet und mit einem Optimizer ausgestattet. Die 15 Optimizer wurden seriell an den Wechselrichter geschaltet.

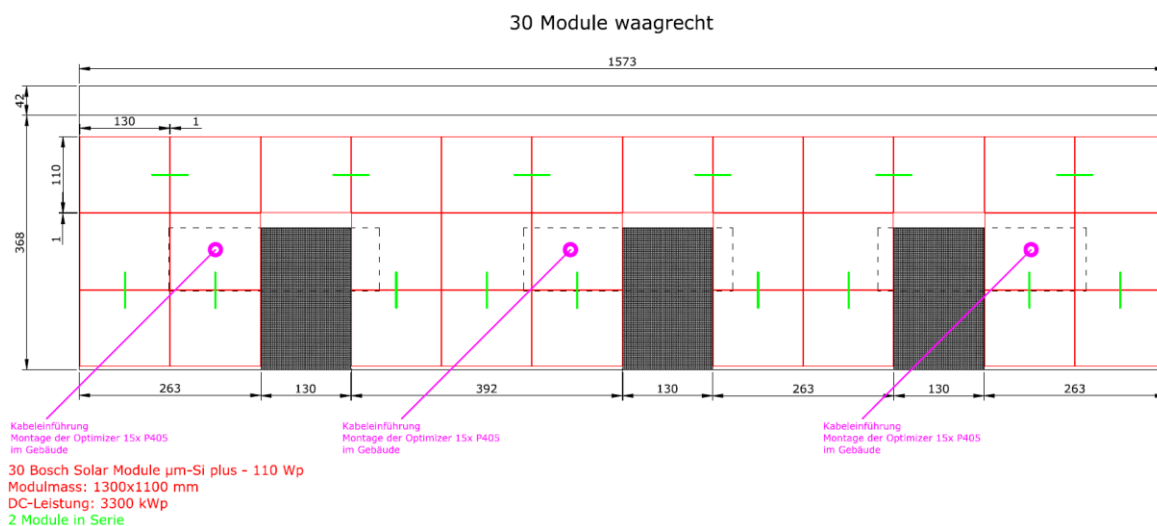


Bild 33: Stringplan, Wanddurchführungen (Quelle: Basler & Hofmann AG).

10. Diskussion und Fazit

10.1 Beurteilung der fertigen Pilotanlage

Die gebaute Anlage wurde folgendermassen eingestuft:

-	Fugenkreuze	Diese wurden im Pilot unschön. Grund: bei einigen Modulen hatten sich durch falsche Lagerung in der Werkstatt bei Aushärten das PV Glas verschoben. Weiter war die Wand nicht eben.
--	Ebenheit	Die Wand muss vorgängig auf Unebenheiten kontrolliert werden. Beulen müssen ausgeebnet werden.
+	Abschlüsse	Aufgrund der Kompaktheit und Formsteifheit sind die Abschlüsse einfach und kostengünstig zu bewerkstelligen.
++	Qualität Dämmung	Die Langlebigkeit von Foamglas in der Fassade ist bedeutend höher als die von anderen Dämmungen, welche sich bei Undichtheiten in der Dampfsperre oder Verkleidung mit Feuchtigkeit vollsaugen.
++	Überkopfverglasung	Für die PV-Foamglasmodule für Fassaden können Standard-PV-Dachmodule verwendet werden. Diese sind um Faktoren günstiger als fassadentaugliche Module. In der Fassade ist einerseits der erforderliche Sicherheitsfaktor viel höher als bei einem Dachmodul, zweitens wird von Fassadengläsern eine Resttragfähigkeit

		higkeit bei Bruch erwartet. Durch die Verbindung der Module mit dem steifen Foamglas erfüllen nun auch günstige ungerahmte Dachmodule die Anforderungen für die Fassade.
++	Bauvolumen	Aufgrund des hochwertigen Foamglases braucht die Fassade nicht hinterlüftet zu werden. Das heisst, der Raum kann innenseitig vergrössert werden. Micromorphe Silizium-Glas-Glas-Module weisen keinen Minderertrag aufgrund der mangelnden Hinterlüftung auf.
+	Kältebrücken	Vorgehängte Fassaden weisen oft Kältebrücken auf, welche die Dämmwerte vermindern. Dies ist bei der Foamglas-PV-Fassade nicht der Fall.

10.2 Beurteilung des Prozesses

+/-	Planung	Der Planungsprozess ist vergleichbar mit dem einer anderen PV-Fassade
- (+)	Foamglas vorbereiten	Industrielle Werkzeuge wurden eingesetzt für _ Foamglasblöcke auf Grösse zuschneiden _ Seitennut _ Aussparung für Modulanschlussdose, Modulkabel, Stecker Grosses Vereinfachungspotential ohne grosse Investitionen ist möglich (siehe Verbesserungsvorschläge)
(+)	PV-Gläser verkleben	Richttische zum Aufkleben sind gut. Die Lagerung, bis der Kleber gebunden hat, erfordert noch Verbesserungen.
-	Transport	Um die PV-Foamglasmodule unbeschädigt zur Baustelle zu bringen, ist eine fachgerechte Verpackung mit Holzkisten und Paletten nötig.
-	Bauvorbereitung	Die Wand sollte wirklich eben sein. Das Montieren eines Anschlagwinkels unten ist erforderlich.
- (+)	Montage	Die 42 kg schweren Module müssen aufwendig von 3-4 Mann gesetzt werden. Ein mobiles Gerüst mit Kranvorrichtung ist nötig. Dieser Punkt kann verbessert werden (siehe Kapitel Verbesserungsvorschläge).
-	Verkabelung	Die Verkabelung muss während des Montierens der Module erfolgen. Verbesserungspotential vorhanden.
-	Fugen dichten	Für schöne Fugendichtungen ist ein Profi erforderlich.
--	Modul auswechseln	Sollte ein Modul defekt sein, muss die Dämmung unter dem Modul zerstört und ausgekratzt werden. Ein neues PV-Foamglasmodul muss eingepasst und eingeklebt werden.

10.3 Beurteilung Kostenstruktur

Die Kostenpositionen einer PV-Foamglas-Fassade setzen sich wie folgt zusammen:

Tabelle 5: Kostenstruktur Foamglasmodul (Quelle: Basler & Hofmann AG).

		Dicke	Material		Verbrauch	EUR		Arbeit		Total	
Fläche: ca.536 m ²		mm	EUR /	Einheit	/m ²	Mat.		Min.	EUR h	EUR /	%
									80,00	m ²	
Foamglas Kleber	PC 164	3,0	2,38	4,00	kg	9,52		5,0	6,67	16,19	4%
Dämmstoff , dampfdicht	Foamglas T4+	180,0	86,00	1,00	m ²	86,00		30,0	40,00	126,00	29%
Dämmstoff , dampfdicht	Foamglas T4+	100,0	47,00	1,00	m ²	47,00			-	47,00	11%
Kleber für PV Modul und Foamglas	Henkel MS 642 2K	3,0	10,00	3,00	kg	30,00			-	30,00	7%
PV Modul 110 x 130 cm	Aufkleben von Foamglas	8,0	120,00	0,00	m ²	-		60,0	80,00	80,00	18%
mechanische Befestigung	F-Anker		2,00	4,00	St	8,00		8,0	10,67	18,67	4%
Modul an die Fassade kleben	Arbeitskosten					-		60,0	80,00	80,00	18%
Verfugung	Henkel MS 935 1K		5,70	2,30	kg	13,11		20,0	26,67	39,78	9%
		294,0				193,63			244,00	437,63	100%

rot: die Arbeiten waren beim Pilot auf 90 Min. Das Potential wird auf 60 geschätzt

1,2 EUR/CHF

Total Kosten Material und Montage Unterkonstruktion und Dämmung 28 cm und Modulmontage (Modulkosten abgezogen) **525,16 CHF/m²**

Die obige Tabelle zeigt die Kostenstruktur eines Aufbaus mit einer 28 cm dicken 2-lagigen Foamglas-dämmung auf einer eher unebenen Wand. Das Kostentotal liegt bei 525 CHF/m². Ein einlagiger Aufbau mit z.B. 10 cm Dämmung wäre um 30 % günstiger und läge bei 370 CHF/m².

Tabelle 6: Fassadenpreise ohne Dämmung (Quelle: Basler & Hofmann AG).

Typ	Beispiele	m2 Kosten schlüsselfertig OHNE Dämmung
Vorhängefassade ohne PV		
Holz	Sägerohre offene Holzriemen 21mm, Breite 5-8cm, horizontal verlegt, Roggenmehl-Holzlasert, schwarzes Winddichtpapier	CHF 150.00
Verputzte Trägerplatten	System H6 Sarna-Granol, fugenlos verputzt	CHF 150.00 bis 175.00
Blech	2mm abgekannte Blechkassetten, pulverbeschichtet, verdeckt montiert	CHF 150.00 bis 200.00
Faserzement	Eternit 6mm, mit Stulpdeckung, Holz-Unterkonstruktion Mehrpreis für Metall-UK (Stulp-Profil) ca.	CHF 200.00 bis 250.00 CHF 50.00
Keramik	Feinsteinzeugplatten, Format ca. 60x60cm, verdeckt montiert	CHF 250.00 bis 275.00
Metallverbund	Aluverbundplatten 4mm sichtbar befestigt Mehrpreis für verdeckte Montage (eingehängt)	CHF 300.00 bis 320.00 CHF 65.00
Schiefer	keine eigene Zahlen; im Bereich Metallverbund	(CHF 300.00 bis 400.00)
Feinbetonplatten	auch hochwertige Faserzementplatten	CHF 600 - 800
Glas	Pfosten-Riegelsystem (Glas-Metallfassade) reine Glasfassade (Structural Glazing):	CHF 600.00 bis 700.00 CHF 700.00 bis 1'000.00
Naturstein	Dicke 30-40mm	CHF 650.00 bis 800.00
Marmor	Dicke 30-40mm	CHF 1'000

In der obigen Tabelle sind die Kosten der Dämmung nicht eingerechnet. Sie werden auf 70 -100 CHF/m2 veranschlagt.

Somit kann gesagt werden, dass die PV-Foamglasfassade sich kostenmässig unter dem Niveau von vorgehängten Feinbetonplatten oder vorgehängten Glasfassaden befinden. In diesem Kostenvergleich nicht berücksichtigt ist erstens, dass die PV-Foamglasfassade Strom produziert. Zweitens, dass mehr Innenraumvolumen entsteht, da die Hinterlüftung wegfällt. Das heisst, der Raum kann innen-seitig vergrössert werden. Und drittens, dass die Langlebigkeit von Foamglas in der Fassade bedeutend höher ist als bei anderen Dämmungen.

Erst im Verlauf des Projektes und beeinflusst durch andere PV-Fassadenprojekte wurde der Kostenvorteil des vorliegenden Ansatzes bewusst. PV-Module oder Gläser für die Fassade müssen wesentlich stärker sein als wenn sie auf dem Dach montiert werden. Alle günstigen PV-Module sind nur für die Dachmontage oder Freiflächenanlagen konzipiert. Der Sicherheitsfaktor reicht für eine Überkopfverglasung nicht aus. Fassadentaugliche Module kosten um Faktor zwei bis drei mehr als Standard-PV-Module. Durch das Ankleben von Profilen an der Rückseite können Standardmodule für die Fassade "ertüchtigt" werden. Der Aufwand ist jedoch vergleichbar mit dem Prozess, Foamglas an das Modul zu kleben.

Eine Unterkonstruktion für vorgehängte Fassaden ist aufwändig. Die Dämmung muss um die an der Wand verankerten Konsolen verlegt werden. Ein Kreuzschienensystem sowie an den Gläsern geklebte Halteprofile sind material- und zeitintensiv.

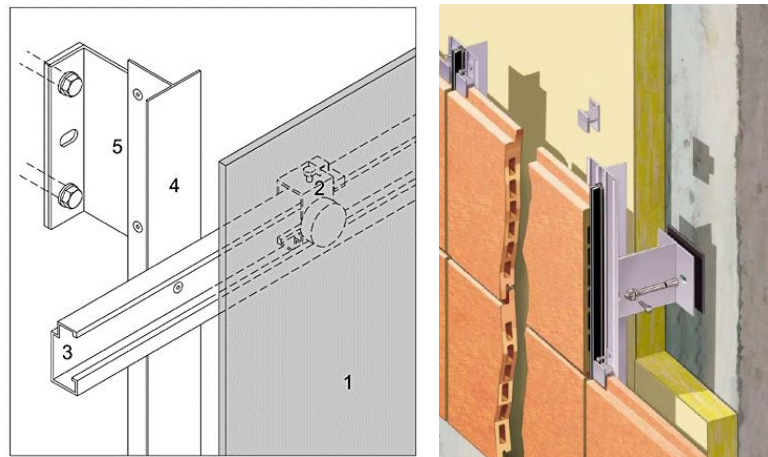


Bild 34: konventionelle Fassadenkonstruktion (Quelle: tectorum.de, winddimnet.de).

Das Potential des Konzeptes wird als sehr gut eingestuft. Kostenmässig ist es bereits heute konkurrenzfähig. Durch die vorgeschlagenen Optimierungen entlang der ganzen Prozesskette lassen sich die Vorteile ausbauen und die Nachteile wie Umgang mit unebenen Wänden und Modulauswechseln etwas entschärfen. Qualitativ ist die PV-Foamglasfassade gegenüber anderen PV-Fassaden aufgrund der hochwertigen Dämmung überlegen.

10.4 Leistungsbeurteilung

Die Leistung der Anlage entspricht den Erwartungen aus dem Feldtest bei SUPSI. Zwei Module sind jeweils an einen Moduloptimizer angeschlossen, welcher die Leistung aufzeichnet. Es wurden 15 Leistungskurven gemessen:

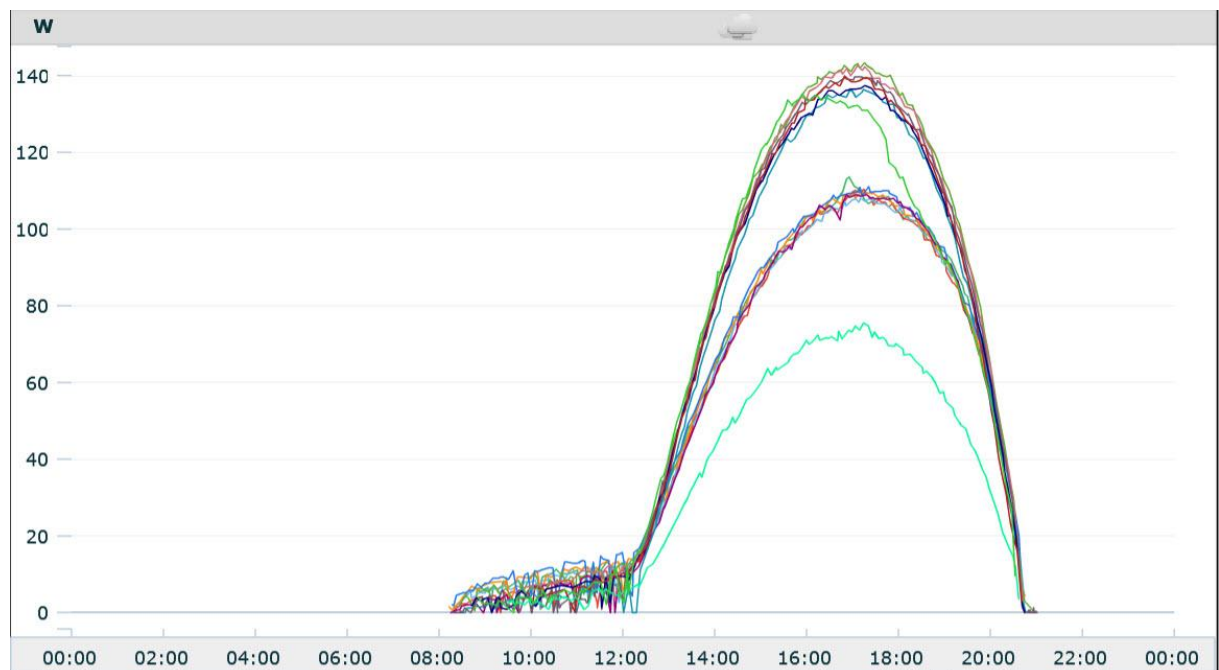


Bild 35: Leistung der einzelnen Optimizer (je zwei Module) an einem schönen Tag (30.08.2015) (Quelle: Basler & Hofmann AG).

Die 4 Optimizer unter der Traufe zeigen eine schwächere Leistung, da sie durch den vorstehenden Traufenaufbau im Sommer etwas verschattet werden.



Bild 36: Verschattung durch den Traufenaufbau (Quelle: Basler & Hofmann AG).

10.5 Schadensfall

Ein Optimierer fiel auf die Hälfte der Leistung ab. Der Grund liegt an einem beschädigten Modul. Die Ursache der Beschädigung ist unklar und muss genauer untersucht werden. Die Reparatur wird auf 2016 eingeplant.



Bild 37: Beschädigtes Modul (Quelle: Basler & Hofmann AG).

10.6 SUPSI Feldversuch

Die Feldversuchsenergieertragsmessungen in Kombination mit den Leistungsmessungen im geschlossenen Labor bestätigen, dass die fassadenintegrierten micromorphen Module, welche von der Oerlikon hergestellt wurden, unabhängig ob thermisch isoliert oder belüftet, jeweils die gleiche Performance erzielen. Die thermischen Verluste der isolierten Module, welche aufgrund des negativen Temperaturkoeffizienten auftreten, werden vollständig vom Annealing Effekt kompensiert, da die Modultemperatur insgesamt steigt. Beide Lösungen, belüftet und isoliert, haben potentiell den gleichen Energieertrag.

10.7 Verbesserungsvorschläge

Folgende Verbesserungspotentiale wurden durch den Aufbau des Pilotprojektes erkannt:

Kleinere Module z.B. CIS-Module 60 cm x 120 cm von MANZ (alias Würth)

- Damit wären die PV-Foamglasmodule nur noch 20 kg anstelle von 43 kg. Auf ein mobiles Gerüst mit elektrischer Kraneinrichtung könnte verzichtet werden. Es bräuchte anstelle von 4 nur noch 2 Personen für die Montage.
- Kleinere Module sind weniger sensibel auf Unebenheiten des Untergrundes.
- Standard Foamglasblöcke haben die Dimensionen von 60 x 45 cm. Mit dem 60 x 120 cm-Modul bräuchte nur einer von drei Foamglasblöcken angepasst zu werden. Die Verschnitte verringerten sich.

Module mit der Modulanschlussdose auf der Seite und kleinen Steckern

- Das Ausfräsen der Passform für die Modulanschlussdose und die Modulkabel kann eingespart werden, wenn der Hersteller dazu bewegt werden kann, ein Los mit seitlicher Modulanschlussdose zu produzieren.
- Die meisten Module sind mit dem MC4-Stecksystem ausgerüstet. Die Stecker weisen einen Durchmesser von 2 cm auf. Würde man kleinere Stecker verwenden, so könnten die Kabel direkt in die Fugen gelegt werden. Dadurch könnten die Module auch nach der Montage elektrisch verkabelt werden.

Kleben und Trocknungsprozess im Werk

- Hier ist auf gute Lagerung zu achten bis der Kleber abgebunden hat. So waren einige PV-Module gegenüber dem Foamglas verschoben und mussten auf der Baustelle nachgeschliffen werden. Die Ästhetik der Fugenkreuze litt darunter.
- Die von der Firma Henkel gemietete Maschine für das Mischen des Zweikomponentenklebers (Foamglas auf PV-Modul) bereitete technische Probleme. Etwa ein Drittel des Klebers blieb maschinenbedingt überschüssig.

Unebene Wände

- Vor der Montage ist die Wand auf "Beulen" zu untersuchen. Werden diese nicht beseitigt, so sind die Fugenkreuze unschön.
- Foamglas lässt sich sehr gut und einfach ebnen. Es ist abzuwägen, ob sich das Arbeiten mit zwei dünneren Foamglasschichten lohnt.

Zürich den 18.12.2015

Eric Langenskiöld

Projektleiter

Basler & Hofmann AG Zürich

Quellen:

- [1] Mechanical Load Test Reprot SUPSI, Gabi Friesen, Thomas Friesen, Canobbio 15.06.2011
- [2] Energy Yield Measurements, SUPSI, Gabi Friesen, Thomas Friesen, Lugano 22.07.2013