



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Bundesamt für Energie BFE

Forschung, November 2015

# Programm Photovoltaik Ausgabe 2015

## Überblicksbericht, Liste der Projekte

## Jahresberichte der Beauftragten 2014

ausgearbeitet durch:  
**NET Nowak Energie & Technologie AG**

**Auftraggeber:**

Bundesamt für Energie BFE  
Forschungsprogramm Photovoltaik  
3003 Bern  
[www.bfe.admin.ch](http://www.bfe.admin.ch)

**Auftragnehmer:**

NET Nowak Energie & Technologie AG  
Waldweg 8, 1717 St. Ursen  
Tel. 026 494 00 30, Fax. 026 494 00 34  
[info@netenergy.ch](mailto:info@netenergy.ch)

**Autor:**

Dr. Stefan Nowak, NET Nowak Energie & Technologie AG  
[stefan.nowak@netenergy.ch](mailto:stefan.nowak@netenergy.ch)

**BFE-Bereichsleiter:** Dr. Stefan Oberholzer

**BFE-Programmleiter:** Dr. Stefan Nowak

**BFE-Vertrags- und Projektnummer:** SI/500020-05

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen ist ausschliesslich der Autor dieses Berichts verantwortlich.

**Titelbild:** © 2014 Daniel Forster / NET Ltd.

# Programm Photovoltaik Ausgabe 2015

## Forschung

---

### Inhalt

---

	Seite
S. Nowak <b>Überblicksbericht des Programmleiters</b>	7
<b>Übersicht der laufenden und im Projektjahr abgeschlossene Projekte</b>	15

---

### Jahresberichte der Beauftragten

---

	Seite
--	-------

#### Solarzellen

---

F. Sculati-Meillaud, E. Moulin, J.-W. Schüttauf, M. Morales, S. De Wolf, C. Bücher, C. Ballif <b>Thin layers for High-Efficiency Silicon Solar Cells through Ideal Coupling of Individual Components – SI/500750 / SI/500750-01</b>	27
B. Niesen, J. Werner, A. Walter, P. Löper, A. Dabirian, S. Martin de Nicolas, M. Morales Masis, S. De Wolf, S.J. Moon, J.H. Yum, S. Nicolay, J. Bailat, W. Tress, S. Zakeeruddin, M. Grätzel, L. Kranz, S. Buecheler, A.N. Tiwari, C. Ballif <b>SYNERGY - Systems for Ultra-High Performance Photovoltaic Energy Harvesting – SI/501072 / SI/501072-01</b>	37
F.-J. Haug, E. Moulin, C. Ballif <b>FASTTRACK – Accelerated Development and Prototyping of Nano-Technology based High Efficiency Thin Film Silicon Solar Modules – FASTTRACK / 283501</b>	45
S. De Wolf, S. Martin de Nicolas, J. Geissbuehler, J. Seif, N. Holm, C. Ballif <b>HERCULES - High Efficiency Rear Contact Solar Cells and Ultra Powerful Modules – FP7-608498 / HERCULES</b>	50
N. Wyrsh, S. de Wolf, C. Ballif <b>CHEETAH - Cost-Reduction through Material Optimisation and Higher EnErgy Output of SolAr PHotovoltaic Modules – FP7-609788 / CHEETAH</b>	55
B. Paviet-Salomon, A. Tomasi, S. Martin de Nicolas, N. Holm, S. De Wolf, A. Descoedres, M. Despeisse, C. Ballif, D. Lachenal, B. Legradic, B. Strahm <b>HET-IBC - Development of Thin High-Efficiency Large-Area Interdigitated Back-contacted Silicon Heterojunction Solar Cells for Mass Production – KTI13348.1</b>	60

J. Geissbühler, S. De Wolf, C. Ballif	68
<b>NODHID - Thin Film on Crystalline Silicon: Novel Cell and Module Designs for High Energy Density Photovoltaics – NODHID</b>	
J.W. Schüttauf, F.-J. Haug, C. Ballif	73
<b>TRIGGER - High Efficiency Triple-Junction Thin Film Silicon Solar Cells Implementing Amorphous Silicon-Germanium Alloys – KT113333.1</b>	
J. Steinhauser, Y. Romanyuk, A.N. Tiwari	76
<b>Solution Deposited ZNO-Based Front Contacts for CIGS Solar Cells – SI/501100 / SI/501100-01</b>	
B. Bissig, F. Pianezzi, P. Reinhard, S. Buecheler, A.N. Tiwari	81
<b>Combining Macroscopic and Microscopic Characterization of Recombination Losses in High Efficiency CIGS Solar Cells – How to Reach the Theoretical Limit? – SNF200021 / 149453</b>	
S. Buecheler, P. Reinhard, T. Jäger, A.N. Tiwari	84
<b>R2R-CIGS - Roll-to-Roll Manufacturing of High Efficiency and Low Cost Flexible CIGS Solar Modules – R2R-CIGS / 283974</b>	
F. Pianezzi, S. Buecheler, A.N. Tiwari	88
<b>Flexible Photovoltaic Cells Optimized for High Conversion Efficiency from Indoor to Outdoor Illumination Conditions, used in New Wrist-Watch Products – KT115166.1</b>	
J. Perrenoud, S. Buecheler, A.N. Tiwari, B. Keller, R. Kern	91
<b>Performance Stability of Flexible CIGS Solar Modules – KT112800.3</b>	
S. Haaß, Y. Romanyuk, A.N. Tiwari	95
<b>KESTCELLS - Training for Sustainable Low Cost PV Technologies: Development of Kesterite Based Efficient Solar Cells – KESTCELLS - 316488</b>	
S. Buecheler, A.N. Tiwari, A. Burn	101
<b>APPOLO - Hub of Application Laboratories for Equipment Assessment in Laser Based Manufacturing – FP7-609355 / APPOLO</b>	
A. Virtuani	104
<b>SCALENANO - Development and Scale-Up of Nanostructured Based Materials and Processes for Low Cost High Efficiency Chalcogenide Based Photovoltaics – SCALENANO - 284486</b>	
T. Lanz, B. Ruhstaller	111
<b>CONNECT-PV - Conductive Transparent Electrodes: a Competence Cluster for Highly Efficient Thin Film Photovoltaics – SI/501099 / SI/501099-01</b>	
G. Nisato	114
<b>SUNFLOWER - Sustainable Novel Flexible Organic Watts Efficiently Reliable - SUNFLOWER / FP7-287594</b>	

## Module und Gebäudeintegration

---

B. Strahm, M. Despeisse <b>Swiss Inno HJT: Pilot Production and Demonstration of Innovative High Performance Silicon Heterojunction PV Cells, Modules and Systems</b> - SI/500966 – SI/500966-01	123
S. Buecheler, P. Reinhard, A.N. Tiwari, D. Ehrensperger, M.R. Kälin <b>CIGS Multi-Stage In-line Pilot Machine Demonstration</b> – SI/500694 / SI/500694-01	129
G. Friesen, M. Pravettoni, A. Virtuani, S. Dittmann <b>Optimization of Thin Film Module Testing and PV Module Energy Rating at SUPSI</b> - SI/500691 / SI/500691-01	140
G. Corbellini <b>PERFORMANCE PLUS - Tools for Enhanced Photovoltaic System Performance</b> – PERFORMANCE PLUS / 308991	148
F. Frontini <b>CONSTRUCT PV - Constructing Buildings with Customizable Size PV Modules Integrated in the Opaque Part of the Building Skin</b> – CONSTRUCT-PV / 295981	152
A. Kunzmann, A. Devaux, L. Sägesser, D. Brühwiler, P. Belser, P. Cao, G. Calzaferri <b>Gewinnung elektrischer Energie aus Tönungen für Fensterscheiben und Fassadenelemente</b> – SI/500995 / SI/500995-01	158
J.-F. Affolter, Ph. Morey <b>Caractérisation des modules photovoltaïques à colorant de l'entreprise g2e</b> - SI/500794 / SI500794-01	165
E. Langenskiöld, M. Stoll <b>Photovoltaik im Verbund mit Dämmstoff Foamglas</b> - SI/500582 / SI/500582-01	171
A. Baggenstos <b>Potentialevaluation der Kombination Solar und Wärmepumpe und Betriebsoptimierung mittels Monitoring einer Grossanlage solar regenerierter Erdsondenfelder</b> - SI/501010 – SI/501010-01	178
A. Baggenstos, M. Rommel <b>Produktentwicklung PV/T Kollektor mit Installationssystem</b> – KTI12606.2	184

## Systemtechnik

---

U. Muntwyler, M. Jost, T. Schott <b>Langzeit-Messung von PV-Anlagen</b> - PV-Langzeitmessung	<b>187</b>
U. Muntwyler, D. Gfeller <b>Prüfstand für Multistring Solarwechselrichter</b> - SI/500900 - SI/500900-01	<b>194</b>
U. Muntwyler, A. Werder, D. Gfeller <b>Akkreditierung des Solarwechselrichter-Testverfahren für Forschungsplattform</b> - SI/501082 – SI/501082-01	<b>198</b>
C. Bucher <b>SmartGrid Eich (SGE) – Zentrale Steuerung von Photovoltaik-Wechselrichtern</b> - SI/501094 – SI/501094-01	<b>203</b>
B. Ruhstaller, K. Pernstich <b>PAIOS+ - Integrierte Messplattform für OLED und Solarzellen R&amp;D</b> – KTI15889.2	<b>209</b>
J. Rohrer <b>Development of Optimization Tools for Large-Scale Photovoltaic Systems with Complex Geometries Considering Direct Reflection of Various Surfaces like Snow and Water</b> – KTI16596.1	<b>210</b>
R. Egli, M. Markstaler <b>Deicing von Photovoltaikanlagen</b> – KTI15759.1	<b>211</b>
D. Marcel, L. Perret <b>Photovoltaïque et neige: Horizon des solutions pour l'installation sur les toits dans les régions enneigées</b> - SI/500568 – SI/500568-01	<b>212</b>
J. Rohrer <b>PVT-Solarkraftwerk Lintharena-sgu: Strom und Wärme vom Dach</b> - SI/501095 – SI/501095-01	<b>226</b>

## Internationale Koordination

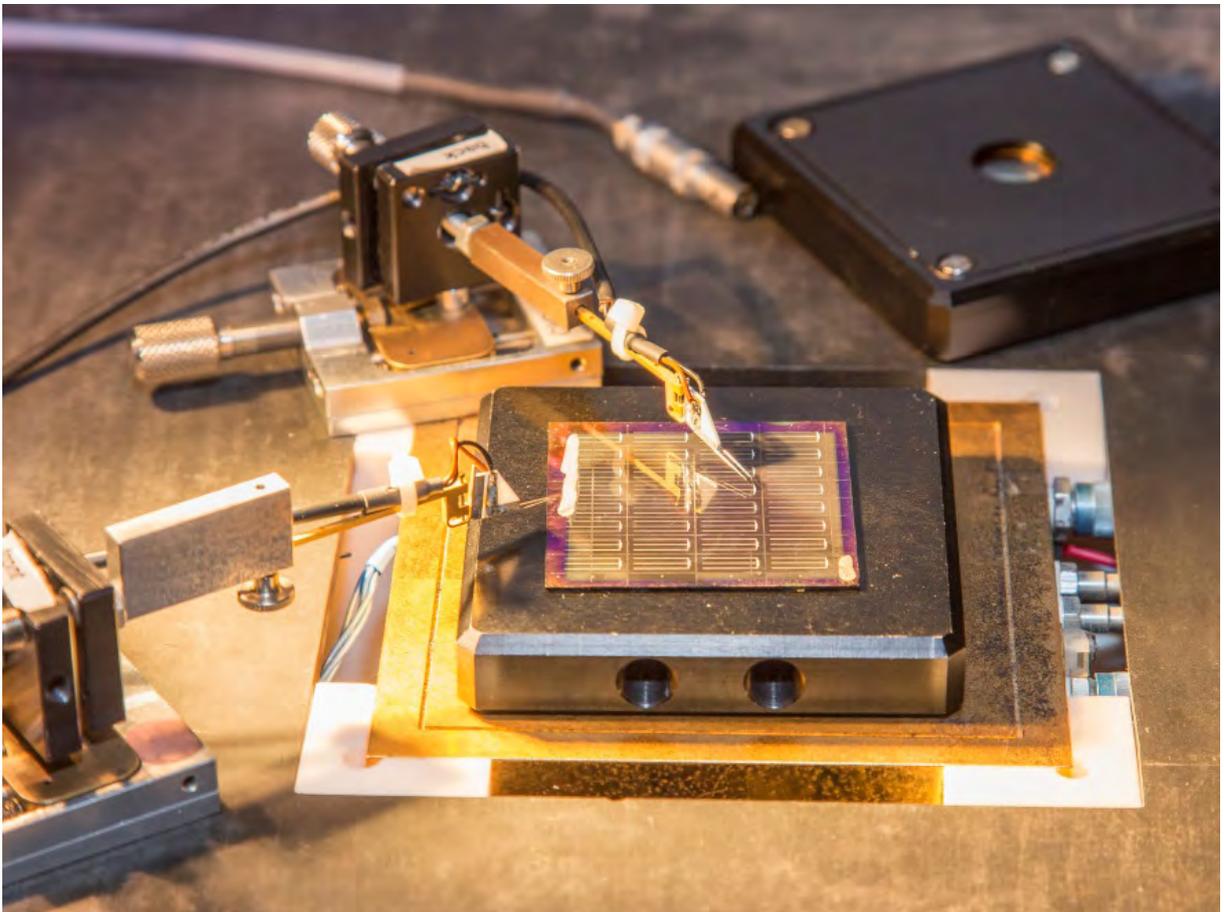
---

P. Hüsler <b>Schweizer Beitrag zum IEA PVPS Task 1 2014 - SI/400735 / SI/400735-02</b>	<b>233</b>
R. Frischknecht, F. Wyss <b>Schweizer Beitrag IEA PVPS Task 12 - 2014 Ökobilanzen von Solarstrom</b> - SI/500738 / SI/500738-03	<b>239</b>
T. Nordmann <b>Schweizer Beitrag IEA PVPS Task 13 – SI/500021 / SI/500021-04</b>	<b>246</b>
T. Friesen <b>Schweizer Beitrag IEA PVPS Task 13 – 2013/2014 – Performance and Reliability of PV Systems – 2014.02 – IEA PVPS Pool</b>	<b>252</b>
D. Marcel, L. Perret, C. Bucher, J. Remund <b>Schweizer Beitrag IEA PVPS Task 14 – High Penetration of PV Systems in Electricity Grids - 2011.01 / IEA PVPS Pool II</b>	<b>255</b>
J. Remund <b>Schweizer Beitrag IEA PVPS Task 46 - Solar Resource Assessment and Forecasting – SI/500184 / SI/500184-05</b>	<b>262</b>
P. Toggweiler <b>Photovoltaische Solarenergie-Systeme - SWISSOLAR – 17967</b>	<b>266</b>
S. Nowak, M. Gutschner, S. Oberholzer <b>SOLAR-ERA.NET - ERA-NET on Solar Electricity for the Implementation of the Solar Europe Industry Initiative - SOLAR-ERA.NET / EC FP7 321571</b>	<b>267</b>
S. Nowak, A. Mastronardi, S. Gnos <b>REPIC - Swiss Interdepartmental Platform for Renewable Energy and Energy Efficiency Promotion in International Cooperation - SECO UR-00123.04.01</b>	<b>273</b>



Überblicksbericht 2014

# Forschungsprogramm Photovoltaik



Messaufbau für CIGS Dünnschicht-Solarzellen an der EMPA Dübendorf (© 2014 Daniel Forster / NET Ltd.)



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Bundesamt für Energie BFE

## Einleitung

Die Photovoltaik hat in den letzten Jahren sowohl technologisch wie industriell und marktbezogen enorme Fortschritte gemacht und wird heute weitverbreitet als eine der wichtigsten künftigen Energietechnologien angesehen. Nebst den anhaltenden technologischen Entwicklungen ist die Photovoltaik aufgrund ihrer Marktentwicklung vielerorts systemrelevant geworden. Diese Situation führt zu neuen Herausforderungen sowohl technischer wie ökonomischer Art.

Forschung und Entwicklung bleiben in dieser intensiven Phase von zentraler Bedeutung und sind für die anhaltende Innovation und Marktführerschaft entscheidend. So hat die Dynamik auch an der technologischen Front weiter zugenommen und neue Erfolgsmeldungen treffen in verschiedensten Gebieten immer rascher aufeinander.

In der Forschung geht es um die anhaltende Weiterentwicklung der bestehenden Photovoltaiktechnologien sowie die Entwicklung neuer Materialoptionen und Konzepte. Nebst dem Kerngebiet der verschiedenen Solarzellen- und Modultechnologien beinhaltet die Photovoltaikforschung auch technologiespezifische Themen auf der Systemebene, z.B. der Gebäudeintegration, der elektrischen Systemtechnik oder der Umweltindikatoren und des Recyclings. Mit der derzeit anhaltenden Kostenreduktion bilden System-übergreifende Aspekte wie die Netzintegration, die Speicherung oder energetische Konzepte im Gebäude immer wichtigere Themen der Forschung. Neue Erkenntnisse und Resultate aus der Forschung werden möglichst rasch in die Industrie übergeführt.

Die Photovoltaik als wesentlicher Pfeiler einer nachhaltigen Stromversorgung hat in relevanten Szenarien inzwischen ihren festen Platz: Die im Jahr 2014 publizierte zweite Photovoltaik-Roadmap der Internationalen Energie Agentur IEA [1] spricht bis 2050 von einem möglichen Beitrag von rund 16 % zur weltweiten Stromversorgung, deutlich mehr als die 10% in ihrer ersten Ausgabe von 2010 [2].

In den letzten 30 Jahren hat sich eine starke Schweizer Position in verschiedenen Gebieten der Photovoltaikforschung herausgebildet: Im Vordergrund standen lange fast ausschliesslich die Entwicklungen von verschiedenen Dünnschicht-Technologien. In den letzten Jahren verbreiterte sich die Forschung auf neue Konzepte mit kristallinen Solarzellen und neuen grundlegenden Konzepten. Es erfolgte dazu eine deutliche Steigerung der Aktivitäten und eine Stärkung der Forschungsinfrastruktur. Heute findet neben der Forschung an Instituten und Hochschulen auch seitens der Industrie eine intensive Technologieentwicklung statt, welche mittlerweile zu einer entlang der ganzen Wertschöpfungskette der Photovoltaik bedeutenden Schweizer Industrie geführt hat. Laufende Aktivitäten in Forschung und Entwicklung sowie Projekte im Bereich von Pilot- und Demonstrationsanlagen umfassen im Berichtsjahr 2014 rund 73 Projekte, wobei alle der Programmleitung bekannten Projekte mit einer Förderung der öffentlichen Hand berücksichtigt sind. Nebst den durch das Bundesamt für Energie (BFE) geförderten Projekten und den Schwerpunkten einzelner Hochschulen und Forschungsinstitute spielen Projekte mit Unterstützung der Kommission für Technologie und Innovation (KTI) sowie zahlreiche EU-Projekte im Forschungsprogramm Photovoltaik eine tragende Rolle.

## Programmschwerpunkte

Das Forschungsprogramm Photovoltaik des BFE verfolgt in der Periode 2013–2016 die folgenden Ziele [3]:

- Weiterentwicklung von Dünnschicht-Solarzellen (Effizienzsteigerungen und Kostenreduktion);
- Entwicklung von Hocheffizienzzellen (z. B. HIT-Zellen, Photonenmanagement);
- Materialoptionen für neue Solarzellenkonzepte (z. B. organische Solarzellen);
- Industrielle Fertigungsprozesse für verschiedene Dünnschicht-Solarzellen (z. B. Silizium, CIGS);
- Neue multifunktionale Produkte für die Gebäudeintegration;
- Optimierung der Einbindung von Solardächern und –fassaden in die Gebäudetechnik;
- Netzintegration von hohen Anteilen von Photovoltaikstrom;
- Übergreifende Zusammenarbeit zur Optimierung der Energieerzeugung in Kombination mit andern Erneuerbaren, insbesondere bezüglich Speicheroptionen und Verbrauchssteuerung.

Das Programm ist dazu in folgende fünf Bereiche aufgeteilt (die in Klammern angegebene Klassifizierung bezieht sich auf die Liste der Projekte, Seite 15 ff.):

### *Solarzellen (1a-e)*

Verschiedene materialspezifische Ansätze zu Dünnschicht-Solarzellen stellten bisher den wichtigsten Schwerpunkt dar (Silizium, Verbindungshalbleiter, organische Materialien). Verstärkt werden Hocheffizienz-Zellen mit Heteroübergängen zwischen Dünnschicht- und kristallinem Silizium vorangetrieben. Organische und Polymersolarzellen, in den letzten Jahren vor allem auch die Forschung an

Perowskitstrukturen, gewinnen als mögliche langfristige Technologieoptionen an Bedeutung. Ausserdem werden in der Grundlagenforschung fortgeschrittene Konzepte mit Photonen-Management erforscht, z.B. für Lumineszenz-Konzentratoren.

#### *Module und Gebäudeintegration (2a-e)*

Neue Konzepte für die Photovoltaik Gebäudeintegration stehen hier im Vordergrund. Zum Einen geht es dabei um eine grössere Vielfalt von Lösungen und neue gestalterische Möglichkeiten, insbesondere durch farbige Solarmodule. Zum Anderen wird die Integration in funktionale Gebäudeelemente (z.B. Isolation, Wasserdichtigkeit) verfolgt.

#### *Elektrische Systemtechnik (3)*

Bei der elektrischen Systemtechnik steht die Qualitätssicherung von Modulen und Wechselrichtern im Vordergrund, einschliesslich entsprechender Normen. Ein in Zukunft wichtiger werdendes Thema ist die Wechselwirkung mit dem elektrischen Netz und die Integration der Photovoltaik ins Netz.

#### *Begleitende Themen (4)*

Zum Einen geht es hier um relevante technische und nicht technische Themen zur Marktentwicklung (z.B. Hilfsinstrumente, Monitoring, Umweltaspekte). Andererseits sind hier auch auf andere Energiethemata übergreifende Projekte (z.B. Gebäude, Mobilität, Speicherung) angesiedelt.

#### *Institutionelle internationale Zusammenarbeit (5)*

Diese erfolgt einerseits projektbezogen auf allen Gebieten und andererseits im Rahmen des Implementing Agreements Photovoltaic Power System Programme (PVPS) der Internationalen Energieagentur (IEA), der europäischen SOLAR-ERA.NET-Kooperation (ERA: European Research Area), der Europäischen Photovoltaik-Technologie-plattform, der Solar Europe Industry Initiative (SEII) im Rahmen des SET-Plans und der Normen festlegenden Internationalen Elektrotechnischen Kommission (IEC).

## **Rückblick und Bewertung 2014**

Gemessen an der Anzahl laufender Projekte mit öffentlicher Finanzierung und der gesamthaft gemeldeten Forschungsprojekte [4] kann eine anhaltende Verstärkung der Forschungsaktivitäten beobachtet werden. Diese Erhöhung ist in erster Linie auf eine Zunahme von KTI- und EU-Projekten zurückzuführen. Die zur spezifischen Förderung der Photovoltaik verfügbaren Forschungsmittel des BFE sind im Jahr 2014 beschränkt aber konstant geblieben. Die Mittel für Pilot- und Demonstrationsprojekte konnten hingegen deutlich erhöht werden und umfassen vermehrt auch pilotmässige industrielle Prozesse. 2013 ist mit Unterstützung des Staatssekretariats für Bildung, Forschung und Innovation (SBFI) das Photovoltaik-Kompetenzzentrum am Centre Suisse d'Electronique et de Microtechnique (CSEM) operativ geworden. 2014 konnte dieses seine Tätigkeiten und Projekte weiter entfalten. Damit wird die industrienahere Forschung in Hinsicht auf die Umsetzung deutlich gestärkt.

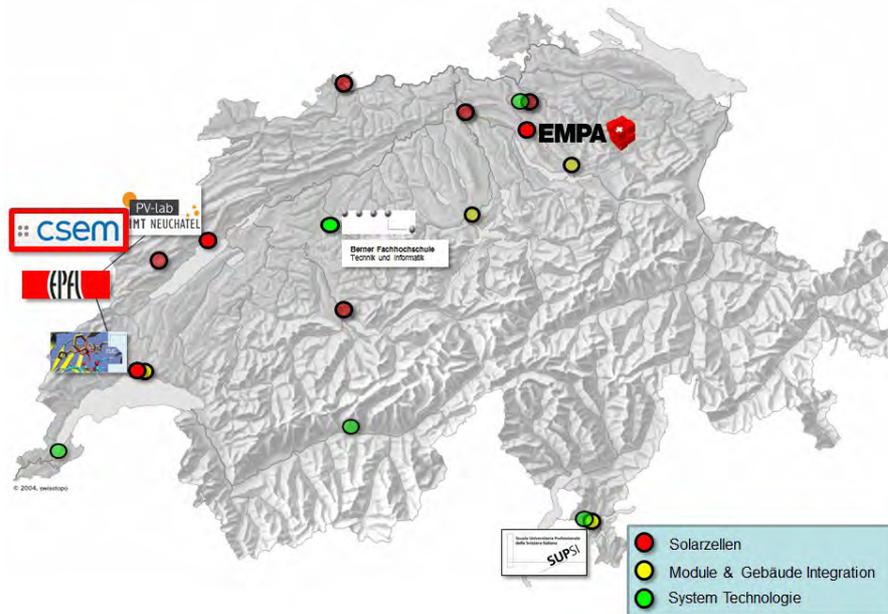
Inhaltlich sind programmübergreifend drei wesentliche Trends zu erkennen: i) die verstärkte Fokussierung auf kurz- und mittelfristig relevante Fragestellungen der Industrie (anhaltende Kostensenkung und Effizienzsteigerung, neue Prozesse und Produkte), ii) die wachsende Bedeutung von systemrelevanten Fragestellungen (z.B. Gebäude- und Netzintegration, neue Lösungen) sowie iii) langfristige Optionen in der Material- und Grundlagenforschung.

Ein nicht unwesentliches Element auf der nationalen Ebene ist der inzwischen auf mindestens 300 MW Jahreskapazität geschätzte Markt (total installierte Leistung Ende 2014 1060 MW), welcher seitens der Marktakteure zu vermehrten Kooperationen mit Forschungsinstituten und Innovationen führt. Insgesamt ist damit trotz Konsolidierung in der Industrie eine wachsende Industrietätigkeit zu verzeichnen.

## **Ausblick**

Die Schweizer Photovoltaik Forschungslandkarte (*Figur 1*) ist stark diversifiziert und gut verteilt, was ihrer wachsenden Bedeutung grundsätzlich entspricht. Die Herausforderung der Schweizer Photovoltaikforschung und -industrie für die kommenden Jahre liegt deshalb darin, international, sowohl technologisch wie produktbezogen, an vorderster Front mithalten zu können. Die Ausgangslage dazu ist grundsätzlich weiterhin sehr gut: Die Schweiz hat in verschiedenen Forschungsgebieten weltweit weiterhin führende Forschungsaktivitäten und konnte diese in den letzten Jahren deutlich verstärken. Die Industrie ist trotz schwierigen Zeiten in Bezug auf die Innovationstätigkeit weiterhin stark präsent und thematisch breit aufgestellt. Mit den verschiedenen Massnahmen zur Stärkung von Forschung und

Umsetzung entwickelt sich auch die Forschungsinfrastruktur weiter. Zusammen mit dem kontinuierlich wachsenden Markt und der zunehmenden Wettbewerbsfähigkeit sind damit die Voraussetzungen für die weitere Entwicklung sowohl wissenschaftlich und technologisch wie industriell und marktbezogen anspruchsvoll aber aussichtsreich.



Figur 1: Die Schweizer Photovoltaik Forschungslandschaft

## Forschungsinstitute und Stossrichtungen der Forschung

Die Schweizer Photovoltaik Forschungskompetenzzentren zu einzelnen Schwerpunktthemen konnten in den letzten Jahren ihre Forschungsaktivitäten vertiefen, neue Themen aufgreifen, die Industriekooperationen stärken und allgemein die Forschungsinfrastruktur ausbauen.

### *PV-LAB, EPFL, und CSEM PV Technology Center, Neuchâtel*

Das PV-Lab an der EPFL und das CSEM PV Technology Center sind eng miteinander verbunden; ersteres bearbeitet die mehr forschungsbezogenen Themen während letzteres sich mit industrienahen Fragestellungen befasst. Thematisch stand über rund 25 Jahre die Silizium Dünnschichttechnologie im Vordergrund und das Labor gehört zu den weltweit führenden Gruppen auf diesem Gebiet. In den letzten Jahren hat sich der Schwerpunkt der Aktivitäten auf Silizium-Heteroübergänge und hocheffiziente Silizium-Solarzellen verschoben, welche gegenüber den reinen Silizium Dünnschicht-Solarzellen deutlich an Bedeutung gewinnen. Dennoch ist die Erfahrung aus dem Gebiet der Dünnschicht-Solarzellen bzw. der entsprechenden, grossflächigen Depositionsverfahren hier wichtig und erfolgsentscheidend (Figur 2). Eine Reihe von Forschungsprojekten mit Unterstützung des BFE, des Schweizerischen Nationalfonds, der KTI, der Europäischen Kommission, des SBFI sowie direkten Industriemandaten befasst sich mit den neusten Entwicklungen betreffend Materialeigenschaften, Fenster- und Zwischenschichten, Kontaktierung, strukturellen Aspekten zur Lichtführung in der Solarzelle oder Fragen zur Verpackung der Solarmodule. Die besten Laborwirkungsgrade von Silizium *Hetero Junction* Solarzellen liegen hier mittlerweile zwischen 22 und 23%.

PV Lab und CSEM PV Technology Center entwickeln zudem nebst diesen neuen Solarzellentechnologien auch neue Konzepte für die Photovoltaik Gebäudeintegration. Dabei konnte das CSEM 2014 neue Verfahren zur Farbgebung von Solarmodulen vorstellen, welche selbst weisse Solarmodule ermöglichen und dabei die Ertragseinbussen in Grenzen halten (Figur 3).



Figur 2: Forschungsreaktor am CSEM Neuchâtel, (© 2014 Daniel Forster / NET Ltd.)



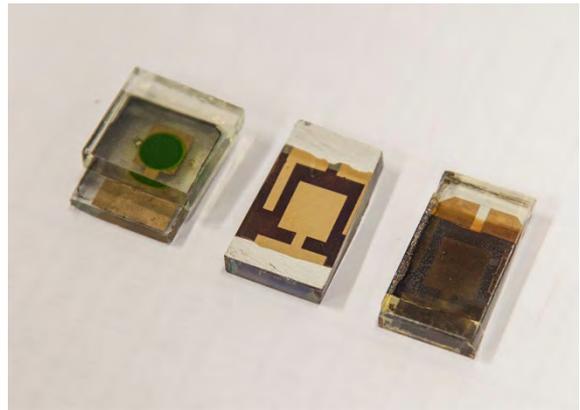
Figur 3: Vorstellung von neuen farbigen Solarmodulen des CSEM Neuchâtel, (Quelle CSEM.)

#### *Institute of chemical sciences and engineering (ISIC), EPFL, Lausanne*

Am ISIC an der EPFL ist die langjährige Forschung im Bereich der Farbstoffsolarzellen angesiedelt (Figuren 5 und 6). Diese hat in den letzten Jahren vor allem mit den neuen Entwicklungen rund um die Perowskitstrukturen weltweit Schlagzeilen gemacht. Keine andere Solarzellentechnologie hat in so kurzer Zeit so massive Fortschritte beim Wirkungsgrad erzielt wie diejenige der Perowskite. Inzwischen wurde an der EPFL ein Laborwirkungsgrad von 21% erreicht. Auf dem Weg zur Umsetzung dieser Konzepte stellen sich insbesondere Fragen der eingesetzten Materialien sowie der Stabilität der Solarzellen. Aktuelle Forschungsprojekte laufen hier vor allem mit Unterstützung der Europäischen Kommission.



Figur 4: Laborarbeiten am ISIC der EPF Lausanne (© 2014 Daniel Forster / NET Ltd.)



Figur 5: Farbstoff-Solarzellen vom ISIC der EPF Lausanne (© 2014 Daniel Forster / NET Ltd.)

#### *Empa, Dübendorf*

An der Empa in Dübendorf haben sich in den letzten Jahren zwei Stossrichtungen zu Dünnschichtsolarmodulen prominent weiter entwickelt. Zum Einen sind dies die Solarzellen auf der Grundlage der II-VI Verbindungshalbleiter CIGS und CdTe. Hier ist die Dünnschicht PV Gruppe an der Empa bei CIGS Solarzellen besonders erfolgreich. Ein Schwerpunkt liegt dabei auf CIGS Solarzellen auf flexiblen Substraten (Titelbild), wo verschiedene Weltrekorde im Wirkungsgrad erzielt wurden, zuletzt ein Wert von 20.4%. Parallel dazu wird das Verfahren in Bezug auf die Fläche hochskaliert und zusammen mit dem Unternehmen Flisom industriell umgesetzt. Entsprechende Forschungs- sowie P+D-Projekte werden vom BFE, der KTI und der Europäischen Kommission unterstützt. Zum anderen betreibt die Empa auch eine namhafte Entwicklung auf dem Gebiet der organischen Solarzellen und ist dabei für das grosse EU-Projekt *TREASURES* verantwortlich.

#### *Weitere Forschungsstellen*

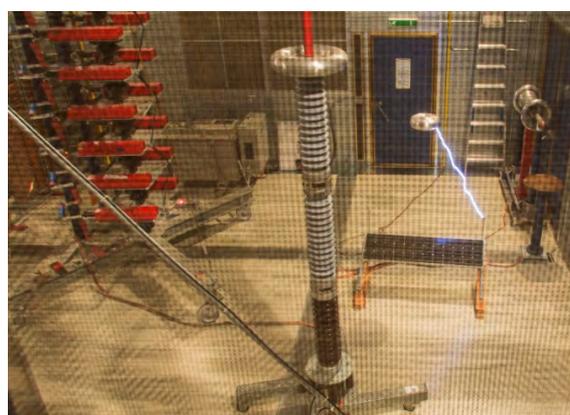
Das CSEM in Muttenz befasst sich ebenfalls mit der organischen Photovoltaik und führt dazu das grosse EU-Netzwerkprojekt *Sunflower* an. Mehr grundlagenorientierte Solarzellenforschung findet an den Universitäten Basel und Fribourg sowie an der ETH Zürich und an der Empa in Thun statt. Dabei geht es um grundlegende Aspekte der Licht Materie Wechselwirkung, neue Solarzellenkonzepte und Lumineszenzkonzentratoren.

## Fachhochschulen

Die Qualitätssicherung hat seit vielen Jahren ihren festen Stellenwert in der Photovoltaik Forschungslandschaft. Lange Tradition in der Photovoltaik hat die Scuola universitaria professionale della Svizzera italiana (SUPSI) in Lugano, wo man sich vor allem mit der Qualität und dem Verhalten von Solarmodulen und der Photovoltaik Gebäudeintegration befasst. Dazu betreibt das Istituto Sostenibilità Applicata all'Ambiente Costruito (ISAAC) eine umfangreiche Laborinfrastruktur mit Prüfständen drinnen und draussen (Figur 6). Das SPF an der Hochschule Rapperswil ergänzt diese Kompetenzen um Messungen bezüglich Schneelast sowie zu Eigenschaften von PVT-Hybridkollektoren. Eine lange Tradition hat auch das PV Labor an der BFH in Burgdorf, wo Wechselrichter und Systemtechnik im Vordergrund stehen (Figur 7). Hier steht eine leistungsfähige Infrastruktur zur Ausmessung von Wechselrichtern und PV-Anlagen. An der ZHAW in Winterthur wird ein Schwerpunkt Photovoltaik aufgebaut, welcher sich zum Einen mit der Systemtechnik, zum Andern mit Konzepten für den Modulaufbau befasst. Ergänzt wird diese Tätigkeit durch das IUNR an der ZHAW in Wädenswil, welche sich mit anlagentechnischen und umweltbezogenen Fragestellungen befasst. An der HSLU steht die Schnittstelle zum Gebäude und der Architektur im Vordergrund. Punktuelle Photovoltaik Forschungsaktivitäten verzeichnen ausserdem die HEIG-VD in Yverdon, die HEIV in Sion und das NTB in Buchs.



Figur 6: Teststand für Solarmodule am ISAAC der SUPSI in Lugano (© 2014 Daniel Forster / NET Ltd.)



Figur 7: Hochspannungslabor an der BFH in Burgdorf (© 2014 Daniel Forster / NET Ltd.)

## P+D-Projekte

Der Bereich der P+D-Projekte konnte in den letzten Jahren gestärkt werden und es finden vermehrt anwendungsorientierte Projekte statt. Diese umfassen zum Einen den pilotmässigen Aufbau von neuen industriellen Prozessen, z.B. für die Silizium *Hetero Junction* Solarzellen von Meyer Burger Research (Swiss Inno HJT Projekt, Figur 8 und 9) oder für CIGS Dünnschichtsolarzellen. Zum Anderen werden neue Lösungen und Produkte im Pilotmasstab gebaut und analysiert (Figur 10). Damit soll auch die Photovoltaik Gebäudeintegration vorangetrieben werden (Figur 11).



Figur 8: Swiss Inno HJT Pilotlinie von Meyer Burger Research in Hauterive (Quelle: Swiss Inno HJT)



Figur 9: Meyer Burger CEO Peter Pauli mit Bundesrätin Doris Leuthard an der Einweihung der Swiss Inno HJT Pilotlinie (Quelle: CSEM/Meyer Burger/Daniel Hager Photography)

## Nationale Zusammenarbeit

Im Berichtsjahr wurde die vielfältige nationale Zusammenarbeit in verschiedenen Projekten weiter intensiviert. Die Schweizer Photovoltaik Kompetenzzentren arbeiten immer häufiger in gemeinsamen, häufig themenübergreifenden Projekten zusammen, z.B. in Projekten des Kompetenzzentrum für Energie und Mobilität (CCEM) sowie neuerdings im Rahmen der Swiss Competence Centres for Energy Research (SCCERs). Damit hat sich der Austausch innerhalb der Schweizer Photovoltaik Forschungsgemeinschaft deutlich verstärkt. Die Zusammenarbeit mit Industrieunternehmen konnte ebenfalls ausgebaut werden, sowohl in neuen Projekten mit Unterstützung der KTI, als auch in der Form von direkten Mandaten der Industrie an ausgewählte Forschungsinstitute.

Auf Programmebene wurde die Zusammenarbeit mit vielen Stellen des Bundes, der Kantone und der Elektrizitätswirtschaft weiter gepflegt. Mit dem Aktionsplan Koordinierte Energieforschung, der Nano-Tera Initiative und den neuen Schwerpunktprogrammen NFP 70 und 71 des Schweizerischen Nationalfonds, dem erwähnten CSEM Photovoltaik Technologiezentrum mit Unterstützung des SBFi und der Erhöhung der BFE-Mittel für P+D Projekte haben sich wesentliche Randbedingungen für die beschleunigte Entwicklung und Umsetzung der Forschung positiv entwickelt.



Figur 10: PVT Hybridkollektoren auf der Lintharena in Näfels  
(Quelle: ZHAW Wädenswil)



Figur 11: Photovoltaik Fassadenintegration bei Flumroc in Flums (© 2014 Daniel Forster / NET Ltd.)

## Internationale Zusammenarbeit

Die institutionelle Zusammenarbeit innerhalb der IEA, der IEC und der europäischen Netzwerkprojekte wurde im Berichtsjahr kontinuierlich fortgesetzt. Auf der Projektebene konnte die Zusammenarbeit innerhalb der EU in bestehenden und neuen Projekten erfolgreich fortgesetzt werden. Im Jahr 2014 waren es 19 Projekte im 7. Rahmenforschungsprogramm der EU bzw. 4 Grundlagen-Projekte mit Unterstützung des European Research Council. Die Beteiligung am Photovoltaikprogramm der IEA (IEA PVPS) wurde im Berichtsjahr fortgesetzt, sowohl auf der Projektebene als auch im Executive Committee (ExCo).

Die Firma Nova Energie vertritt die Schweiz in Task 1 des Implementing Agreements (IA) PVPS der IEA, welcher allgemeine Informationsaktivitäten zur Aufgabe hat. Im Berichtsjahr wurde ein weiterer nationaler Bericht über die Photovoltaik in der Schweiz bis 2013 [5] ausgearbeitet. Auf dieser Grundlage wurde die 19. Ausgabe des jährlichen internationalen Berichtes (Trends Report) über die Marktentwicklung der Photovoltaik in den IEA-Ländern erstellt [6]. Im Rahmen der interdepartementalen (SECO, DEZA, BFE) REPIC Plattform zur Förderung der erneuerbaren Energien und der Energieeffizienz in der internationalen Zusammenarbeit [7] leistet das Beratungsunternehmen Entec den Schweizer Beitrag zum IA PVPS Task 9 über die Photovoltaik-Entwicklungszusammenarbeit. Dieses Projekt befasst sich mit der nachhaltigen Verbreitung der Photovoltaik in Entwicklungsländern und thematisiert auch Aspekte der solaren Wasserversorgung. Treeze vertritt die Schweiz im IA PVPS Task 12 zu Umwelt-, Sicherheits- und Gesundheitsaspekten der Photovoltaik. In diesem Projekt sollen industriell möglichst aktuelle, relevante und international abgegliche Informationen zu diesem bedeutenden Thema aufgearbeitet und publiziert werden. TNC und das ISAAC vertreten die Schweiz im IA PVPS Task 13 zu Performance und Zuverlässigkeit von Photovoltaikanlagen, welcher in der Schweiz durch den IEA PVPS Pool (aktuell getragen von ewz., Gesellschaft Mont Soleil und Swissolar) gefördert wird. Eine Arbeitsgruppe unter Leitung von Planair vertritt die Schweiz im IA PVPS Task 14 zur hohen Penetration von PV-Anlagen in elektrischen Netzen. Auch dieser Schweizer Beitrag wurde durch den IEA PVPS Pool unterstützt. Das Projekt gewinnt aufgrund des starken Wachstums

der Photovoltaik in einzelnen Ländern bzw. Regionen rasch an Bedeutung und stösst damit auf grosses internationales Interesse. Das Unternehmen Meteotest und die Groupe Energie an der Universität Genf erbringen zusammen den Schweizer Beitrag zum Task 46 Solar resource assessment and forecasting. Task 46 ist Bestandteil des IA Solare Wärme und Kälte (SHC) der IEA [8], inhaltlich ist es jedoch für alle Solartechnologien relevant. Dementsprechend erfolgt eine Zusammenarbeit mit den weiteren IA zur Solarenergie (IA PVPS und IA SolarPACES). In diesem Projekt werden die Auswirkungen von Strahlungsänderungen und Vorhersagen auf die solare Energieproduktion bei hoher Dichte von Solaranlagen sowie die Verfügbarmachung der entsprechenden Daten bearbeitet.

Basler & Hofmann vertritt die Schweiz im Auftrag von Swissolar im TC 82 der IEC zu Photovoltaik-Normen [9]. Das neue EU-Projekt SOLAR-ERA.NET [10] hat im Berichtsjahr eine zweite gemeinsame Ausschreibung (Joint Call) durchgeführt. Es umfasst neben der Photovoltaik auch die konzentrierende solarthermische Energie und soll die Umsetzung der Solar Europe Industry Initiative unterstützen. Das Projekt führt rund 20 nationale und regionale Forschungs- und Innovationsprogramme zusammen und wird durch die Schweiz (Programmleitung Photovoltaik) koordiniert. Die Schweiz ist zudem im Steuerungsausschuss der Europäischen Photovoltaik-Technologie-Plattform vertreten [11].

## Referenzen

- [1] IEA Technology Roadmap Solar photovoltaic energy, OECD/IEA (2014).
- [2] IEA Technology Roadmap Solar photovoltaic energy, OECD/IEA (2010).
- [3] Konzept der Energieforschung des Bundes 2013 bis 2016, CORE/BFE (2012).
- [4] Energieforschungsstatistik 2012, BFE (2014).
- [5] National Survey Report of PV Power Applications in Switzerland 2013, BFE (2014).
- [6] Trends in Photovoltaic Applications, Survey Report of selected IEA countries between 1992 and 2013, IEA-PVPS T1-25 (2014) ([www.iea-pvps.org](http://www.iea-pvps.org)).
- [7] Interdepartementale Plattform zur Förderung der erneuerbaren Energien und der Energieeffizienz in der internationalen Zusammenarbeit, REPIC ([www.repic.ch](http://www.repic.ch)).
- [8] IEA SHC Task 46 Solar Resource Assessment and Forecasting (<http://task46.iea-shc.org/>).
- [9] IEC TC 82 Solar photovoltaic energy systems ([www.iec.ch](http://www.iec.ch)).
- [10] ERA-NET on Solar Electricity for the Implementation of the Solar Europe Industry Initiative ([www.solar-era.net](http://www.solar-era.net)).
- [11] European Photovoltaic Technology Platform ([www.eupvplatform.org](http://www.eupvplatform.org)).

# Laufende und im Berichtsjahr abgeschlossene Projekte

<b>CHEETAH - Cost-reduction through Material Optimisation and Higher EnERgy OutpuT of SolAr PHotovoltaic Modules</b>	<b>R+D</b>	<b>3.1.2</b>
Lead: EPFL STI IMT-NE PV-LAB	Funding: EU	
Contact: Ballif Christophe christophe.ballif@epfl.ch	Period: 2014-2017	
Abstract: Developing new concepts and technologies for wafer-based crystalline silicon PV, thin-film PV and organic PV, resulting in (strongly) reduced cost of materials and increased module performance. Also fostering long-term European cooperation in the PV R&D sector. Accelerating the implementation of innovative technologies in the PV industry, by a strong involvement of EPIA and KIC InnoEnergy in the program.		
<b>CONNECT-PV - Leitfähige transparente Elektroden: ein Kompetenzcluster für hoch effiziente Dünnschicht-Solarzellen</b>	<b>R+D</b>	<b>3.1.2</b>
Lead: ZHAW - ICP	Funding: BFE	
Contact: Ruhstaller Beat ruhb@zhaw.ch	Period: 2014-2017	
Abstract: Development of highly conductive and transparent contact layers to be used in flexible thin film photovoltaics. These layers are a central requirement for the realization of low production cost, flexible solar modules. The layer deposition must be compatible with low-temperature and large-area techniques.		
<b>Thin Layers for High-efficiency Silicon Solar Cells through Ideal Coupling of Individual Components</b>	<b>R+D</b>	<b>3.1.2</b>
Lead: EPFL STI IMT-NE PV-LAB	Funding: BFE	
Contact: Ballif Christophe christophe.ballif@epfl.ch	Period: 2012-2014	
Abstract: The project focuses on the increase in efficiency of thin film silicon devices, and also contributes to developments that can be implemented for high efficiency crystalline heterojunction solar cells. The final objective is to bring new findings to the research field that provides new routes for increased module efficiencies for similar costs, without impacting the reliability.		
<b>Accelerated Development and Prototyping of Nano-technology-based High-efficiency Thin-film Silicon Solar Modules (FAST TRACK)</b>	<b>R+D</b>	<b>3.1.2</b>
Lead: EPFL STI IMT-NE PV-LAB	Funding: EU	
Contact: Ballif Christophe christophe.ballif@epfl.ch	Period: 2012-2015	
Abstract: The main project goals are the development of innovative photovoltaic cell processes and their up-scaling to the level of pilot lines. These goals should be reached in terms of stable device efficiency higher than 14% and a prototype module with stable efficiency higher than 12%.		
<b>High Rate Deposition of Microcrystalline Silicon for Solar Cell Applications by Means of a Resonant Network RF Antenna</b>	<b>R+D</b>	<b>3.1.2</b>
Lead: EPFL - CRPP	Funding: KTI	
Contact: Tran Minh Quang minhquang.tran@epfl.ch	Period: 2013-2015	
Abstract: Change from capacitively coupled plasma reactor to inductively coupled devices might reduce the cost and increase the efficiency of thin film solar cells. In the project a plasma box reactor equipped with a resonant network RF antenna will be constructed and PV related material will be aimed for. Additional equipment of the plasma reactor with a biasing electrode will allow the ion bombardment of the substrate to optimize the material properties.		
<b>High Efficiency Triple Junction Thin Film Silicon Solar Cells Implementing Amorphous Silicon Germanium Alloy (TRIGGER)</b>	<b>R+D</b>	<b>3.1.2</b>
Lead: EPFL STI IMT-NE PV-LAB	Funding: KTI	
Contact: Ballif Christophe christophe.ballif@epfl.ch	Period: 2012-2015	
Abstract: Advanced triple junction solar cell will be developed to further enhance the conversion efficiency of thin film silicon solar cells. High quality silicon germanium alloys will be synthesized on textured substrates, and implemented in the triple junction solar cells. Record devices will be developed on state-of-the-art substrates as well as on advanced electrodes.		
<b>Control of Traveling EM Waves in Large Area (VHF) PECVD Reactors for the Production of Competitive Solar Panels</b>	<b>R+D</b>	<b>3.1.2</b>
Lead: NTB Fachhochschule Buchs	Funding: KTI	
Contact: Würsch Christoph christoph.wuersch@ntb.c	Period: 2013-2014	
Abstract: This project evaluates alternative concepts for the Plasma Enhanced Chemical Vapour Deposition of silicon films deposited over large areas substrates and sustained at very high frequencies. The scientific challenge consists in avoiding the large non-uniformities of the electrical field uniformity generated by standing wave effects. Several concepts will be numerically tested and the most promising will be validated by an experimental setup.		
<b>Feasibility Study for the Atmospheric Plasma Jet Deposition of Transparent Conductive Oxide for Thin-film Solar Cell Applications (JETCO)</b>	<b>R+D</b>	<b>3.1.2</b>
Lead: EPFL STI IMT-NE PV-LAB	Funding: KTI	
Contact: Wyrsh Nicolas nicolas.wyrsh@unine.c	Period: 2012-2014	
Abstract: To investigate the possibility to use the atmospheric arc plasma jet technology developed by Swissnanocoat in order to deposit transparent conductive oxide films to be used as thin film silicon solar cells front electrodes. These films should be characterized by high transmission (above 85%), low resistivity (below 10-3 Ohm cm) and offer the possibility to achieve surface texturation for light scattering in the solar devices.		

<b>Development of Thin High-efficiency Large-area Interdigitated Back Contact Silicon Heterojunction Solar Cells for Mass Production (HET-IBC)</b>	<b>R+D</b>	<b>3.1.2</b>
Lead: EPFL STI IMT-NE PV-LAB	Funding: KTI	
Contact: Ballif Christophe christophe.ballif@epfl.ch	Period: 2012-2014	
Abstract: The HET-IBC project aims at the development of an industrial process for the manufacture of high efficiency large-area interdigitated back contact silicon heterojunction solar cells on thin Si wafers. This type of device is amongst the most promising ones for ultra-high conversion efficiencies, low production costs and easier assembly into solar modules.		
<b>Entwicklung von kristallinen Silizium-Solarzellen und -modulen mit höherem Wirkungsgrad und besserer Energieausbeute (NODHID)</b>	<b>R+D</b>	<b>3.1.2</b>
Lead: EPFL STI IMT-NE PV-LAB	Funding: Axpo Naturstrom	
Contact: Ballif Christophe christophe.ballif@epfl.ch	Period: 2011-2015	
Abstract: Entwicklung von kristallinen Silizium-Solarzellen und -modulen mit höherem Wirkungsgrad und besserer Energieausbeute		
<b>MIRROR: Development of a new PECVD Reactor for Efficient Production of High-quality Silicon Heterojunction Solar Cells</b>	<b>R+D</b>	<b>3.1.2</b>
Lead: CSEM	Funding: KTI	
Contact: Despeisse Matthieu matthieu.despeisse@cse	Period: 2014-2015	
Abstract: Feasibility demonstration of a new type of PECVD system, specifically dedicated but not restricted to the production of high-efficiency silicon heterojunction solar cells: the MIRROR reactor. Its design allowing ultra-homogeneous both sides coatings of wafers without breaking the vacuum, the fastidious handling of the substrates would be simplified, leading to higher production throughput and yield, reduced costs, to improved device performance.		
<b>High Efficiency Rear Contact Solar Cells and Ultra Powerful Modules - HERCULES</b>	<b>R+D</b>	<b>3.1.2</b>
Lead: EPFL STI IMT-NE PV-LAB	Funding: EU	
Contact: Ballif Christophe christophe.ballif@epfl.ch	Period: 2013-2016	
Abstract: To develop innovative n-type monocrystalline c-Si device structures based on back-contact solar cells with alternative junction formation, as well as related structures including hybrid concepts (homo-heterojunction). These concepts are the most promising technologies to reach ultra-high efficiencies with industrially relevant processes.		
<b>TACOS - Development and Integration of Alternative Transparent Conductive Oxides for Silicon Heterojunction Solar Cells</b>	<b>R+D</b>	<b>3.1.2</b>
Lead: CSEM	Funding: KTI	
Contact: Nicolay Sylvain sylvain.nicolay@csem.ch	Period: 2014-2016	
Abstract: To further reduce the production cost (€/Wp) and the cost of electricity (€/kWh) of silicon heterojunction solar cells and modules. Advanced transparent conductive electrodes will be developed to allow for decreased raw material costs and for increased cell efficiency. Low cost electrodes, intelligent electrical contacts based on electronic band engineering and solutions to decrease damage formation during electrode deposition will be developed.		
<b>CIGS Multi-Stage Inline Demonstration</b>	<b>P+D</b>	<b>3.1.2</b>
Lead: EMPA Dübendorf	Funding: BFE	
Contact: Tiwari Ayodhya N. ayodhya.tiwari@empa.ch	Period: 2012-2014	
Abstract: The goal of the project is to develop and demonstrate a CIGS deposition system where the innovative multi-stage co-evaporation process developed in the lab for small area substrates in static positions can be scaled up for coating on in-line moving large area substrates.		
<b>Roll-to-roll Manufacturing of High Efficiency and Low Cost Flexible CIGS Solar Modules (R2R-CIGS)</b>	<b>R+D</b>	<b>3.1.2</b>
Lead: EMPA Dübendorf	Funding: EU	
Contact: Tiwari Ayodhya N. ayodhya.tiwari@empa.ch	Period: 2012-2015	
Abstract: The aim of R2R-CIGS is to develop efficient flexible solar modules by implementing innovative cost-effective processes such that production costs below 0.5€/Wp can be achieved in large volume factories with annual capacity of 500MWp in future.		
<b>Flexible Photovoltaic Cells Optimized for High Conversion Efficiency from Indoor to Outdoor Illumination Conditions, used in New Wristwatch Products</b>	<b>R+D</b>	<b>3.1.2</b>
Lead: EMPA Dübendorf	Funding: KTI	
Contact: Tiwari Ayodhya N. ayodhya.tiwari@empa.ch	Period: 2013-2015	
Abstract: Developing flexible CIGS photovoltaic cells optimized for high conversion efficiency from low (indoor) to high (outdoor) illumination intensity, tailored for new generations of innovative wristwatch products. Includes the development of CIGS PV dials for classic wristwatches & a second generation for solar wristwatches integrating highly flexible CIGS PV cells in the bracelet with conversion efficiencies above 8% under low illumination intensity.		

<b>Performance Stability of Flexible CIGS Solar Modules</b>		<b>R+D</b>	<b>3.1.2</b>
Lead:	EMPA Dübendorf	Funding:	KTI
Contact:	Tiwari Ayodhya N. ayodhya.tiwari@empa.ch	Period:	2013-2015
Abstract:	Development of flexible CIGS solar modules for high performance and low cost are essential for diverse applications. Long term performance evaluation of encapsulated solar modules through accelerated tests and analyses of degradation and failure mechanisms on microscopic and macroscopic levels are necessary for proving improved long term performance stability and enabling market entry readiness.		
<b>Training for Sustainable Low Cost PV Technologies: Development of Kesterite Based Efficient Solar Cells</b>		<b>R+D</b>	<b>3.1.2</b>
Lead:	EMPA	Funding:	EU
Contact:	Romanyuk Yaroslav Yaroslav.Romanyuk@e	Period:	2012-2016
Abstract:	Creation of an ITN network for the structured interdisciplinary training of researchers in advanced thin film photovoltaic technologies. Proposing the development of new technologies compatible with the cost, efficiency, sustainability and mass production requirements that are needed to become a reliable and future alternative to conventional non renewable energy sources. The project will focus on the development of kesterite based solar cells.		
<b>Development and Scale-up of Nanostructured Based Materials and Processes for Low Cost High Efficiency Chalcogenide Based Photovoltaics (SCALENANO)</b>		<b>R+D</b>	<b>3.1.2</b>
Lead:	SUPSI ISAAC	Funding:	EU
Contact:	Virtuani Alessandro alessandro.virtuani@sup	Period:	2012-2015
Abstract:	This project will exploit the potential of chalcogenide based thin film photovoltaic technologies for the development and scale-up of new processes based on nano-structured materials for the production of high efficiency and low cost photovoltaic devices and modules compatible with mass production requirements.		
<b>NovaZolar</b>		<b>R+D</b>	<b>3.1.2</b>
Lead:	EMPA Dübendorf	Funding:	BFE
Contact:	Tiwari Ayodhya N. ayodhya.tiwari@empa.ch	Period:	2014-2016
Abstract:	To develop an innovative, low-cost process of in-situ monitored aqueous solution deposition of the ZnO-based buffer-window combination for high-efficiency CIGS solar cells. The novelty is to use a single deposition technique – CBD – for depositing the Cd-free window-buffer combination that should ultimately replace the present CdS buffer by CBD followed by the sputtered i-ZnO/Al:ZnO window. A solar efficiency of > 20% is targeted.		
<b>Combining Macroscopic and Microscopic Characterization of Recombination Losses in High Efficiency CIGS Solar Cells</b>		<b>R+D</b>	<b>3.1.2</b>
Lead:	EMPA Dübendorf	Funding:	SNF
Contact:	Tiwari Ayodhya N. ayodhya.tiwari@empa.ch	Period:	2014-2017
Abstract:	Recently our group at Empa reported a 20.4% conversion efficiency world record for thin film solar cells based on Cu(In,Ga)Se <sub>2</sub> (CIGS) light absorbing layers. This efficiency of flexible solar cell on polymer film surpasses the efficiency of solar cells on glass and matches to the long back established benchmark efficiency of polycrystalline Si wafer based solar cells.		
<b>Novel Environmentally Friendly Solution Processes Nanomaterials for Panchromatic Solar Cells</b>		<b>R+D</b>	<b>3.1.2</b>
Lead:	EPFL ISIC-LPI	Funding:	EU
Contact:	Graetzel Michael michael.graetzel@epfl.ch	Period:	2013-2015
Abstract:	To replace titania with a novel electron accepting nanoporous semiconductor with a bandgap suitable for optimized solar harnessing and a very high absorption coefficient to allow total light absorption within 2 um across its absorption spectrum. In addition the deposition of the nanostructured platform will employ processing below 200oC, compatible with plastic, flexible substrates and cost-effective roll-to-roll manufacturing.		
<b>MESOLIGHT - Mesoscopic Junctions for Light Energy Harvesting and Conversion</b>		<b>R+D</b>	<b>3.1.2</b>
Lead:	EPFL	Funding:	ERC
Contact:	Graetzel Michael michael.graetzel@epfl.ch	Period:	2010-2015
Abstract:	Research will focus on the generation of electric power by mesoscopic solar cells. The target is to increase the photovoltaic conversion efficiency from currently 11 to over 15 percent rendering these new solar cells very attractive for applications in large areas of photovoltaic electricity production.		
<b>UPCON - Ultra-Pure Nanowire Heterostructures and Energy CONversion</b>		<b>R+D</b>	<b>3.1.2</b>
Lead:	EPFL	Funding:	ERC
Contact:	Anna Foncuberta i Morral anna.foncuberta-	Period:	2010-2014
Abstract:	This project is devoted to the synthesis of ultra pure semiconductor nanowire heterostructures for energy conversion applications in the photovoltaic domain.		

<b>Transparent Electrodes for Large Area, Large Scale Production of Organic Optoelectronic Devices</b>			<b>R+D</b>	<b>3.1.2</b>
Lead:	EMPA Dübendorf	Funding:	EU	
Contact:	Nüesch Frank frank.nuesch@empa.ch	Period:	2011-2015	
Abstract:	TREASORES will demonstrate the production of large area organic electronics using high throughput manufacturing technologies based on roll-to-roll (R2R) wet deposition processes.			

<b>Sustainable Novel Flexible Organic Watts Efficiently Reliable</b>			<b>R+D</b>	<b>3.1.2</b>
Lead:	CSEM MuttENZ	Funding:	EU	
Contact:	Nisato Giovanni giovanni.nisato@csem.ch	Period:	2011-2015	
Abstract:	Organic PV provide a key opportunity for the EU to further establish its innovation base in alternative energies offering the benefits of flexibility, low weight, and freedom of design. OPV operates under low light conditions and is shadow tolerant. These advantages and the ease of handling in subsequent product-integration processes will enable the development of consumer and portable electronics and building-integrated photovoltaic products.			

<b>Luminescent Solar Concentrators - Gewinnung elektrischer Energie aus Tönungen für Fensterscheiben und Fassadenelemente</b>			<b>R+D</b>	<b>3.1.2</b>
Lead:	Optical Additives GmbH	Funding:	BFE	
Contact:	Andreas Kunzmann andreas.kunzmann@opti	Period:	2013-2015	
Abstract:	Mit dem Projekt soll das Konzept des Lumineszenzkonzentrators für die Bedingungen in Aussenanwendungen, insbesondere in Fenstern und Fassaden, weiter entwickelt werden. Dabei stehen lichtstabile Farbstoff-Zeolithen im Vordergrund, welche eine angemessene Langzeitstabilität erreichen.			

<b>Diamond: Discovery and Insight with Advanced Models of Nanoscale Dimensions</b>			<b>R+D</b>	<b>3.1.2</b>
Lead:	ETH Zürich	Funding:	ERC	
Contact:	VandeVondele Joost joost.vandevondele@ma	Period:	2011-2016	
Abstract:	The goals are providing and establishing new tools that will allow for the description of large multi-component/multi-phase systems at experimental temperature and pressure with predictive power and controlled error.			

<b>Light-In, Light-Out: Chemistry for Sustainable Energy Technologies (LiLo)</b>			<b>R+D</b>	<b>3.1.2</b>
Lead:	Uni Basel Institut für Anorganische Chemie	Funding:	ERC	
Contact:	Constable Edwin Charles Edwin.Constable@uniba	Period:	2011-2016	
Abstract:	The project is concerned with a coordinated approach to the development of novel chemical strategies for light harvesting by photovoltaic cells and light generation using light emitting electrochemical cells.			

<b>Systems for Ultra-high Performance Photovoltaic Energy Harvesting (SYNERGY)</b>			<b>R+D</b>	<b>3.1.2</b>
Lead:	EPFL STI IMT-NE PV-LAB	Funding:	BFE	
Contact:	Ballif Christophe christophe.ballif@epfl.ch	Period:	2014-2017	
Abstract:	This project aims to realize PV energy harvesting systems based on tandem solar cells with efficiencies beyond those achievable with state-of-the-art industrial single-junction cells by combining the unique technological components – record cells absorbing various parts of the solar spectrum – recently realized by Swiss research institutes.			

<b>Global Solar Spectrum Harvesting through Highly Efficient Photovoltaic and Thermoelectric Integrated Cells - GLOBASOL</b>			<b>R+D</b>	<b>3.1.2</b>
Lead:	EPFL ISIC-LPI	Funding:	EU	
Contact:	Graetzel Michael michael.graetzel@epfl.ch	Period:	2013-2016	
Abstract:	GLOBASOL will develop new concepts, materials and devices for advanced light harvesting and light management for a panchromatic collection of the solar energy and an unprecedented power conversion efficiency. This will be accomplished by integrating in a single device three light-to-electricity converters, exploiting different regions of the solar spectrum based on sensitized mesoscopic solar cells, photonic crystals, thermoelectric cells.			

<b>Neuentwickelte Festkörper Solarzellen auf Sefar Präzisionsgeweben</b>			<b>R+D</b>	<b>3.1.2</b>
Lead:	EPFL ISIC-LPI	Funding:	KTI	
Contact:	Graetzel Michael michael.graetzel@epfl.ch	Period:	2014-2015	
Abstract:	EPFL and Sefar AG have developed a novel metal wire precision fabric electrode for the use in cheaper dye sensitized solar cell modules, leading to high efficiencies of over 6%. Those modules employed a liquid electrolyte which is lacking robustness important for the expected long lifetimes of these devices. The aim is to carry our technology over to more robust solid state dye sensitized solar cell modules in the extension of this project.			

<b>Novel Production Equipment for Novel Photovoltaic Module Designs Using New Encapsulants</b>		<b>R+D</b>	<b>3.1.2</b>
Lead:	EPFL STI IMT-NE PV-LAB	Funding:	KTI
Contact:	Ballif Christophe christophe.ballif@epfl.ch	Period:	2012-2014
Abstract:	The main target of this project is the development and the market launch of novel laminating lines optimized for the production of PV modules based on novel module designs using new encapsulants.		
<b>SmartWire - Development of Multi-wire Module Design Technology and Production Equipment</b>		<b>R+D</b>	<b>3.1.2</b>
Lead:	CSEM	Funding:	KTI
Contact:	Despeisse Matthieu matthieu.despeisse@cse	Period:	2013-2015
Abstract:	The project goals are the development of a new generation of crystalline silicon (c-Si) solar cells interconnection technology, the design of an associated module technology and the prototyping of dedicated high-end production equipment, which can allow for modules with increased efficiency (> 5 % relative gain) and reduced manufacturing cost (> 10 % relative reduction) for state-of-the-art as well as for high efficiency c-Si cell technologies.		
<b>CONSTRUCT PV - Constructing Buildings with Customizable Size PV Modules Integrated in the Opaque Part of the Building Skin</b>		<b>R+D</b>	<b>3.1.2</b>
Lead:	SUPSI ISAAC	Funding:	EU
Contact:	Frontini Francesco francesco.frontini@supsi.	Period:	2013-2017
Abstract:	The final goal of Construct-PV is to obtain BIPV modules that are targeting the expected performances described in SEII with respect to the module efficiency range and applicable to at least 80% of the buildings in a urban environment.		
<b>Produktentwicklung Solar Device</b>		<b>R+D</b>	<b>3.1.2</b>
Lead:	NTB	Funding:	KTI
Contact:	Gutsche Martin martin.gutsche@ntb.ch	Period:	2010-2012
Abstract:	In diesem Projekt wird die Technologie der hocheffizienten textilen Photovoltaik bis zur Produktionsreife weiterentwickelt. Diese Produktentwicklung wird die Markteinführung von textiler Photovoltaik beschleunigen.		
<b>Swiss Inno HJT: Pilot Production and Demonstration of Innovative High Performance Silicon Hetero-junction PV Cells, Modules and Systems</b>		<b>P+D</b>	<b>3.1.2</b>
Lead:	Meyer Burger Research AG	Funding:	BFE
Contact:	Strahm Benjamin benjamin.strahm@meyer	Period:	2013-2017
Abstract:	Eine innovative Produktionsanlage für verbesserte PV-Zellen basierend auf der/einer Silikon-Heterojunction-Technologie (HJT) wird installiert und demonstriert. Das Potenzial für den Einstieg in den internationalen Markt von hochleistungs-Silikon-Heterojunction-PV-Zellen, -Modulen und Systemen wird aufgezeigt.		
<b>SUNLITE - Colored Solar Tiles Based on Composite Structures for Cost-Effective Building Integrated Photovoltaics</b>		<b>R+D</b>	<b>3.1.2</b>
Lead:	EPFL - IMX - LTC, Lausanne	Funding:	KTI
Contact:	Manson Jan-Anders jan-	Period:	2014-2016
Abstract:	The objective of SUNLITE is to develop novel colored solar tiles for cost-effective building integrated photovoltaics with reduced payback time. The new tiles (size 0.6 m x 0.4 m) will be based on high efficiency silicon cells, a new polymer composite backing and an interferential colored front encapsulation glass. A pilot series of colored solar tiles will be produced and installed on a roof demonstrator for 1 year monitoring.		
<b>Hub of Application Laboratories for Equipment Assessment in Laser Based Manufacturing - APPOLO</b>		<b>R+D</b>	<b>3.1.2</b>
Lead:	EMPA Dübendorf	Funding:	EU
Contact:	Tiwari Ayodhya N. ayodhya.tiwari@empa.ch	Period:	2013-2017
Abstract:	The objective of the project is to establish and coordinate connections between end-users, which have demand on laser technologies for (micro) fabrication; knowledge accumulated in the application laboratories of research institutes and universities and the laser equipment manufacturers. To facilitate faster validation of the process feasibility and adaptation of the equipment for manufacturing, as well as assessment of the production processes.		
<b>Demonstration at Industrial Scale of the FLExible Manufacturing of SMART Multifunctional Photovoltaic Building Elements - SMART-FLEX</b>		<b>R+D</b>	<b>3.1.2</b>
Lead:	SUPSI ISAAC	Funding:	EU
Contact:	Frontini Francesco francesco.frontini@supsi.	Period:	2013-2016
Abstract:	To demonstrate the multi-functional glass/glass PV building element as plug & play AC device for safe and easy installation into building electricity system. Demonstration of such device will cover both levels: (i) demonstration of flexibility and adaptability of manufacturing the customised design PV building elements, allowing harmonious integration in buildings and (ii) demonstration of such BIPV products in the building envelope.		

<b>Integrierte Messplattform für OLED und Solarzellen R&amp;D</b>		<b>R+D</b>	<b>3.1.2</b>
Lead:	ZHAW - ICP	Funding:	KTI
Contact:	Pernstich Kurt kurt.pernstich@zhaw.ch	Period:	2014-2015
Abstract:	To extend the Paios measurement system to be able to elucidate the physics of solar cells at cryogenic temperatures and also at elevated temperatures for life-time studies. To integrate the simulation software and the measurement hardware into a turn-key solution so that the various measurements performed with Paios can be simulated with Setfos at the press of a button.		
<b>Optimization of Thin Film Module Testing and PV Module Energy Rating at SUPSI</b>		<b>R+D</b>	<b>3.1.2</b>
Lead:	SUPSI ISAAC	Funding:	BFE
Contact:	Friesen Gabi gabi.friesen@supsi.ch	Period:	2011-2014
Abstract:	This project aims to improve the measurement accuracy for thin film technologies through the definition of new test procedures and the up-grade of the test equipment.		
<b>Tools for Enhanced Photovoltaic System Performance</b>		<b>R+D</b>	<b>3.1.2</b>
Lead:	SUPSI ISAAC	Funding:	EU
Contact:	Chianese Domenico domenico.chianese@sup	Period:	2012-2015
Abstract:	The Performance Plus project focuses on the PV system rather than on the component level. The main idea of the project is to optimise the system as a whole rather than the separate components.		
<b>Caractérisation des modules photovoltaïques à colorant de l'entreprise g2e</b>		<b>P+D</b>	<b>3.1.2</b>
Lead:	HEIG-VD	Funding:	BFE
Contact:	Affolter Jean-François jean-	Period:	2012-2014
Abstract:	A solar simulator for measuring the performance of solar panels based on dye sensitised solar cells is going to be realized. The panels will be installed in real conditions and monitored over a complete year, in order to characterize and have the necessary perspective on this new technology and product.		
<b>Photovoltaik im Verbund mit Dämmstoff Foamglas</b>		<b>P+D</b>	<b>3.1.2</b>
Lead:	Basler & Hofmann AG	Funding:	BFE
Contact:	Eric Langenskiöld eric.langenskiold@basl	Period:	2010-2013
Abstract:	The scope of this project is the development and realisation of building integrated photovoltaic (BIPV) including the feature of thermal insulation. A pilot plant with modules combined of photovoltaic modules and Foamglas insulation shall be build.		
<b>Neuartiges Leichtbau Photovoltaik System, das die Doppelnutzung von Flächen im urbanen Bereich für die Erzeugung von erneuerbarer Energie ermöglicht</b>		<b>R+D</b>	<b>3.1.2</b>
Lead:	ZHAW IEFÉ	Funding:	KTI
Contact:	Baumgartner Franz franz.baumgartner@zha	Period:	2013-2014
Abstract:	Entwicklung eines Leichtbau-Solarkraftwerks mit einerseits neuartigen Meteo Algorithmen zur Sicherstellung der Robustheit und Minimierung der Ertragsverluste und andererseits Machbarkeitsabklärungen (einschliesslich Konzeptstudie) für ein Leichtbau-Tragwerk unter Verwendung von Faserverbundkunststoff Hybrid-Bauelementen.		
<b>Produktentwicklung PV/T Solarkollektor mit Installationssystem</b>		<b>R+D</b>	<b>3.1.2</b>
Lead:	Hochschule für Technik Rapperswil HSR	Funding:	KTI
Contact:	Rommel Matthias matthias.rommel@solare	Period:	2011-2014
Abstract:	The project goal is to develop a low-temperature unglazed PV/T collector and a specially tailored installation system. The starting points for the development are standard Meyer Burger PV modules for the collector and available market components for the installation system. This product should be optimized for use in low-temperature building technology.		
<b>PV Fassaden - Entwicklung und Prüfung von vorgehängten hinterlüfteten Fassaden aus PV Modulen und perforiertem Metall</b>		<b>R+D</b>	<b>3.1.2</b>
Lead:	HTA Luzern	Funding:	KTI
Contact:	Wittkopf Stephen stephen.wittkopf@hslu.c	Period:	2013-2015
Abstract:	Im Rahmen dieses Projekts werden neuartige hinterlüftete Photovoltaik Fassaden Module (PV-FM) entworfen, hergestellt und getestet. Sie bestehen aus einer Kombination von PV-Modulen und Lochblechen zur Verwendung in Fassaden und Steildächern. Ziel ist es, PV-FM zu entwickeln, die einen architektonischen Mehrwert bieten und so die Akzeptanzbarrieren bei der Verwendung im öffentlichen Raum überwinden.		

<b>SmartGrid Eich (SGE) - Regelung von PV-Anlagen statt Netzausbau</b>		<b>P+D</b>	<b>3.1.2</b>
Lead:	Basler & Hofmann AG	Funding:	BFE
Contact:	Bucher Christof christof.bucher@baslerh	Period:	2014-2016
Abstract:	In der Überbauung „Eich“ in Frenkendorf wurden rund 165 kWp PV-Anlagen gebaut. Das heutige Verteilnetz kann jedoch nur 75 kVA aufnehmen. Als Sofortmassnahme wurden die maximale Einspeiseleistung aller Photovoltaik-Anlagen statisch begrenzt. Dadurch resultiert ein jährlicher Energieertragsverlust von ca. 6%. In dem Projekt „SmartGrid Eich“ sollen die Photovoltaik-Anlagen dynamisch geregelt und der Ertragsverlust ohne Netzausbau reduziert werden.		
<b>PVT-Solkraftwerk Lintharena-sgu: Strom und Wärme vom Dach</b>		<b>P+D</b>	<b>3.1.2</b>
Lead:	ZHAW Life Sciences and Facility Management	Funding:	BFE
Contact:	Rohrer Jürg rohu@zhaw.ch	Period:	2014-2019
Abstract:	Auf dem Dach der Lintharena-sgu (Sportzentrum mit Hallen- und Freibad, Mehrfachturnhalle, Kletterwand, Restaurant, Hotel, Sauna, Fitness, usw.) wird eine PVT- und eine PV-Anlage installiert. Der PVT-Teil der Anlage erzeugt neben Strom auch Wärme. Diese Wärme wird zum Vorheizen des Grundwassers der Wärmepumpen genutzt. Durch diese Kombination erzielen die Solarmodule einen höheren Stromertrag und die Wärmepumpen benötigen weniger Strom.		
<b>Solkraftwerke über Schweizer Kläranlagen: Realisierung Pilotanlage zur Klärbeckenüberspannung ARA Chur</b>		<b>P+D</b>	<b>3.1.2</b>
Lead:	IBC Energie Wasser Chur	Funding:	BFE
Contact:	Thalmann Franco M. franco.thalmann@ibchur.	Period:	2014-2016
Abstract:	Die konsequente Doppelnutzung von Klärbeckenflächen zur Solarstromproduktion bietet sich im Rahmen der Energieeffizienzoptimierung und der Erhöhung des Eigenstromproduktionsanteil auf ARA's an. Ein neues Anlagenkonzept zur Überspannung von Klärbecken soll im Rahmen dieses Projektes realisiert und dessen Integration in den ARA-Betrieb erprobt werden.		
<b>Potentialevaluation der Kombination Solarthermie und Wärmepumpe und Betriebsoptimierung mittels Monitoring einer Grossanlage solar regenerierter Erdsondenfelder</b>		<b>P+D</b>	<b>3.1.2</b>
Lead:	Hochschule für Technik Rapperswil HSR	Funding:	BFE
Contact:	Rommel Matthias matthias.rommel@solare	Period:	2014-2019
Abstract:	Ein Heizungssystem (Wärmepumpe, Erdsondenfeld und PV/T-Niedertemperatursolaranlage) wird mit einem Mess- und Monitoringsystem ausgestattet und ausgemessen. Im Projekt werden die Daten ausgewertet, die Systemintegration der PV/T-Anlage in der Gebäudetechnik optimiert, Langzeiterfahrungen zur solarthermischen Regeneration von Erdsondenfeldern gesammelt und die bestehende Gesamtanlage regelungstechnisch optimal abgestimmt.		
<b>Entwicklung von Tools zur Ertragsoptimierung von grossen Photovoltaikanlagen mit komplexer Geometrie</b>		<b>R+D</b>	<b>3.1.2</b>
Lead:	ZHAW Life Sciences and Facility Management	Funding:	KTI
Contact:	Rohrer Jürg rohu@zhaw.ch	Period:	2014-2018
Abstract:	Entwicklung von Tools zur Winterstrom-Optimierung von grossen PV-Anlagen, bei denen die PV-Module stark unterschiedliche Ausrichtungen und insbesondere steile Anstellwinkel aufweisen. Die Optimierung berücksichtigt neben Albedo-Effekten auch die direkte Reflexion von z.B. Seen oder Schnee, den Anteil Morgen-/Abend- bzw. Winterstrom, Sichtbarkeit der Anlage, Blendwirkung, usw.		
<b>Langzeit-Messung von PV-Anlagen</b>		<b>R+D</b>	<b>3.1.2</b>
Lead:	BFH Burgdorf	Funding:	Diverse
Contact:	Muntwyler Urs urs.muntwyler@bfh.ch	Period:	2012-2016
Abstract:	Das PV Labor führt Langzeit-Messungen an unterschiedlichen PV-Anlagen durch und dokumentiert damit das längerfristige Verhalten dieser Anlagen.		
<b>Prüfstand für Multistring Solarwechselrichter</b>		<b>R+D</b>	<b>3.1.2</b>
Lead:	BFH Burgdorf	Funding:	BFE
Contact:	Muntwyler Urs urs.muntwyler@bfh.ch	Period:	2013-2015
Abstract:	The goal of this project is the development and construction of a low EMI test bench for research and testing of multistring PV inverters. The test bench shall be able to simulate three independent sub arrays with open circuit voltages of up 1'000V and maximum power of 11.52kW each. The thermal stability of the generated I/V characteristics shall be sufficiently high to allow measurements of the inverter's MPP tracking accuracy.		
<b>Photovoltaïque et neige: Horizon des solutions pour l'installation sur les toits dans les régions enneigées</b>		<b>P+D</b>	<b>3.1.2</b>
Lead:	Planair SA	Funding:	BFE
Contact:	Perret Lionel lionel.perret@planair.ch	Period:	2011-2014
Abstract:	Seven different photovoltaic fields and three snow clearing solutions were implemented. Measures on different parameters such as production and consumption of each field will occur during the winters of 2012, 2013 and 2014. The evaluation of the measures will enable to determine snow impact and compare different photovoltaic technologies and snow clearing solutions.		

<b>High Concentration Photovoltaic Thermal System using Low-Cost Innovative Materials</b>		<b>R+D</b>	<b>3.1.2</b>
Lead:	NTB Fachhochschule Buchs	Funding:	KTI
Contact:	André Bernard andre.bernard@ntb.ch	Period:	2013-2016
Abstract:	Developing of a high efficiency cost-competitive High Concentration PhotoVoltaic Thermal (HCPVT) system able to convert 80% of the collected solar energy in useful electrical and thermal energy at a Levelized Cost of Energy (LCOE) between 0.07 and 0.1 \$/KWh when industrialised. Such system will exploit novel materials in the field to attain a low-cost very large dish-like concentrator and a high performance receiver suited for mass-production.		
<b>Deicing von Photovoltaikanlagen</b>		<b>R+D</b>	<b>3.1.2</b>
Lead:	NTB Fachhochschule Buchs	Funding:	KTI
Contact:	Egli Roland roland.egli@ntb.ch	Period:	2013-2014
Abstract:	Wegen der erhöhten Strahlungsintensität ist Photovoltaik in den Alpen sehr attraktiv. Durch das Einschneien der Anlagen kann jedoch nicht das gesamte Potential ausgeschöpft werden. Mit der Entwicklung einer Lösung zur Schneefremdung von Photovoltaikanlagen kann der Jahresertrag wesentlich erhöht werden. Zudem kann die Gefahr von Dachlawinen sowie die Zerstörung von PV-Anlagen und Gebäuden reduziert werden.		
<b>Akkreditierung des Solarwechselrichter-Testverfahren für Forschungsplattform</b>		<b>P+D</b>	<b>3.1.2</b>
Lead:	Berner Fachhochschule HTI	Funding:	BFE
Contact:	Muntwyler Urs urs.muntwyler@bfh.ch	Period:	2014-2017
Abstract:	Der PV-Wechselrichterprüfstand des PV LAB der BFH-TI wird ausgebaut und akkreditiert, um so in der Schweiz der erste und einzige Wechselrichterprüfstand dieser Art zu sein. Dadurch können auch in der Schweiz Dienstleistungen wie Wirkungsgrad und EMV Prüfungen angeboten und zudem mit Hilfe der Infrastruktur in Schulungen, Kurse usw. PV-Wissen übermitteln werden. So wird die PV-Branche mit einem Kompetenzzentrum für PV-Systemtechnik unterstützt.		
<b>Module Integrated Multi-MPP-Tracker Microinverter System (MMPPT-MI)</b>		<b>R+D</b>	<b>3.1.2</b>
Lead:	Berner Fachhochschule HTI	Funding:	KTI
Contact:	Muntwyler Urs urs.muntwyler@bfh.ch	Period:	2013-2015
Abstract:	A PV microinverter will be developed, optimized & tested. This microinverter uses a novel patented architecture in which each of the 3 substrings of a PV module is tracked & converted separately. This leads to a better performance of the inverter under conditions of partial shading. The inverter uses a new connector interface, it can be directly connected to the back of the module without a junction box, enabling a simple to install AC PV-module.		
<b>Smart Energies: Next-Generation Leitsystemkonzept mit mobilen Informations-Technologien zur Einbindung dezentraler Erzeuger erneuerbarer Energien wie Photovoltaik in Schweizer Energieverteilnetze</b>		<b>R+D</b>	<b>3.1.2</b>
Lead:	HTA Luzern	Funding:	KTI
Contact:	Meier René rene.meier@hslu.ch	Period:	2014-2016
Abstract:	Erforscht ein innovatives Gesamtkonzept für eine neue Generation von intelligenten Leitsystemen zur Einbindung dezentraler Erzeuger erneuerbarer Energien (PV & Wind) in unsere Energieverteilnetze. Die aus dem Zubau erneuerbarer Energien resultierende markant gestiegene Komplexität der Verteilnetze soll durch verbesserte Effizienz bei Arbeitsabläufen durch Einsatz von richtungsweisenden intelligenten Informationstechnologien vereinfacht werden.		
<b>Schweizer Beitrag IEA PVPS Task 1</b>		<b>R+D</b>	<b>3.1.2</b>
Lead:	Nova Energie GmbH	Funding:	BFE
Contact:	Hüsser Pius pius.huesser@novaener	Period:	2014
Abstract:	IEA PVPS Task 1 befasst sich mit Informationsaufgaben zum Stand der Photovoltaik in den Mitgliedländern des IEA PVPS Programms. Dazu leistet dieses Projekt den Schweizer Beitrag, insbesondere zur Entwicklung von Industrie und Markt sowie des regulatorischen Kontextes.		
<b>Schweizer Beitrag IEA PVPS Task 12 - 2014 Ökobilanzen von Solarstrom</b>		<b>R+D</b>	<b>3.1.2</b>
Lead:	Treeze GmbH	Funding:	BFE
Contact:	Frischknecht Rolf frischknecht@treeze.ch	Period:	2014
Abstract:	IEA PVPS Task 12 befasst sich mit Umweltaspekten der Photovoltaik ausgehend von Analysen in den Mitgliedländern des IEA PVPS Programms. Dazu leistet dieses Projekt den Schweizer Beitrag, insbesondere zur Lebenszyklusanalyse (LCA) von PV-Systemen.		
<b>Schweizer Beitrag IEA PVPS Task 13</b>		<b>R+D</b>	<b>3.1.2</b>
Lead:	TNC Consulting AG	Funding:	IEA PVPS Pool
Contact:	Nordmann Thomas nordmann@tnc.ch	Period:	2013-2014
Abstract:	IEA PVPS Task 13 befasst sich mit Performance und Zuverlässigkeit von PV-Komponenten und PV-Anlagen in den Mitgliedländern des IEA PVPS Programms. Mit diesem Projekt wird der Schweizer Beitrag zu diesem neuen internationalen Vorhaben vorbereitet.		

<b>Schweizer Beitrag IEA PVPS Task 13 - 2013/2014 - Performance and Reliability of PV Systems</b>		<b>R+D</b>	<b>3.1.2</b>
Lead:	SUPSI ISAAC	Funding:	IEA PVPS Pool
Contact:	Rudel Roman roman.rudel@supsi.ch	Period:	2014-2015
Abstract:	IEA PVPS Task 13 befasst sich mit Performance und Zuverlässigkeit von PV-Komponenten und PV-Anlagen in den Mitgliedsländern des IEA PVPS Programms. Mit diesem Projekt wird der Schweizer Beitrag zu diesem neuen internationalen Vorhaben vorbereitet.		
<b>Schweizer Beitrag IEA PVPS Task 14 - High Penetration of PV Systems in Electricity Grids (Swiss Contribution)</b>		<b>R+D</b>	<b>3.1.2</b>
Lead:	Planair	Funding:	IEA PVPS Pool
Contact:	Renaud Pierre pierre.renaud@planair.c	Period:	2010-2014
Abstract:	The main purpose of Task 14 is to analyze the role of grid connected PV as an important source in electric power systems on a high penetration level where additional efforts may be necessary to integrate the dispersed generation in an optimum manner. The aim of these efforts is to reduce the technical barriers to achieve high penetration levels of distributed renewable systems on the electric power system.		
<b>Solar Resource Assessment and Forecasting, IEA Solar Heating &amp; Cooling Programme, Task 46</b>		<b>R+D</b>	<b>3.1.2</b>
Lead:	Meteotest	Funding:	BFE
Contact:	Remund Jan jan.remund@meteotest.c	Period:	2011-2016
Abstract:	In the framework of IEA Solar Heating and Cooling (SHC) Task 46, Meteotest investigates the possibilities and quality of global radiation forecast, the trend of recent global radiation data and distribution of atmospheric aerosols.		
<b>Normenarbeit für PV Systeme</b>		<b>WTT</b>	<b>3.1.2</b>
Lead:	Basler & Hofmann AG	Funding:	BFE
Contact:	Toggweiler Peter peter.toggweiler@basler	Period:	2007-
Abstract:	Normen sind ein wichtiges Instrument zur Qualitätssicherung sowie zum sicheren und zuverlässigen Betrieb von PV-Anlagen. Das Projekt umfasst den Schweizer Beitrag zu den entsprechenden Arbeiten im IEC Technischen Komitee 82.		
<b>SOLAR-ERA.NET: ERA-NET on Solar Electricity for the Implementation of the Solar Europe Industry Initiative</b>		<b>R+D</b>	<b>3.1.2</b>
Lead:	NET AG	Funding:	EU
Contact:	Nowak Stefan stefan.nowak@netenerg	Period:	2012-2016
Abstract:	A network that brings together more than 20 RTD & innovation programmes in the field of solar electricity technologies in the European Research Area. The network of national & regional funding organisations has been established in order to increase transnational cooperation between RTD and innovation programmes and to contribute to achieving the objectives of the Solar Europe Industry Initiative (SEII) through dedicated transnational activities.		
<b>REPIC Interdepartementale Plattform zur Förderung der erneuerbaren Energien und der Energieeffizienz in der internationalen Zusammenarbeit</b>		<b>P+D</b>	<b>3.1.2</b>
Lead:	NET AG	Funding:	diverse
Contact:	Nowak Stefan stefan.nowak@netenerg	Period:	2011-2017
Abstract:	Die Interdepartementale REPIC Plattform zur Förderung der erneuerbaren Energien und der Energieeffizienz in der internationalen Zusammenarbeit pflegt den Informations- und Erfahrungsaustausch und fördert erfolgversprechende Projekte in der internationalen Zusammenarbeit.		
<b>High Efficiency Perovskite Solar Cells</b>		<b>R+D</b>	<b>3.1.2</b>
Lead:	EPFL SB ISIC LPI	Funding:	KTI
Contact:	Nazeeruddin Mohammad mdkhaja.nazeeruddin@e	Period:	2014-2016
Abstract:	This CTI projects aims at developing a novel low cost thin film photovoltaic device: the perovskite mesoscopic solar cell. This technology pioneered at the EPFL-LPI gives 15 % efficiency in the laboratory and uses extremely small amount of active materials. The production process is based on printing technology, thus allowing for a exceptionally low cost module competing with any other known solar cell technology (< 0.3 €/Wp).		
<b>Modellbasierte Zustandsüberwachung und Regelung für den hocheffizienten Waferschneidprozess</b>		<b>R+D</b>	<b>3.1.2</b>
Lead:	FHNW, Hochschule für Technik, Windisch	Funding:	KTI
Contact:	Anderegg Roland roland.anderegg@fhnw.c	Period:	2015-2016
Abstract:	Die Waferschneidtechnik ist ein zentraler Prozess der Herstellung innovativer Solartechnologie. Im Rahmen des Projektes wird eine innovative Prozessüberwachungs- und regelungstechnik entwickelt, welche die nachhaltige und ressourceneffiziente Waferproduktion ermöglicht.		

**Novel reflective layer allowing a control of the quality of the microcrystalline solar cell in thin film Micromorph devices**

**R+D**

**3.1.2**

Lead:	Haute école ARC, La-Chaux-de-Fonds	Funding:	KTI
Contact:	Keppner Herbert	Period:	2011-2014
herbert.keppner@he-			
Abstract:	The project aims to create an innovative smoothening reflective layer SRL that will be inserted between the top and bottom cell of a Micromorph tandem device deposited on as-grown thick highly textured LPCVD ZnO layer.		

## Solarzellen

---

F. Sculati-Meillaud, E. Moulin, J.-W. Schüttauf, M. Morales, S. De Wolf, C. Bücher, C. Ballif	27
<b>Thin layers for High-Efficiency Silicon Solar Cells through Ideal Coupling of Individual Components</b> – SI/500750 / SI/500750-01	
B. Niesen, J. Werner, A. Walter, P. Löper, A. Dabirian, S. Martin de Nicolas, M. Morales Masis, S. De Wolf, S.J. Moon, J.H. Yum, S. Nicolay, J. Bailat, W. Tress, S. Zakeeruddin, M. Grätzel, L. Kranz, S. Buecheler, A.N. Tiwari, C. Ballif	37
<b>SYNERGY - Systems for Ultra-High Performance Photovoltaic Energy Harvesting</b> – SI/501072 / SI/501072-01	
F.-J. Haug, E. Moulin, C. Ballif	45
<b>FASTTRACK – Accelerated Development and Prototyping of Nano-Technology based High Efficiency Thin Film Silicon Solar Modules</b> – FASTTRACK / 283501	
S. De Wolf, S. Martin de Nicolas, J. Geissbuehler, J. Seif, N. Holm, C. Ballif	50
<b>HERCULES - High Efficiency Rear Contact Solar Cells and Ultra Powerful Modules</b> – FP7-608498 / HERCULES	
N. Wyrsh, S. de Wolf, C. Ballif	55
<b>CHEETAH - Cost-Reduction through Material Optimisation and Higher EnErgy Output of SolAr PHotovoltaic Modules</b> – FP7-609788 / CHEETAH	
B. Paviet-Salomon, A. Tomasi, S. Martin de Nicolas, N. Holm, S. De Wolf, A. Descoedres, M. Despeisse, C. Ballif, D. Lachenal, B. Legradic, B. Strahm	60
<b>HET-IBC - Development of Thin High-Efficiency Large-Area Interdigitated Back-contacted Silicon Heterojunction Solar Cells for Mass Production</b> – KT113348.1	
J. Geissbühler, S. De Wolf, C. Ballif	68
<b>NODHID - Thin Film on Crystalline Silicon: Novel Cell and Module Designs for High Energy Density Photovoltaics</b> – NODHID	
J.W. Schüttauf, F.-J. Haug, C. Ballif	73
<b>TRIGGER - High Efficiency Triple-Junction Thin Film Silicon Solar Cells Implementing Amorphous Silicon-Germanium Alloys</b> – KT113333.1	
J. Steinhauser, Y. Romanyuk, A.N. Tiwari	76
<b>Solution Deposited ZNO-Based Front Contacts for CIGS Solar Cells</b> – SI/501100 / SI/501100-01	
B. Bissig, F. Pianezzi, P. Reinhard, S. Buecheler, A.N. Tiwari	81
<b>Combining Macroscopic and Microscopic Characterization of Recombination Losses in High Efficiency CIGS Solar Cells – How to Reach the Theoretical Limit?</b> – SNF200021 / 149453	
S. Buecheler, P. Reinhard, T. Jäger, A.N. Tiwari	84
<b>R2R-CIGS - Roll-to-Roll Manufacturing of High Efficiency and Low Cost Flexible CIGS Solar Modules</b> – R2R-CIGS / 283974	

F. Pianezzi, S. Buecheler, A.N. Tiwari	88
<b>Flexible Photovoltaic Cells Optimized for High Conversion Efficiency from Indoor to Outdoor Illumination Conditions, used in New Wrist-Watch Products</b> – KT115166.1	
J. Perrenoud, S. Buecheler, A.N. Tiwari, B. Keller, R. Kern	91
<b>Performance Stability of Flexible CIGS Solar Modules</b> – KT112800.3	
S. Haaß, Y. Romanyuk, A.N. Tiwari	95
<b>KESTCELLS - Training for Sustainable Low Cost PV Technologies: Development of Kesterite Based Efficient Solar Cells</b> – KESTCELLS - 316488	
S. Buecheler, A.N. Tiwari, A. Burn	101
<b>APPOLO - Hub of Application Laboratories for Equipment Assessment in Laser Based Manufacturing</b> – FP7-609355 / APPOLO	
A. Virtuani	104
<b>SCALENANO - Development and Scale-Up of Nanostructured Based Materials and Processes for Low Cost High Efficiency Chalcogenide Based Photovoltaics</b> – SCALENANO - 284486	
T. Lanz, B. Ruhstaller	111
<b>CONNECT-PV - Conductive Transparent Electrodes: a Competence Cluster for Highly Efficient Thin Film Photovoltaics</b> – SI/501099 / SI/501099-01	
G. Nisato	114
<b>SUNFLOWER - Sustainable Novel Flexible Organic Watts Efficiently Reliable</b> - SUNFLOWER / FP7-287594	



# THIN LAYERS FOR HIGH-EFFICIENCY SILICON SOLAR CELLS THROUGH IDEAL COUPLING OF INDIVIDUAL COMPONENTS

## Annual Report 2014

Author and Co-Authors	F. Sculati-Meillaud, E. Moulin, J.-W. Schüttauf, M. Morales, S. De Wolf, C. Bücher, C. Ballif
Institution / Company	EPFL, IMT, PV-Lab
Address	Rue de la Maladière 71b, CP 526, CH-2002 Neuchâtel 2
Telephone, E-mail, Homepage	+41 21 695 43 18, <a href="mailto:fanny.sculati-meillaud@epfl.ch">fanny.sculati-meillaud@epfl.ch</a> , <a href="http://pvlab.epfl.ch">http://pvlab.epfl.ch</a>
Project- / Contract Number	SI/500750 / SI/500750-01
Duration of the Project (from – to)	01.03.2012-28.02.2015
Date	15.12.2014

### ABSTRACT

This project is divided into six axes which all contribute to reaching higher efficiency thin film silicon multi-junction solar cells, with parallel application of the new processes to high efficiency crystalline Si cells. Key deposition parameters should be identified that permit to achieve high quality absorber layers, while the interfaces should be improved by developing and testing new types of layers, with e.g. innovative dopants. Furthermore, since the absorber layer thickness is typically below 3  $\mu\text{m}$ , an efficient light management and opto-electrical coupling is necessary. The last axis is dedicated to updating and improving the infrastructure park and setting up reliable characterization tools.

The last year, very high short-circuit current density were achieved in amorphous silicon solar cells thanks to a detailed screening of the material properties undertaken the previous years. In microcrystalline silicon, the use of fluorinated precursors led to the development of a new type of absorber layer microstructure, with larger grains and enhanced absorption in the near infrared. A clear impact of excitation frequency on the microcrystalline silicon absorber layer quality and density was demonstrated, offering further insights into a topic debated for years in the scientific community.

On the multi-junction level, further developments were undertaken to improve light management via dedicated doped and buffer layers leading to reduced parasitic absorption, combined with an efficient light trapping via optimum textures either at the front or at the back of the device. A world record efficiency of 12.6% was achieved for a micromorph tandem, while 12.8% could be reached in triple-junction configuration. First tests of quadruple junctions were also done providing insights on the roadmap to follow to reach stabilized efficiencies above 14% with already available building blocks.

In parallel several of the layers developed in this project were applied and tested in crystalline silicon heterojunction solar cells, including ZnO layers as electrode material. Efficiencies as high as 22.4% were achieved with the standard design, while back-contacted silicon heterojunction solar cells demonstrated conversion efficiencies above 21%. Furthermore, alloyed buffer layers ( $\text{SiO}_x$ ) showed a more favorable temperature coefficient than standard amorphous silicon, which makes them appealing for elevated temperatures conditions, as can e.g. be reached in modules exposed outdoor.

## Goals of the project

The primary goal of this project is to develop high-efficiency thin-film silicon solar cells and adapted layers for high efficiency crystalline c-Si solar cells. For this purpose, improvements are required in: (i) material deposition techniques, (ii) layers – but also interface – quality and (iii) light harvesting. However, this is not sufficient and an adequate coupling of the sub-cells in a multi-junction configuration is also mandatory. Furthermore, two additional thematics also need to be addressed: the reliability and characterization, which are the key bases of scientific progress, and regular update of the infrastructure to remain competitive. For the final year of the project, emphasis was on demonstrating the potential of thin-film silicon multi-junction cells to reach > 13% stable efficiencies.

## Short project description

Before summarizing the project, we should mention that after a tremendous development of thin-film silicon in the year 2007-2010, followed by a ramp-up phase the following 2 years, many companies were then not able to compete with the very low selling price of crystalline silicon modules. Many companies thus went bankrupt or stopped their thin-film silicon activities, including Flexcell and TEL Solar in Switzerland. While the potential of thin-film silicon as low cost technology was demonstrated by production costs low as 0.35 €/W<sub>p</sub>, the major limitation is the conversion efficiency (8-10% at module level, versus 16-20% for crystalline silicon). Further increasing the conversion efficiencies, as addressed in this project, is thus a key point for this technology. The fact that it is possible was recently demonstrated by TEL Solar (Truebbach) with certified full area stabilized efficiency of 12.3% (1.43 m<sup>2</sup>). The structure of the project is summarized in Fig 1, with 6 work packages, all interacting together.

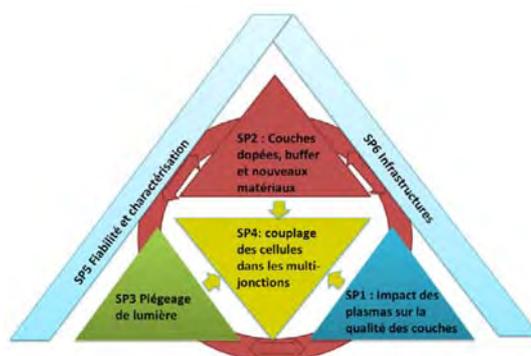


Figure 1: Summary of work packages of the SFOE-EPFL PV-Lab project

## Work performed and results achieved in 2014

While the first 2 years of the project mainly focused on getting a better general understanding on e.g. the link between the plasma processes and the material quality or on ways to improve light harvesting, this third and last year mainly dealt with combining all developments together, with high efficiency baselines for devices ranging from single-junction to triple-junctions solar cells. In particular, after the world record obtained by PV-Lab end of 2012 for a single-junction microcrystalline silicon solar cell, a certified record of 12.6% was achieved this year in micromorph tandem configuration. These outstanding results have clearly benefited from the developments made within this project and which are presented hereafter.

### 1. Impact of plasma conditions on the quality of silicon thin films

#### 1.1 Development of new a-Si materials and study of their stability

Following the study on the impact of process parameters (pressure, frequency, power) on the properties of intrinsic amorphous silicon layers, very high short-circuit current density a-Si:H solar cells could be achieved. Figure 1 shows the external quantum efficiency (EQE) measurement of a single-junction a-Si:H solar cell, incorporating a 300-nm-thick absorber layer, of 1.2 cm<sup>2</sup>. Such solar cells yield a short-circuit current density (J<sub>sc</sub>) of 18.2 mA/cm<sup>2</sup> with open-circuit voltage (V<sub>oc</sub>) and fill factor (FF) values of 880 mV and 72%, resp. Similar structure with a 1000-nm-thick absorber layers provides an even higher J<sub>sc</sub> of 19.51 mA/cm<sup>2</sup> and shows the potential to achieve more than 20 mA cm<sup>2</sup> by applying a reverse bias voltage. More details on processes and developments can be found in [1].

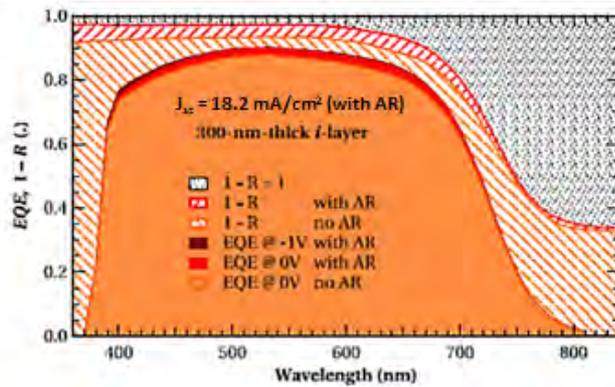


Figure 2. EQE and 1-reflectance (1-R) measurements of an a-Si:H single-junction solar cell with a 300-nm thick intrinsic layer, providing a short-circuit current density of 18.2 mA/cm<sup>2</sup> with an anti-reflective coating (AR).

### 1.2 Realization of $\mu$ c-Si:H layers with very high absorption

Use of fluorinated precursor during microcrystalline silicon deposition is seen as promising, based on the work of e.g. J.-C. Dornstetter et al [2], to produce highly crystalline microcrystalline silicon layers (> 90%) with large grains. Electron microscopy measurements indeed evidenced the presence of large grains (of ~ 100 nm of width) but also that of structural defaults, such as porous zones and stacking faults within the grains. Even though solar cells  $V_{oc}$  values remained lower than expected, probably because of these defaults, very high short-circuit current densities could be achieved with a remarkable response in the near infrared part of the spectrum. This can be seen in Fig. 2, for example, which shows the EQE of a micromorph tandem incorporating a fluorinated microcrystalline silicon bottom cell.

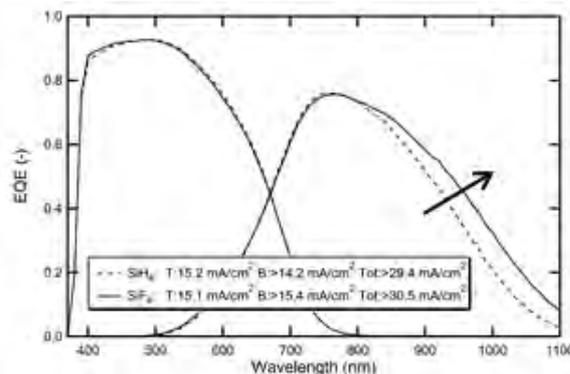


Figure 3. EQE curves, and corresponding top (T), bottom (B), and total (Tot) current densities of two tandems with a 250-nm-thick a-Si:H top cell, a 3.1- $\mu$ m-thick, highly crystallized, bottom cell absorber layer deposited either from SiH<sub>4</sub> or SiF<sub>4</sub>-based plasmas with a 70-nm-thick IRL. The increased absorption in the near infrared, indicated by an arrow, corresponds to a gain of 1.1 mA/cm<sup>2</sup>.

### 1.3 Effect of excitation frequency on material quality

We examined the role of the excitation frequency on  $\mu$ c-Si:H material quality in thin-film silicon solar cells, by comparing VHF (40.68 MHz) and RHF (13.56 MHz). We demonstrated that this latter provides better solar cells for moderate growth rates of around 5 Å/s or less [3]. While both frequencies allow for the growth of very good bulk material quality, as assessed by Fourier-Transform Photocurrent Spectroscopy measurements, the efficiencies of the cells prepared using 40.68 MHz are, in the range of our study, typically lower for growth rates up to 5 Å/s. This observation clearly suggests that another parameter besides the bulk material quality governs carrier transport in solar cells prepared using VHF. Electron microscopy measurements indeed evidenced the fact that, for similar bulk quality, the absorber layer deposited at 13.56 MHz is denser than that deposited at 40.68 MHz. However, in turn, VHF sustains better material quality at larger growth rate on rough substrates (such as a rough front electrode or, in the case of a tandem, after the a-Si:H top cell), leading to higher solar cells efficiency. The general trend of the efficiency with absorber layer growth rate is schematically depicted in Fig. 4.

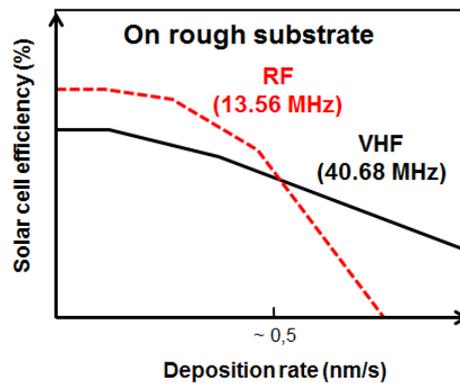


Figure 4. Schematic of the general trend for  $\mu\text{c-Si:H}$  single-junction solar cell conversion efficiency as a function of growth rate, at 13.56 MHz (RF) and 40.68 MHz (VHF), when deposited on a substrate favorable to porous zones creation. For low growth rates, RF provides both a high quality and dense material, while at higher growth rate VHF sustains a better bulk quality, see detailed study in [3].

## 2. Novel doped and buffer layers

### 2.1 Buffer layers based on novel alloys (SiGe/C/N/O)

Silicon oxide buffer layers have been successfully incorporated in both a-Si:H [1, 4] and  $\mu\text{c-Si:H}$  solar cells [5], and are used in state-of-the-art devices at the moment. In a-Si:H cells, a-SiC:H buffer layers were also applied in cells incorporating a wide-bandgap absorber layer [6], as e.g. to be used as top cell in quadruple-junction solar cells.

### 2.2 Sets of doped and buffer layers for the fabrication of record tandem and triple devices on rough substrates

In tandem devices, virtually the same doped and buffer layers as in the corresponding single-junction devices are used. Very important in tandem cells, however, is the application of a high-quality intermediate reflector between the top and the bottom cell. As the top cell suffers from light-induced degradation, it is of crucial importance to keep the absorber layer as thin as possible while still achieving a high current density. A high-quality intermediate reflector can significantly help to this end. We have fabricated such layers (n-type  $\text{SiO}_x$ ) with an excellent quality that were subsequently applied in tandem devices [7]. The refractive index of the films can be varied in a very straightforward manner, namely by varying the  $\text{CO}_2$  flux only. In figure 5, the wavelength-dependent refractive index for three different 70-nm-thick layers with varying  $\text{CO}_2$  flow is shown.

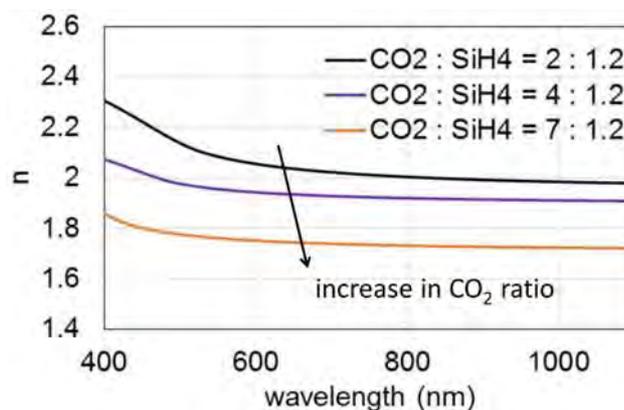


Figure 5.  $\text{SiO}_x$ -based intermediate reflector layers with varying refractive index [7].

Then, Figure 6 shows the EQE achieved for tandem cells incorporating these layers, plus a reference without any intermediate reflector. The tandem device fabricated with the highest  $\text{CO}_2$  flow in these series had a stabilized, independently confirmed, conversion efficiency as high as 12.63% ( $V_{\text{OC}} = 1.38$  V;  $J_{\text{SC}} = 12.83$   $\text{mA/cm}^2$ ; FF = 71.3%), corresponding to a new world record [7]. This record was only very recently overtaken by the National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST) with a certified tandem efficiency of 12.8%, as announced at the last World PV Conference [8].

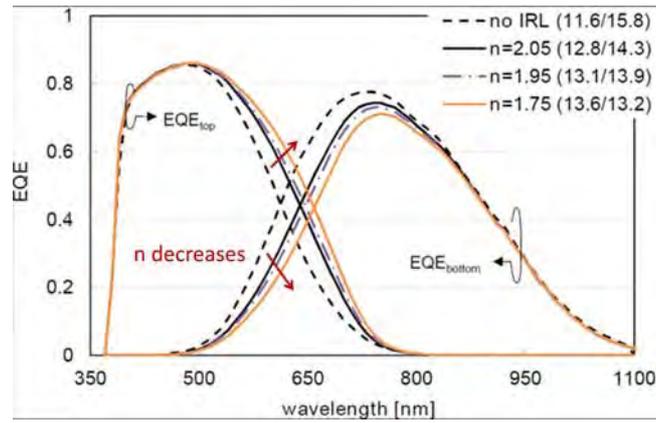


Figure 6. EQE curves (initial) of tandem cells employing the intermediate reflector layers presented in figure 5.

For triple-junction cells in a-Si:H/ $\mu$ c-Si:H/ $\mu$ c-Si:H configuration [9], no specific intermediate reflector was applied between top and middle cell. In this case, the top cell thickness is only 140 nm and both middle and bottom cell absorber layers consist of  $\mu$ c-Si:H, which does not degrade upon light-soaking. In a-Si:H/a-SiGe:H/ $\mu$ c-Si:H triple-junction cells, on the other hand, the use of an intermediate reflector after the middle cell is crucial as the a-SiGe:H middle cell absorber significantly suffers from light-induced degradation. Furthermore, the incorporation of an intermediate reflector allows (i) the use of thinner middle cell absorbers as well as (ii) the use of a lower Ge-content, leading to higher  $V_{OC}$  and FFs. Our best Ge-based triple-junctions cell was achieved using the same intermediate reflector layer type as in the record tandem cell, but with a thickness of 115 nm [10].

### 2.3 Application of doped and buffer layers to fabricate a-Si:H/c-Si heterojunction solar cells with efficiencies exceeding 22%

a-Si:H/c-Si heterojunction solar cells with an efficiency of 22.4% were fabricated employing standard a-Si:H doped and buffer layers [11]. However, alloyed buffer layers ( $SiO_x$ ) were demonstrated to have a more favorable temperature coefficient [12], which makes them an appealing alternative for elevated temperatures conditions (as typically achieved for modules in the field). Furthermore, back-contacted silicon heterojunction solar cells with conversion efficiencies up to 21.5% were reported with a high short-circuit current density close to 40 mA/cm<sup>2</sup> and an open-circuit voltage exceeding 720 mV [13].

## 3. Light trapping

### 3.1 Development of indium-free TCO layers

ZnSnO layers, deposited by rf-sputtering, were developed with the aim of achieving indium-free TCOs with optimal opto-electrical properties for heterojunction-cell applications [14]. Also, since these layers are amorphous with a smooth and conformal surface, we can envisage using them as front electrodes in thin-film silicon solar cells by combining them with chemically-textured or nano-imprinted glass substrates. The optimized layer properties are presented in the following Table 1 for as-grown and treated films (in an H<sub>2</sub> plasma).

Table 1: Summarized opto-electrical properties of the developed ZnSnO films

ZTO Co-sputtered	n (cm <sup>-3</sup> )	$\mu$ (cm <sup>2</sup> /Vs)	$\rho$ ( $\Omega$ cm)	$\sigma$ ( $\Omega^{-1}$ cm <sup>-1</sup> )	Absorption (%)	Transmission (%)
as-deposited	5 x 10 <sup>19</sup>	13	9 x 10 <sup>-3</sup>	110	4% (visible range)	80% (visible range)
+ H2 plasma treated	1.3 x 10 <sup>20</sup>	13	3.8 x 10 <sup>-3</sup>	263	~5% (visible range)	80% (visible range)

### 3.2 Mobility improvement of LPCVD-ZnO:B electrodes

Two approaches were adopted in order to improve the mobility of ZnO films. The first is based on growing larger grains at nucleation, thereby allowing a reduction of electron scattering at grain boundaries. A clear understanding of the influence of growth parameters on grain size has been gained [15]. The second approach is related to post-deposition treatments, where a maximum mobility of 60 cm<sup>2</sup>/Vs was achieved for undoped ZnO treated by H<sub>2</sub>-plasma [16].

### 3.3 Front and rear electrodes optimized with respect to the developed Si layers

Further work was carried out on the implementation of metallic back reflectors in thin-film silicon solar cells as alternatives to the traditionally used dielectric white-paint back reflector. A systematic study was made regarding the impact of the back reflector design with respect to the front-electrode morphology. We demonstrated that the fill factor value increases when replacing our conventional 5- $\mu\text{m}$ -thick ZnO/white-sheet back reflector by a thin layer of ZnO combined with silver [17]. Also, light-trapping properties of thin-film silicon solar cells were improved with the latter back reflector design – especially in the case of smooth front electrodes. While an efficiency gain from 8.9% to 9.4% was achieved for 1.1- $\mu\text{m}$ -thick  $\mu\text{c-Si:H}$  solar cells using the newly optimized combination of smooth front electrode and silver back reflector, this increase was even larger for thicker absorber layers. Fig. 7 indeed illustrates the EQE boost obtained in the near-infrared spectral range for 2.3- $\mu\text{m}$ -thick cells applying the modified back reflector. The corresponding I-V parameters are listed in Table 2 showing an increase in conversion efficiency from 9.1% to 10.2% (for cells with no antireflective coating).

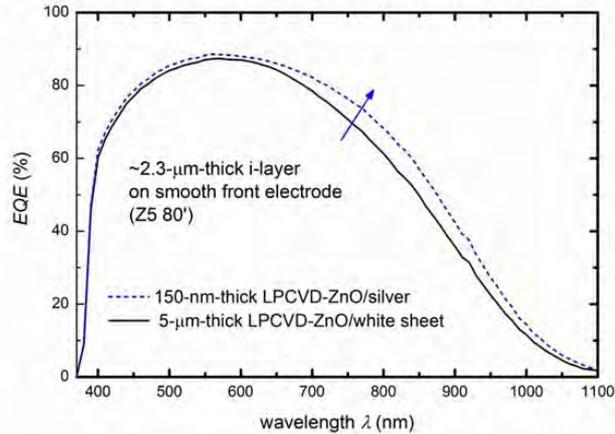


Figure 7: EQE of  $\mu\text{c-Si:H}$  cells with the conventional dielectric-based (solid line) and silver-based (dashed line) back reflector scheme.

Table 2: I-V parameters of the corresponding  $\mu\text{c-Si:H}$  cells

Back reflector scheme	$J_{sc}$ (mA/cm <sup>2</sup> )	$V_{oc}$ (mV)	FF (%)	Efficiency (%)
5- $\mu\text{m}$ -thick LPCVD-ZnO/white sheet	25.1	535	68.0	9.1
150-nm-thick LPCVD-ZnO/Ag	26.5	534	72.0	<b>10.2</b>

### 3.4 Best TCOs for hetero-junction cells

While LPCVD-ZnO:B films are commonly employed as TCOs in thin-film silicon solar cells, ITO (tin-doped indium oxide) and AZO (Al-doped zinc oxide) are those generally used in hetero-junction devices. However, ZnO was also tested in hetero-junction solar cells in order to (i) circumvent the possible damaging of the silicon layers induced by the sputtering process and (ii) take advantage of the high deposition rate of LPCVD ZnO:B (~4 nm/s) as compared to sputtered TCOs (typically below 1 nm/s). Some of the results can be found in [18].

## 4. Coupling in multijunction devices

### 4.1 Incorporation of best substrates and doped layers to realize stabilized efficiencies above 13.5% in tandem or triple-junction configuration

We have been so far able to fabricate tandem devices with an initial efficiency as high as 14.1% [19], tandem devices with a stabilized efficiency of 12.6% [7] and triple-junction devices with an initial efficiency of 13.7% and a stabilized efficiency of 12.8% (same cell) [9]. To go to even higher efficiencies, several approaches have been tested, of which the use of novel textures has been the most prominent, with textures ranging from 2-D periodic single textures to multi-scale textures for use as front electrode in multi-junction solar cells. This approach has been motivated by the recent world records obtained on the so-called “honeycomb” textures [8] and by the excellent results on double textures [20]. For micromorph tandem solar cells, we showed that 2-D gratings with the proper geometric parameters can provide cell efficiencies as high as those obtained with our state-of-the-art ZnO. We also highlighted the complementary roles of 2-D gratings and ZnO in double textures: similar results as those achieved with our state-of-the-art front electrode were obtained for significantly reduced ZnO layer thickness. Finally, by combining sub-micrometer ZnO layers with an optimized “U”-shaped modulated textured glass superstrate provided by Delft University of Technology (TU Delft), we were able to surpass the efficiency provided by our standard front electrode. The beneficial effect of this novel texture is ascribed to its smooth, growth-friendly surface morphology – granting excellent electrical properties – and also to its outstanding light-trapping ability (as revealed in the EQEs of Fig. 8). For triple-junction devices, similar tests are currently being performed.

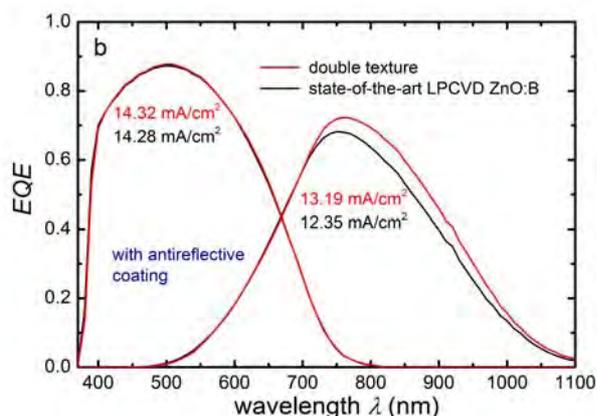


Figure 8: EQE of micromorph tandem cells deposited on the double-textured front electrode (red) and on our state-of-the-art 2.3- $\mu\text{m}$ -thick ZnO front electrode (black).

### 4.2 Final integration with 15.5% initial and 13.8% stable efficiency and demonstration of the potential to reach 15% stable with multi-junctions devices

Use of multi-junctions with at least 3 sub-cells is one of the keys to achieve stabilized efficiencies over 14%. While AIST recently reported a stabilized efficiency of 13.7% for triple-junction devices [8], we demonstrated a roadmap for quadruple-junction cells to obtain stabilized efficiencies above 14% with building blocks currently available in the lab [10, 21]. Exchanges with other laboratories, permitting to combine the best building blocks available in the world, would then be necessary to go one step further.

## 5. Reliability and Characterization

### 5.1. Metastability of micromorph tandems

Dark degradation of microcrystalline cells was already identified in 2012 as one of the main issue for long-term stability of this material. Water vapor ingress is responsible for this metastability and tests were performed in Damp Heat (DH) conditions (85°C, 85%) as accelerated procedure. Similarly, micromorph tandems were put in DH and we demonstrated that the metastability of the device is clearly linked to the density of the microcrystalline silicon absorber layer. In case of high density  $\mu\text{c-Si:H}$  material, such as achieved at RF frequency and low growth rate, the micromorph cell does not show a significant performance degradation with DH conditions [3]. However, we should mention that part of the metastability can also arise from the intermediate reflector layer and this latter must also be dense [7].

## 5.2 Water ingress as a function of encapsulant material

Reliability of photovoltaic modules and components is a topic of high interest in the community, since modules are expected to stay outside for more than 20 years with limited power loss. The impact of moisture ingress on long-term performance is, in particular, a key point. Different parameters contribute to the possible failure of modules with humidity: the type and formulation of the encapsulant material, the module design (e.g. either glass/glass or glass/backsheet) and the climate corresponding to the location where the module is set. We could in particular simulate, with 2-D finite element method (FEM) the water ingress as a function of encapsulant type in a glass/glass module located in a cool and humid climate such as Neuchâtel, see also [22]. Fig. 9 shows the expected water concentration as a function of time, for a one year period, in a module encapsulated with three different materials: two Ethyl Vinyl Acetate (EVA) of different formulations and one polyolefin-based encapsulant material.

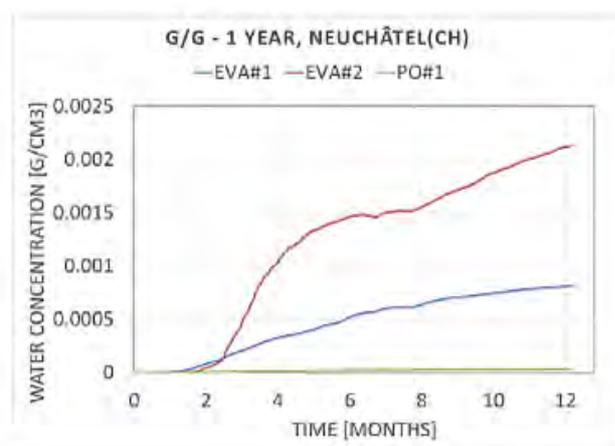


Figure 9. 2-D FEM simulations of water concentration as a function of encapsulant material within a glass/glass module: for two Ethyl Vinyl Acetate (EVA) of different formulations (EVA#1 and EVA#2) and one polyolefin-based (PO#1) encapsulant material.

Fig. 9 shows that the polyolefin-based encapsulant presents a much lower (almost none) simulated moisture ingress as compared to both EVAs. Still, the water concentration within the module encapsulated with EVA#1 is also lower by a factor  $\sim 2$  as compared to that of the module encapsulated with EVA#2, demonstrating the crucial role of encapsulant formulation on water barrier properties.

## 5.2 Accelerated degradation with 3-sun illumination system

As already mentioned in a previous report, a 3-sun (and even up to 5-suns) illumination system, based on LEDs only, has been designed and fabricated for accelerated degradation purpose. Indeed, amorphous silicon suffers from the well-known Staebler-Wronski effect, which corresponds to performance degradation upon light-soaking. The advantage of this set-up is its higher intensity (typical degradation set-ups work at 1 sun illumination) and the use of different LED types which offers flexibility in the spectrum range from 400 to 750 nm. Furthermore, the simulator is completed with an  $I(V)$  measurement setup and a temperature controlled sample stage that allows for standard characterization but also for performance tracking during light soaking. Further details on this set-up can be found in [23].

## 6. Brief infrastructure overview

Following the move of PV-Lab offices to a new building (Microcity) end of 2013, all the characterization and deposition equipments were momentarily stopped in February and gradually set back in service. An intense activity has taken place to restart the laboratory with upgrade facilities (new scrubber, gas boxes, chemical hoods, ...). During the long-ramp up times, support was provided by CSEM PV-center for TCO's and metallic coating preparation, as well as for based PECVD processes, both for thin film Si cells and heterojunction solar cells.

## National and international collaborations

Regular academic contact/scientific and sample exchanges were maintained both with national and international entities (ETH Zürich, Zürich University of Applied Sciences, CSEM Neuchâtel, EMPA, Forschungszentrum Jülich, Helmholtz Zentrum Berlin, Academy of Science Prague, University of Delft, Energy Research Center Netherlands, Berkeley University and National Laboratories, Caltech,

National University of Singapore, AIST Japan. Strong exchanges now also take place with the newly created CSEM PV-center, for TCO and crystalline silicon based solar cells developments, as well as regarding module reliability, where the fundamental aspects are studied at PV-Lab.

PV-Lab is involved in several European projects (Fast Track, Flex-o-Fab, Pliant, Hercules, CHEETAH, Next Buildings) as well as national projects (CCEM Connect-PV, Nanoterra, SNF projects). Furthermore, two NRP project started end of this year: the first one, PV 2050, addresses the topic of multi-junctions solar cells based on various combination of thin films (chalcogenides, perovskites, novel dye sensitized devices) or including a bottom crystalline cells with the potential to reach conversion efficiencies close to 30%. The second one, Active Interfaces, tackles the main obstacles that have so far limited the full deployment of PV integrated in the building environment

A strong synergy exists between most of these projects and this running SFOE project. In addition, collaborations with industrial partners have been ongoing, either in the frame of CTI projects or through direct mandates, e.g. with TEL Solar, Roth & Rau Research AG, Meyer Burger, Indeotec, Air Liquid, Pasan.

## Perspectives for the next months

In the next 3 months, preceding the end of this project, PV-Lab will focus on further combining all the know-how and developments of the last years to push thin film silicon and crystalline based silicon solar cells efficiency to their limit. On the level module, studies will continue on water ingress with the aim to correlate outdoor measurements and simulations.

## Acknowledgements

All the PV-Lab collaborators, who contributed to the results presented in this report, are warmly acknowledged. The support from the bachelor and master students, as well as from the civil service participants is also acknowledged. We also thank A. Hessler, M. Dadras and M. Leboeuf for assistance and support in electron and scanning probe microscopy.

## References

- [1] M. Stuckelberger et al., J. Appl. Phys **116** (2014) 094503.094503, 2014
- [2] J.-C. Dornstetter et al., IEEE Journal of Photovoltaics **3** (1) (2013), 581
- [3] G. Bugnon, PhD thesis
- [4] M. Stuckelberger et al., Accepted for publication in Prog. Photovolt: Res. Appl.: DOI: 10.1002/pip.2559
- [5] G. Bugnon et al., Sol. Energy Mater. Sol. Cells **120** (2014),143
- [6] M. Stuckelberger, Ph.D. Thesis EPFL (2014).
- [7] M. Boccard et al., IEEE J. Photovolt. **4** (6) (2014),1368
- [8] H. Sai et al., Presented at WCPEC (2014)
- [9] J.W. Schüttauf et al., IEEE J. Photovolt **4** (2014), 757.
- [10] J.W. Schüttauf et al., Sol.Energy Mater. Sol. Cells **133** (2015), 163
- [11] S. Martin de Nicolas, Presented at TCM 2014
- [12] J. Seif et al., J. Appl. Phys. **115** (2014), 024502
- [13] A. Tomasi et al., IEEE JPV, **4** (4) (2014), 1046
- [14] M. Morales-Masis et al., APL Mater. **2** (2014) 096113.
- [15] L. Fanni et al., Thin Solid Films **565** (2014) 1
- [16] L. Ding et al., Adv. Funct. Mat. **23** (2013), 5177
- [17] R. Khazaka et al., Prog.Photovolt:Res.Appl. (2014), DOI: 10.1002/pip.2542
- [18] B. Demareux et al., Appl. Phys. Lett. **101** (2014),171604.
- [19] M. Boccard et al.,Nano Letters **12** (2012), 1344
- [20] H. Tan et al., Appl. Phys. Lett. **103** (2013), 173905
- [21] J.W. Schüttauf et al., Presented at EU PVSEC (2014)
- [22] C. Ballif et al, Presentation at the TUV workshop (2014)
- [23] M. Stuckelberger et al., IEEE JPV **4** (5) (2014), 1282

## Publications

Below is the list of publications of 2014 acknowledging support from OFEN. Some of them relate findings from 2013 but were published only in 2014. Preprints of most papers are available from <http://pvlab.epfl.ch>.

- M. Boccard et al., *IEEE JPV* **4** (2014), 1368
- G. Bugnon et al., *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* **120** (2014), 143
- V. Chapuis et al., *Prog.Photovolt: Res.Appl.* **22** (2014), 405
- B. Demarex et al., *J. Appl. Phys.* **116** (2014), 053519
- S. De Wolf et al., *J. Phys. Chem. Lett.* **5** (2014), 1035
- L. Ding et al., *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* **128** (2014), 378
- J. Geissbühler et al., *IEEE JPV* **4** (2014), 1055
- S. Hänni et al, accepted for publication in *Physica Status Solidi A: Applications and Materials Science*
- S. Hänni et al, accepted for publication in *Journal of Applied Phys.*
- R. Khazaka et al., *Prog.Photovolt:Res.Appl.* (2014). DOI: 10.1002/pip.2542
- E. M.E Mhamdi, *Appl. Phys. Lett.* **104** (2014), 252108
- B. Niesen et al., *Nano Lett.* **14** (2014), 5085
- J.W. Schüttauf et al., *IEEE JPV* **4** (2014), 757
- M. Stuckelberger et al., *Prog.Photovolt:Res.Appl.* (2014). DOI: 10.1002/pip.2559
- M. Stuckelberger et al., *J. Appl. Phys.* **116** (2014), 094503
- M. Stuckelberger et al., *IEEE JPV* **4 (5)** (2014), 1282
- A. Tomasi et al., *IEEE JPV*, **4 (4)** (2014), 1046



# SYSTEMS FOR ULTRA-HIGH PERFORMANCE PHOTOVOLTAIC ENERGY HARVESTING (SYNERGY)

## Annual Report 2014

Author and Co-Authors	B. Niesen, <sup>1</sup> J. Werner, <sup>1</sup> A. Walter, <sup>1</sup> P. Löper, <sup>1</sup> A. Dabirian, <sup>1</sup> S. Martin de Nicolas, <sup>1</sup> M. Morales Masis, <sup>1</sup> S. De Wolf, <sup>1</sup> S.J. Moon, <sup>2</sup> J.H. Yum, <sup>2</sup> S. Nicolay, <sup>2</sup> J. Bailat, <sup>2</sup> W. Tress, <sup>3</sup> S. Zakeeruddin, <sup>3</sup> M. Grätzel, <sup>3</sup> L. Kranz, <sup>4</sup> S. Bücheler, <sup>4</sup> A.N. Tiwari, <sup>4</sup> C. Ballif <sup>*1,2</sup>
Institution / Company	Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), Photovoltaics and thin film electronics laboratory (PV-Lab)
Address	MC A2 304 (Microcity), Rue de la Maladière 71, CH-2000 Neuchâtel
Telephone, E-mail, Homepage	021 695 44 51, <a href="mailto:bjorn.niesen@epfl.ch">bjorn.niesen@epfl.ch</a> , 021 695 43 36, <a href="mailto:christophe.ballif@epfl.ch">christophe.ballif@epfl.ch</a> , <a href="http://pvlab.epfl.ch/">http://pvlab.epfl.ch/</a>
Project- / Contract Number	SI/501072-01 / SI/501072-01
Duration of the Project (from – to)	1. May 2014 – 30. November 2017
Date	29.11.2014

### ABSTRACT

Since decades, the PV market has been dominated by wafer-based crystalline silicon (c-Si) solar cells with record efficiencies of 25.6%. As these values are already close to the theoretical limit of single-junction c-Si cells, further improvements will not be possible by incremental technological innovation. One of the most promising approaches to overcome this limit is to combine two single-junction cells with different optical band gaps to form tandem solar cell systems. This concept has so far only been successfully employed for either very expensive or low-efficiency PV systems. Highly efficient tandem cells involving c-Si or copper indium gallium selenide (CIGS) bottom cells have not been successfully realized yet, mainly due to the difficulty to find a suitable wide-band gap top cell that delivers the necessary photocurrent while exhibiting excellent electrical properties. Recently, the situation drastically changed with the emergence of highly efficient wide-bandgap solar cells based on perovskite or II-VI absorbers. In addition, narrow-band gap cells based on CIGS compounds have recently reached efficiencies beyond 20%, thus are nearly as efficient as the best c-Si cells. In parallel, heterojunction c-Si solar cells with record efficiencies in the infra-red have been demonstrated. The Synergy project aims to combine these technologies to tandem solar cells with efficiencies beyond 30%, enabling ultra-high performance photovoltaic energy harvesting systems with the potential to provide both the terawatts of sustainable energy needed for future generations as well as ubiquitous wearable and electronic applications with integrated power source.

## Introduction/Aims of the project

This project aims to realize photovoltaic energy harvesting systems based on tandem solar cells with efficiencies beyond those achievable with state-of-the-art industrial single-junction cells by combining the unique technological components – record cells absorbing various parts of the solar spectrum – recently realized by Swiss research institutes. These novel multi-junction cells will open opportunities for tomorrow's electricity power plants and for consumer electronic applications, including e.g. watches and powering of low-consumption electronics.

The project plan foresees work on the following tasks during the period covered by this scientific report:

**Task 1:** c-Si bottom cell adaptation for c-Si/perovskite-sensitized tandem cell integration

**Task 2:** CIGS bottom cell adaptation for CIGS/perovskite-sensitized tandem cell integration

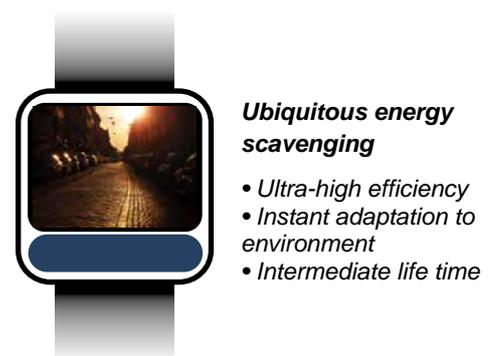
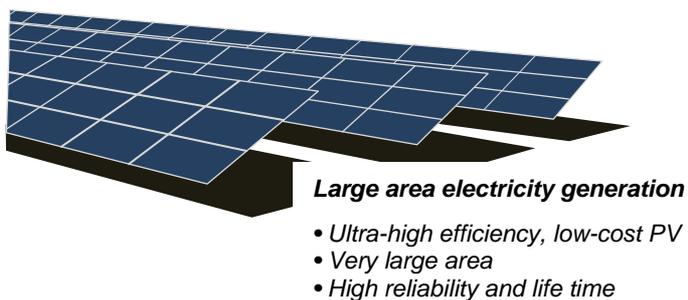
**Task 3:** Perovskite-sensitized solar cell with transparent rear electrode

**Task 6:** Up-scaling and mini-module fabrication of perovskite-sensitized cells

During the period covered by this scientific report (until 30. November 2014, i.e. Month 7 of the project), no tasks have to be completed.

## Description of the project

Photovoltaic energy harvesting systems based on highly-efficient tandem solar cells will be developed. These tandem devices consist of combinations of several PV technologies, including a-Si/c-Si hetero-junction cells (to be used as a bottom cell, developed by EPFL PV-lab), monocrystalline c-Si cells (bottom cell, CSEM), Copper Indium Gallium Selenide cells (bottom cell, EMPA), and perovskite-sensitized cells (top cell, EPFL LPI and EMPA). Each partner of the project consortium will provide its world-leading expertise in at least one of these PV technologies, which will be integrated into tandem systems in various combinations. These tandem-based energy harvesting systems can be employed for various applications, with main focus on large area PV power plants and energy scavenging for mobile electronic devices. Both require ultra-high efficiency, low-cost PV systems with performances beyond those of today's industrial single-junction technologies: the former to compete with fossil fuels, the latter to power mobile electronic devices with extremely limited exploitable surface area and constantly increasing functionality and thus energy consumption. These two potential applications and the requirements for the energy harvesting systems developed in the frame of the SYNERGY project are illustrated in the following figure:



## Work carried out and results achieved

### Task 1: c-Si bottom cell adaptation for c-Si / perovskite tandem cell integration

#### T1.1 Highly reflective rear contact for c-Si cell (EPFL PV-Lab)

The rear contact of Si heterojunction solar cells has to be highly reflective near the bandgap of crystalline Si, i.e. in the 1000-1200 nm wavelength region. A major source of parasitic absorption is the plasmonic absorption in the Ag back reflector, strongly reducing its reflectance. By lowering the refractive index of TCO layers in close proximity of the Ag back reflector, these plasmonic losses can be strongly reduced. EPFL PV-Lab developed a co-sputtering process to develop ZnO:SiO<sub>2</sub> layers, with significantly reduced refractive index compared to the ZnO TCO used in baseline Si heterojunction cells. The effect of ZnO:SiO<sub>2</sub> layers on the reflectance of the rear contact is shown in Figure 1. It clearly demonstrates that the co-sputtering approach significantly enhances the reflectance of the rear contact. With increasing SiO<sub>2</sub> content, the reflectance is slightly improved. EPFL PV-Lab is currently optimizing the sputtering processes to obtain highly conductive ZnO:SiO<sub>2</sub> layers even with high SiO<sub>2</sub> contents. In the next months, complete Si heterojunction devices with ZnO:SiO<sub>2</sub> layers will be fabricated to evaluate the influence of these layers on cell performance.

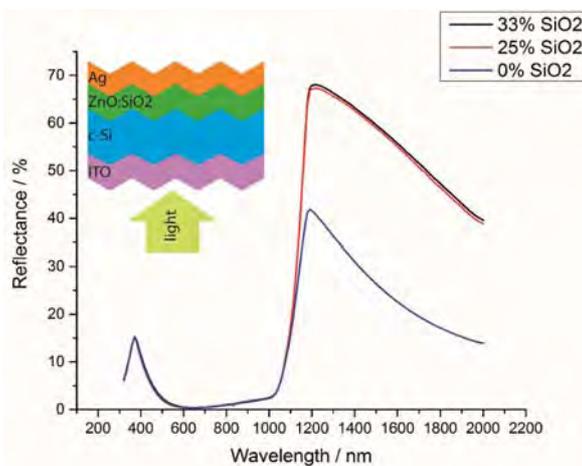


Figure 1: Reflectance of rear contacts for Si heterojunction solar cells. ZnO:SiO<sub>2</sub> layers, obtained by co-sputtering, lead to improved reflectance compared to back contacts containing a pure ZnO layer (0% SiO<sub>2</sub>). The inset shows the layer stack used for these reflectance measurements.

#### T1.2: Transparent conductive layers with high NIR transparency (EPFL PV-Lab)

Transparent conductive oxide (TCO) layers are required in solar cells to conduct charges laterally towards metal contacts, e.g. front side screen-printed metallic fingers. To this purpose, a TCO sheet resistance ( $R_{sh}$ )  $< 45 \Omega/sq$  is needed to minimize losses within the device.  $R_{sh}$  can be reduced by either increasing the carrier density or the mobility of the TCO. However, an increased carrier density leads to more severe near-infrared free-carrier absorption in the TCO. Therefore, mobility tuning is the preferred approach to reduce  $R_{sh}$ . During the first months of the project EPFL PV-Lab has been investigating alternative TCOs to the standard ITO films used in Si heterojunction solar cells. In particular, indium zinc oxide (IZO) layers have been developed. In Figure 2 the total transmittance and absorbance of IZO and ITO layers with approximately the same sheet resistance and thickness are compared. The carrier density is almost three times lower and the mobility is three times larger in the IZO film. As a result, the ITO sample has a higher absorbance, especially in the long wavelength region. These results show that IZO is a highly interesting material for the use as TCO layer in tandem solar cells.

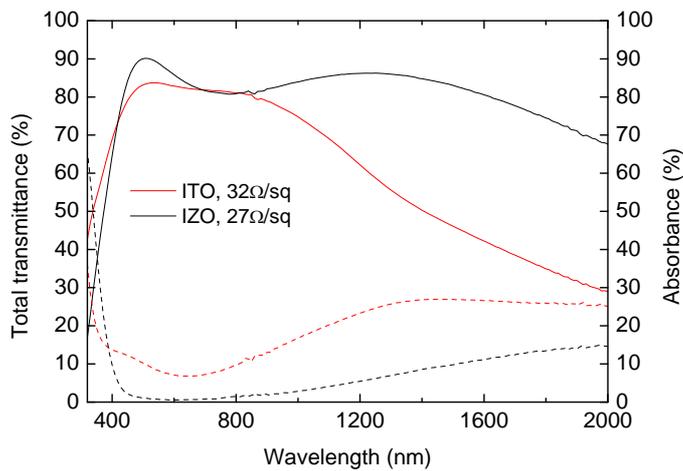


Figure 2: Total transmittance (solid curves) and absorbance (dashed curves) spectra of ITO and IZO films deposited on glass. Both films have a thickness of  $120 \pm 5$  nm and sheet resistances of  $30 \pm 3$   $\Omega$ /sq. They would thus yield similar ohmic losses in solar cells.

Using this highly-transparent TCO layer, a-Si/c-Si heterojunction solar cells with IZO as the front TCO material were fabricated by EPFL PV-Lab. As shown in Figure 3, they exhibit higher IR response than those with ITO. The high infrared quantum efficiency obtained with the IZO electrodes is a direct consequence of the reduced parasitic absorption in the infrared, whereas at short wavelengths the spectrum almost overlaps with the ITO cell.

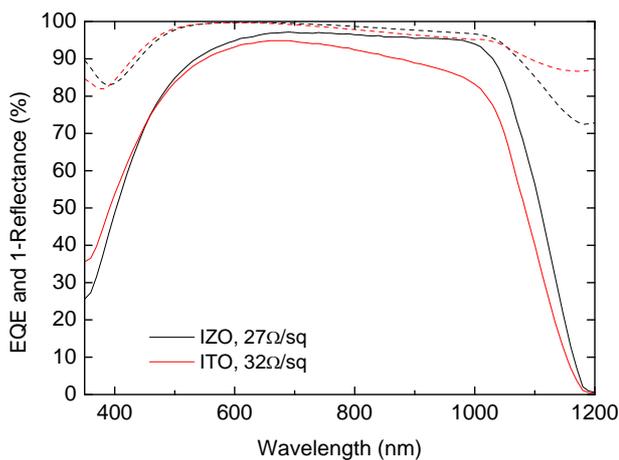


Figure 3: External quantum efficiency (solid) and 1-reflectance (dashed) spectra of a-Si/c-Si solar cells with ITO and IZO front contacts.

## Task 2: CIGS bottom cell adaptation for CIGS/perovskite-sensitized tandem cell integration (EMPA)

For optimum use as bottom cell in tandem structures, CIGS solar cells with improved NIR efficiency are being developed by EMPA. One way to improve NIR efficiency is the replacement of the commonly used ZnO:Al (AZO) front contact layer by the high mobility TCO  $\text{In}_2\text{O}_3$ :H.  $\text{In}_2\text{O}_3$ :H layers with mobility of  $138 \text{ cm}^2/\text{Vs}$  have been developed, which is significantly higher than the value of  $27 \text{ cm}^2/\text{Vs}$  of the AZO reference layer. Figure 4 shows the transmittance of these TCO layers on glass substrate. The IR transmittance is significantly improved in  $\text{In}_2\text{O}_3$ :H layer compared to the reference. In the next step the compatibility with the CIGS process has to be proven.

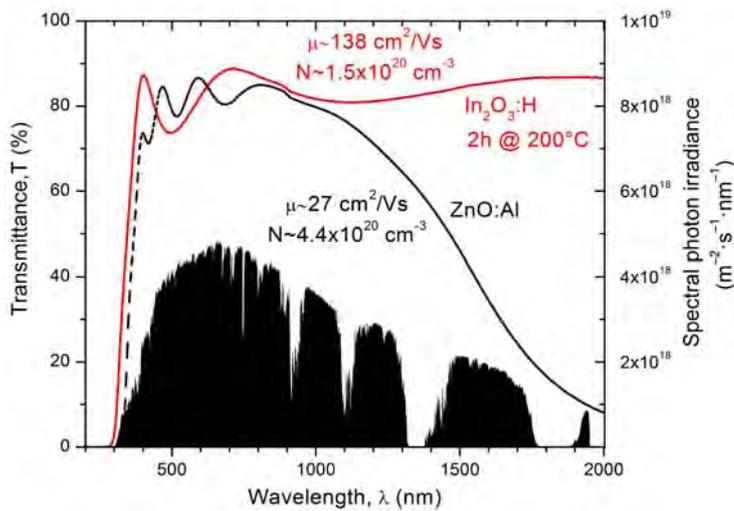


Figure 4: Total Transmittance of an  $\text{In}_2\text{O}_3:\text{H}$  and an  $\text{ZnO}:\text{Al}$  layer on glass substrate.

Another way to improve the NIR efficiency of CIGS devices is to reduce the energy band gap of the absorber by reducing Ga content. Figure 5 shows the external quantum efficiency measurements of a state-of-the-art high-efficiency CIGS solar cell with an energy band gap of 1.15 eV and of a CIS solar cell with a reduced band gap. The latter cell shows significantly higher spectral response in the NIR region. The targeted 85% quantum efficiency at 1000 nm is achieved with this device, however, the  $V_{oc}$  and FF have to be further improved for an overall efficiency gain in tandem solar cells.

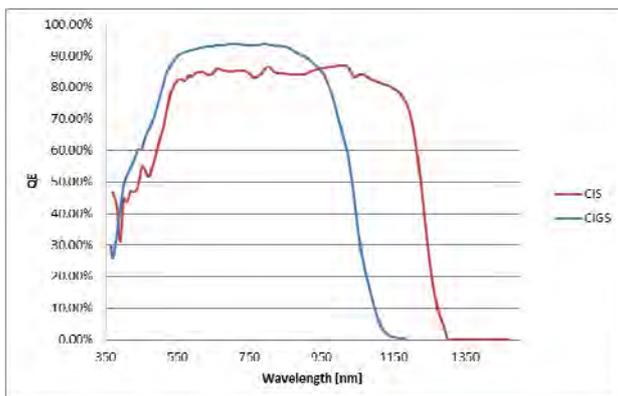


Figure 5: EQE measurements of CIGS and CIS solar cells.

### Task 3: Perovskite-sensitized solar cell with transparent rear electrode (EPFL LPI, EPFL PV-lab)

High-efficiency perovskite solar cells are commonly prepared as a layer stack comprising a transparent conducting oxide electrode on glass coated with either a planar or a scaffold-structured charge (electron or hole) transport layer, the perovskite absorber layer, the second charge transport (hole or electron) layer, and a metal rear electrode. Light enters the solar cell through the glass substrate, such that the metal rear electrode acts as a back reflector to boost photocurrent. EPFL PV-Lab has developed a perovskite cell with high infrared transparency by replacing the metal rear electrode by a transparent TCO electrode. The cell structure, shown in Figure 6, comprises fluorinated tin oxide (FTO) as TCO on glass, which is coated by a mesoporous  $\text{TiO}_2$  (m- $\text{TiO}_2$ ) electron transport material. After a 2-step preparation of the perovskite layer [1], 2,2',7,7'-tetrakis(N,N-di-p-methoxyphenylamine)-9,9'-spirobifluorene (spiro-MeOTAD) is spin-coated and serves as hole transport material.

Recently, efficient hole-collectors for a-Si:H/c-Si heterojunction [2] and perovskite [3] solar cells were realized based on thin layers of evaporated molybdenum oxide ( $\text{MoO}_x$ ). The  $\text{MoO}_x$ -based hole collectors were proven to provide a remarkably high transparency without inducing sputter damage in the active layers underneath [2].

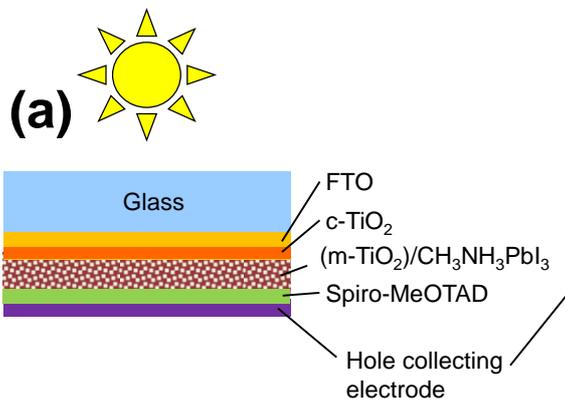


Figure 6: Device architecture of a perovskite-based solar cell with two transparent electrodes for tandem applications.

Inspired by these results, we tested here similar electrodes as transparent hole collectors for perovskite solar cells, consisting of a thin  $\text{MoO}_x$  layer capped with 100 nm indium tin oxide (ITO) to provide lateral conductivity. With this design, rectifying properties were obtained both in the dark and under illumination as shown by the current-voltage (IV) curves in Figure 7, resulting in a remarkable conversion efficiency of 6.2 % with an active area of  $0.25 \text{ cm}^2$ .

This result was achieved with a 30 nm  $\text{MoO}_x$  buffer layer, yielding an open-circuit voltage ( $V_{\text{oc}}$ ) of 821 mV, a short-circuit current density ( $J_{\text{sc}}$ ) of  $14.5 \text{ mA/cm}^2$  and a fill factor (FF) of 51.9 %. Figure 7 also shows the IV curves of a reference cell, which was co-processed with the IR-transparent cell but received an evaporated Au electrode instead of the sputtered ITO. This cell exhibits a decent performance ( $J_{\text{sc}} = 18.51 \text{ mA/cm}^2$ ,  $V_{\text{oc}} = 938 \text{ mV}$ , FF = 67 %) with an efficiency of 11.6 %. The discrepancy between the cell with ITO instead of the Au back electrode can most likely be explained with the sputter-induced damage from the ITO deposition process known from a-Si:H/c-Si heterojunctions [4] being insufficiently shielded by the  $\text{MoO}_x$  layer.

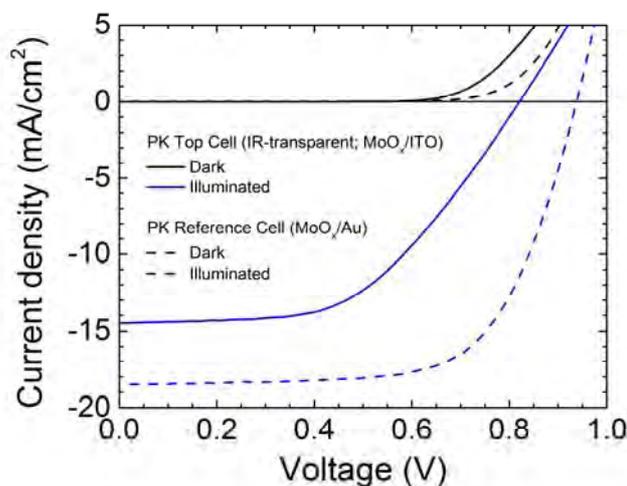


Figure 7: Current-voltage curve of the IR-transparent perovskite solar cell with transparent  $\text{MoO}_x/\text{ITO}$  back contact and of a reference cell with  $\text{MoO}_x/\text{Au}$  back contact.

EPFL LPI chose an alternative approach and realized a transparent rear electrode for a four terminal tandem configuration using metal grids provided by the company Sefar. Several fabrics have been tested, showing different roughness, supporting material, and mesh sizes. As the grid is mechanically pressed onto the perovskite solar cells with the hole transport material as top layer and an overall thickness smaller than 1 micron, shunting turned out to be an issue. The best device performance was achieved with a newly developed grid showing a roughness of only 1 to 2 microns, a spacing of 1 mm, and consisting of embedded copper coated silver wires. The transparency of this fabrics is 90 % in the overall visible range. As the J-V characteristics in Figure 8 (right image) reveal, this cell showed excellent power conversion efficiency of 11.6 % ( $V_{\text{oc}} = 1.02 \text{ V}$ ,  $J_{\text{sc}} = 5.4 \text{ mA/cm}^2$ , FF = 0.61, at an illumination intensity of  $30 \text{ mW/cm}^2$ ). In particular, the open-circuit voltage does not suffer indicating that shunting is not a problem. However, a thin Au layer had to be used to guarantee good contact between grid and solar cell. In order to further improve device performance, in particular the fill factor, we are currently applying smaller wire spacing fabrics as well as carbon nanotube coated fabrics in order to decrease the series resistance.

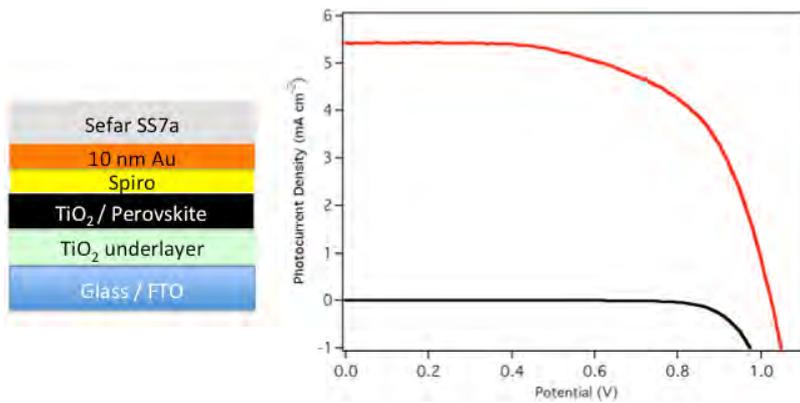


Figure 8: Left: Device stack of the perovskite solar cell. Right: J-V characteristics at around 30 mW/cm<sup>2</sup> illumination, giving a power conversion efficiency of 11.6 %.

### Task 6: Up-scaling and mini-module fabrication of perovskite-sensitized cells (CSEM, EPFL LPI)

The best efficiency achieved at CSEM with solution-processed perovskite cells with a small area i.e. 0.25 cm<sup>2</sup> was 13.7% under AM1.5G full sun, while the efficiency decreased to 12.8 and 8.15% as the active area increased to 1 and 4 cm<sup>2</sup>, respectively. In detail, the small cell yielded a  $J_{sc}$  of 20 mA/cm<sup>2</sup>, a  $V_{oc}$  of 1010 mV, and a  $FF$  of 67.7%, whereas the large cell (4 cm<sup>2</sup> area) yielded a  $J_{sc}$  of 17.4 mA/cm<sup>2</sup>, a  $V_{oc}$  of 839 mV, and a  $FF$  of 55.9%. Although this result is the highest value for a cell with an area above 1 cm<sup>2</sup> to the best of our knowledge, the large losses in the various cell parameters are critical. There is a large change in open-circuit voltage, which likely indicates a shunting issue which is confirmed with the drop in  $R_{sc}$ . The series resistance is also higher because of the larger cell area. A drop in current might be associated to not only the recombination but also inhomogeneous perovskite film formation. It has been evidenced from previous studies that engineering of the morphology of the perovskite film and its interfaces to the charge transport layers are key factors to determine the photovoltaic performance.

Building on these results, CSEM developed mini-modules based on perovskite solar cells. To produce a mini-module, the perovskite solar cells deposited on the glass substrate are electrically connected serially; in the field of thin film solar cells, it is called monolithic interconnection. This interconnection scheme is based on a first isolation pattern (P1) on the blocking TiO<sub>2</sub> layer/ transparent conductive oxide (TCO), a second interconnection pattern (P2) through the TCO by the ablation of the perovskite layer/mesoporous TiO<sub>2</sub> layer and hole transport layer and a third isolation pattern (P3) of the perovskite layer/mesoporous TiO<sub>2</sub> layer, the hole transport layer and the metallic back contact. P1 is achieved with a UV nano-second pulsed laser, P2 and P3 with a green nano-second pulsed laser. An isolation scribe is eventually done around the whole module. The picture of a module is presented in Figure 9.

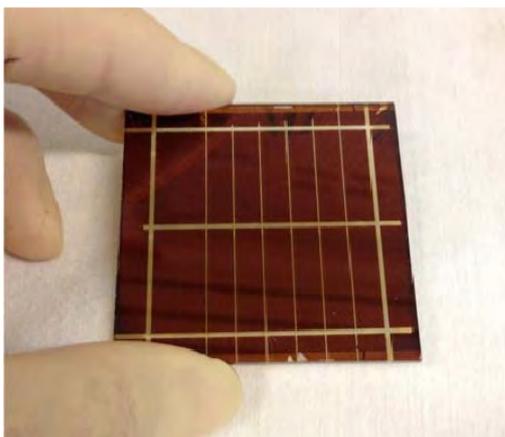


Figure 9: Picture of a 6 segment mini-module realized by laser scribing. The active area of the module is of approximately 5.4 cm<sup>2</sup>.

The reference cells for the mini-module had an efficiency of 9%. The best mini-module yielded an efficiency of approximately 6.6% with an active area of 5.4 cm<sup>2</sup>, which is a reasonable value at this stage of the project. The cell to module decrease of efficiency is related to the dead area between P1 and P3, the possible non-uniformities of the perovskite layer and the interconnection scribe P2. This last point is probably the most delicate step, since to get a good connection of the back contact to the front TCO, the TiO<sub>2</sub> blocking layer, which is transparent to the green laser used for P2, has to be removed by it as well. To the best of our knowledge it is the first time that a perovskite mini-module is made by full laser scribing technique.

## National cooperation

- EPFL PV-Lab sent a-Si/c-Si heterojunction cells to EMPA and EPFL LPI for preliminary tests of TiO<sub>2</sub> electron transport layer deposition on the surface of the heterojunction cells by means of low-temperature TiCl<sub>4</sub> chemical bath deposition (EPFL LPI) and sputtering (EMPA) for monolithic tandem integration.
- EPFL LPI sent perovskite and TiO<sub>2</sub> layers to EPFL PV-Lab for optical characterization.
- CSEM had first discussions with Meyer Burger to evaluate the potential of perovskite-based energy harvesting systems.

## Evaluation 2014 and Outlook 2015

Substantial progress has been made for all tasks. Specifically, the adaptation of both bottom cell technologies (c-Si and CIGS) has led to cells with high near-infrared quantum efficiencies (Tasks 1 and 2). Perovskite top cells with highly transparent electrodes suited for tandem integration have been realized with two different approaches (Task 3). These achievements will allow the project consortium to begin the development of tandem devices (Tasks 4 and 5) in 2015, as foreseen by the project research plan. Also, first perovskite mini-modules have been realized, which will be further up-scaled and optimized in 2015 to reach high uniformity on 25 cm<sup>2</sup> substrates, necessary to complete D6.1.

Two peer-reviewed papers have been published:

- S. De Wolf *et al.*, *J. Phys. Chem. Lett.* **5**, 1035 (2014).
- P. Löper *et al.*, *IEEE J. Photovolt.* **4**, 1545 (2014).

Several presentations have been given at international conferences:

- F. Fu *et al.*, "Organometal Trihalide Perovskite Planar Heterojunction Solar Cell in a Tandem Structure with Cu(in, Ga)Se<sub>2</sub>", EUPVSEC 2014, Amsterdam, Netherlands.
- T. Jäger *et al.*, "Hydrogenated indium oxide window layers for high-efficiency CIGS solar cells", E-MRS Fall meeting 2014, Warsaw, Poland.
- F. Fu *et al.*, "On the anomalous hysteresis effect of Organic-inorganic hybrid perovskite based solar cells and the potential of CIGS/perovskite tandem structures" E-MRS spring meeting 2014, Lille, France.
- B. Niesen *et al.*, "Optical absorption edge of organometallic halide perovskites and its implications for device performance", poster, Conference on Hybrid and Organic Photovoltaics (HOPV) 14, Lausanne, Switzerland.
- P. Löper *et al.*, "Si-based Tandem Solar Cells with Organometallic Lead Halide High-band Gap Top-cells", WCPEC-6, Kyoto, Japan.
- S. J. Moon *et al.*, "Organometallic Perovskite Toward High Performing and Upscale Solar Cell" WCPEC-6, Kyoto, Japan.

## References

- [1] J. Burschka, N. Pellet, S.-J. Moon, R. Humphry-Baker, P. Gao, M. K. Nazeeruddin and M. Grätzel, *Nature*, 2013, 499, 316–319.
- [2] C. Battaglia, S. Marti'n de Nicola's, S. De Wolf, X. Yin, M. Zheng, C. Ballif and A. Javey, *Appl. Phys. Lett.*, 2014, 104.
- [3] Y. Zhao, A. M. Nardes and K. Zhu, *Appl. Phys. Lett.*, 2014, 104, 213906.
- [4] B. Demareux, S. De Wolf, A. Descoeurdes, Z. Holman, and C. Ballif, *Appl. Phys. Lett.*, 2012, 101, 171604.



# FASTTRACK

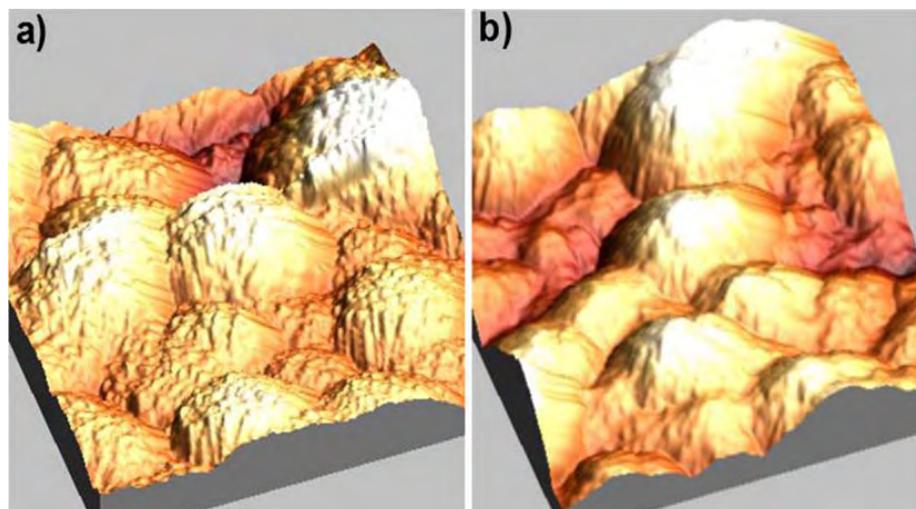
## ACCELERATED DEVELOPMENT AND PRO-TOTYPING OF NANO-TECHNOLOGY BASED HIGH EFFICIENCY THIN FILM SILICON SOLAR MODULES

### Annual Report 2014

Author and Co-Authors	F.-J. Haug, E. Moulin, C. Ballif
Institution / Company	EPFL, IMT PV-Lab
Address	Rue A.-L. Breguet 2, CH-Neuchatel
Telephone, E-mail, Homepage	<a href="http://pvlab.epfl.ch">http://pvlab.epfl.ch</a>
Project- / Contract Number	FASTTRACK / 283501
Duration of the Project (from – to)	1.03.2012 – 28.02.2015
Date	4.12.2014

#### ABSTRACT

Thin film silicon solar cells make use of surface textures in order to enhance light absorption in the device by light scattering at the interfaces. The FastTrack project is devoted to the development of novel light management schemes and also to their industrialisation. The image below illustrates the surface morphology of solar cells towards the end of the process chain before the deposition of the back-contact metallization. The difference between panels a) and b) is the application of a plasma treatment that removes the fine structure. Parasitic losses in the subsequent metallization are drastically reduced in case of the smooth interface.



## Project goals

The project FastTrack is part of the theme "Energy" within the 7<sup>th</sup> Framework programme of the European Union. The main project goals are the development of innovative photovoltaic cell processes and their up-scaling to the level of pilot lines. These goals should be reached in terms of a stable device efficiency higher than 14% and a prototype module with stable efficiency higher than 12%.

## International cooperation

The project consortium consists of 19 partners; among these are 6 universities, 4 research institutes and 7 companies. The work is organized in 9 work packages devoted to novel material, solar cell processing, processes for high deposition rates, and characterization. The remaining work packages address industrial aspects like up-scaling, module integration, cost analysis, and dissemination.

## Work in reporting period

Two main subjects were addressed during the reporting period. First, the integration of solar cells on nano-pillars in collaboration with Institute of Physics Prag (IPP), Secondly, parasitic losses of the back-electrode were assessed and successfully reduced with a surface treatment.

## NANO-PILLAR SUBSTRATES

Cells with radial junction around a central nano-pillar comply ideally to the combination of weak absorption and poor charge transport found in thin film silicon. For this geometry, light can enter the structure parallel to the axis of the nano-pillar and gets absorbed along its whole length. At the same time, the generated charge-carriers do not need to travel the whole length of the nano-wire because they are collected over a short distance along the radial direction.

Nano-pillars shown in **Figure 1** were fabricated at IPP by hydrothermal growth of ZnO on a hexagonal array defined by e-beam lithography.<sup>1</sup> ZnO was chosen because it is transparent and conducting and serves thus not only as growth template, but also as front electrode.

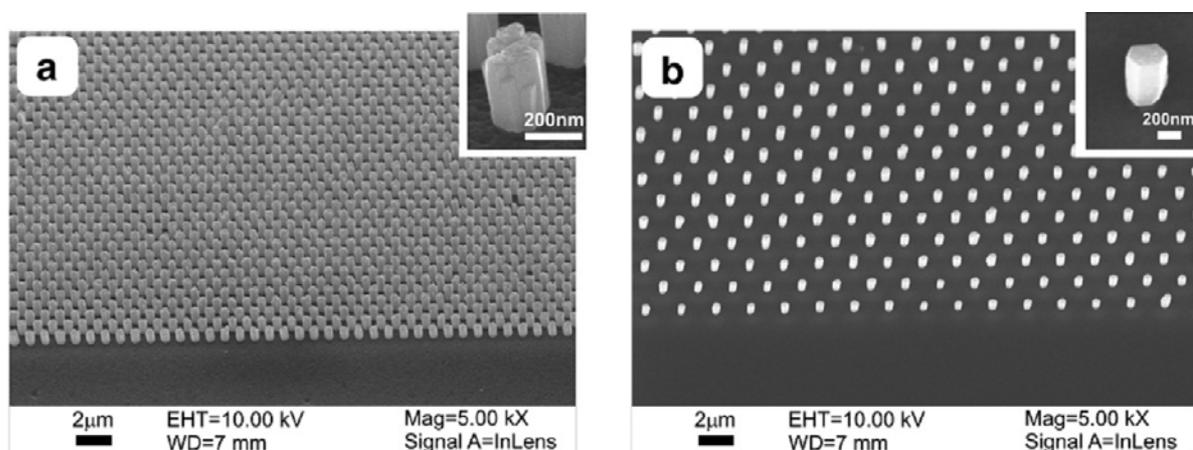


Figure 1: SEM images of ZnO nano-pillars used for fabrication of amorphous single junction cells (left) and tandem solar cells (right).

The external quantum efficiencies of cells on a nano-pillar array with two different pitches as well as two types of reference are shown in **Figure 2**. Whereas the cell on the nano-pillars performs better than the flat reference, they do not reach the level of the cell on a textured ZnO front contact. Measurements of the total absorption shows that the upper limits of the undulation of the nano-pillar cell are at the same level as the cell on textured ZnO. Since this is not the case for the EQE, we are lead to conclude that the nano-pillar design suffers from stronger parasitic absorption [2].

<sup>1</sup> Neykova, Neda, et al. "Arrays of ZnO nanocolumns for 3-dimensional very thin amorphous and microcrystalline silicon solar cells." *Thin Solid Films* 543 (2013): 110-113.

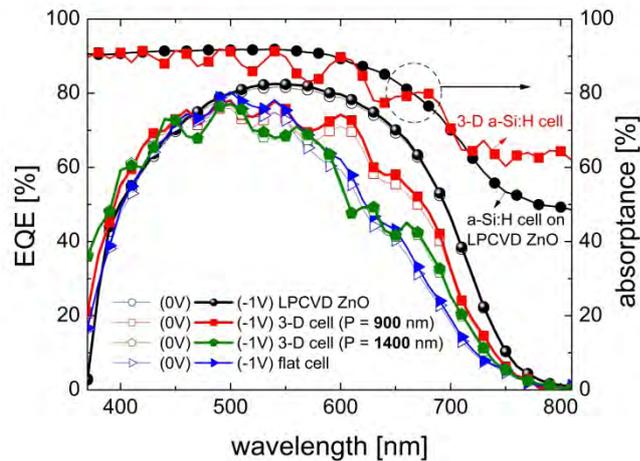


Figure 2: External quantum efficiency of cells on textured ZnO (bullets), on nano-pillar arrays with pitch of 900 nm (squares) and 1400 nm (circles), and on flat substrate (Triangles).

### PARASITIC ABSORPTION IN THE BACK REFLECTOR

Two back reflector designs were compared on microcrystalline solar cells deposited on a textured ZnO front electrode deposited by LP-CVD. The first design corresponds to the standard design at EPFL and consists of a 2  $\mu\text{m}$  thick ZnO film grown under the same conditions as the front contact. The second design combines a thin ZnO film of 150 nm deposited by the same process with a metallic reflector made from sputtered silver [3, ii].

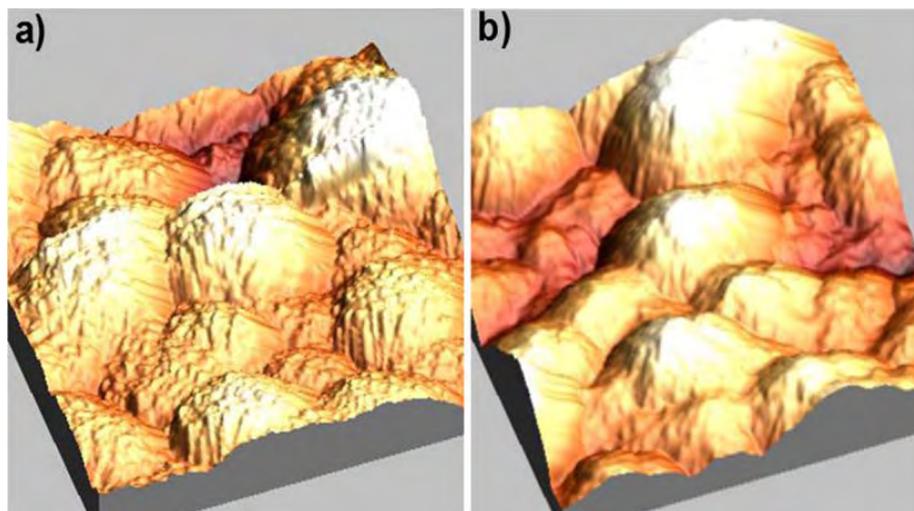


Figure 3: AFM images of the zinc-oxide buffer layer at the back of solar cells before deposition of the metallization, before (left) and after (right) applying a smoothing plasma surface treatment.

ZnO deposited by LP-CVD develops a natural surface texture which is desired for light scattering front electrodes. However, the AFM images in **Figure 3** show the natural texture is also developed on the thin buffer layer at the back interface. At this interface, texture is undesired because the subsequent application of the metallization yields a rough metallic interface that is prone to parasitic absorption by the excitation of surface plasmon resonances [4, i]. Consequently, a smoothing plasma treatment has been introduced.

**TABLE 1** illustrates that the reduction of parasitic losses with increasing treatment time translate directly into a gain of short circuit current. An added advantage of the silver back reflector with is its higher conductivity which yields systematically better FF because of reduced series resistance.

Table 1: parameters of solar cell with different types of back reflector

Type	Voc (mV)	FF (%)	Jsc (mA/cm <sup>2</sup> )	Efficiency (%)
Thick ZnO + white paste	543	66.4	24.1	8.9
Thin ZnO + Ag (no treatment)	531	68.2	22.0	8.1
Thin ZnO 5' treatment + Ag	535	69.8	24.5	9.3
Thin ZnO 10' treatment + Ag	536	69.8	24.6	9.3

## Modulated front textures

In collaboration with the project partner TU Delft, the performances of modulated textures were tested in tandem cells. In this case, a texture with large but shallow features is etched into the glass substrate and then combined with a textured ZnO electrode. In this combination the texture of the ZnO can be chosen smaller than on flat glass. **Figure 4** shows cross sections through tandem cells on different front electrodes. The left and middle panels show 1 and 2.5  $\mu\text{m}$  thick ZnO films. The small texture of the former is not sufficient for adequate scattering of near infra-red absorbed in the 3  $\mu\text{m}$  thick bottom cell (here at the top of the images) whereas the latter can be problematic of cell operation because of defective zones formed above V-shaped valleys of the texture (illustrated by arrows). The third panel shows the combination of the 1  $\mu\text{m}$  thick zinc oxide with a texture etched into the underlying glass substrate.<sup>2</sup>

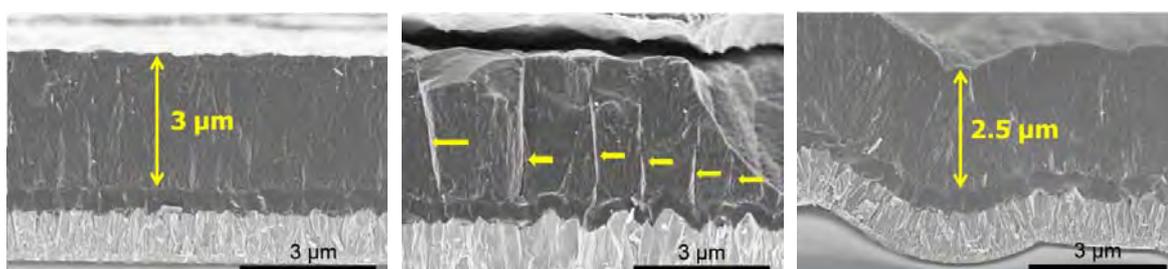


Figure 4: Cross sections through tandem cells on Zinc oxide with small (left) and medium texture (middle), and on zinc oxide with small texture but applied on textured glass (right).

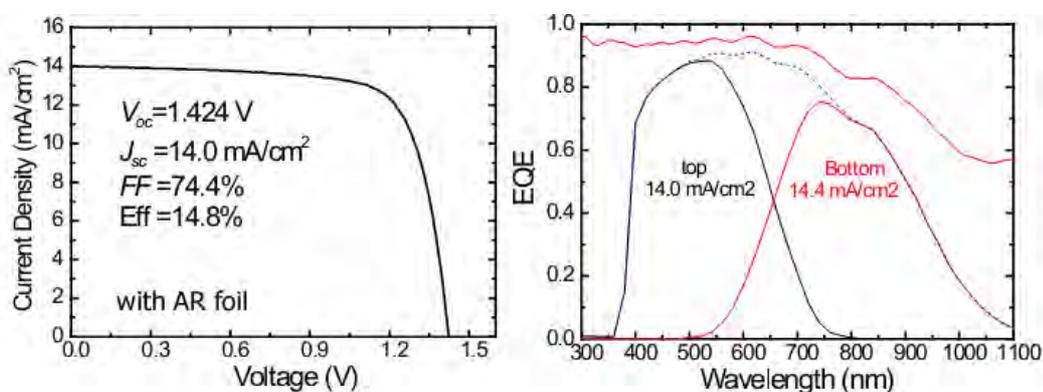


Figure 5: Current-voltage characteristics (left) and external quantum efficiency (right) of the tandem cell on the modulated texture (results in initial state).

<sup>2</sup> H. Tan et al. "Modulated textured front electrodes for high-efficiency multi-junction thin-film silicon solar cells", presented at the 6<sup>th</sup> World PVSEC, Kyoto (2014)

The performance of tandem solar cells with 300 nm thick top cell, 100 nm thick intermediate reflector and 2.7  $\mu\text{m}$  thick bottom cell is shown in **Figure 5**. With anti-reflection coating at the front, this device shows an initial efficiency of 14.8%.

### **Publications in Journals**

- [1] E. Moulin et al. "2-D Periodic and Random-on-Periodic Front Textures", IEEE Journal of Photovoltaics, **4(5)**, p1177, (2014)
- [2] N. Neykova et al. "3-dimensional amorphous silicon solar cells on periodically ordered ZnO nanocolumns" to be published
- [3] R. Khazaka et al. "Silver versus white sheet as a back reflector for microcrystalline silicon solar cells deposited on LPCVD-ZnO electrodes of various textures", Progress in Photovoltaics, DOI:10.1002/pip.2542
- [4] F.-J. Haug, C. Ballif "Light trapping thin film solar cells", Invited review article, Energy and Environmental Science, to be published

### **Presentations at Conferences**

- [i] F.-J. Haug et al. "Parasitic absorption effects in metallic electrodes with surface texture", 40<sup>th</sup> IEEE PVSC Denver (2014)
- [ii] E. Moulin et al. "Silver versus white sheet as back reflector for thin-film silicon solar cells ", 29<sup>th</sup> EU PVSEC Amsterdam (2014)



# HIGH EFFICIENCY REAR CONTACT SOLAR CELLS AND ULTRA POWERFUL MODULES (HERCULES)

## Annual Report 2014

Author and Co-Authors	Stefaan De Wolf, Silvia Martin de Nicolas, Jonas Geissbuehler, Johannes Seif, Niels Holm, and Christophe Ballif
Institution / Company	EPFL, IMT, PV-Lab
Address	Rue de la Maladière 71b, 2002 Neuchâtel
Telephone, E-mail, Homepage	+41 21 695 45 32, <a href="mailto:christophe.ballif@epfl.ch">christophe.ballif@epfl.ch</a> , <a href="http://pvlab.epfl.ch">http://pvlab.epfl.ch</a>
Project- / Contract Number	HERCULES / 608498
Duration of the Project (from – to)	01.11.2013 – 01.11.2016
Date	15.12.2014

### ABSTRACT

HERCULES (**H**igh **E**fficiency **R**ear **C**ontact solar cells and **U**ltra powerful modu**LES**) is a project sponsored by the European Commission. This project links together world-class EU companies and institutes with experience in the field of crystalline silicon solar cells. The guiding principle of this project is to develop new and innovative n-type monocrystalline silicon (c-Si) device structures based on back-contact solar cells with alternative junction formation, as well as related structures including hybrid concepts (homo-heterojunction). These concepts are the most promising silicon-based technologies to reach ultra-high efficiencies with industrially relevant processes. The HERCULES strategy is to transfer the developed processes to the industrial scale by considering all major cost drivers of the entire manufacturing process chain of modules. The concepts developed in HERCULES will demonstrate 25% efficiency at cell level, for above 340  $W_p$  modules produced in the partners pilot-lines, and pave the way to ultra-high efficiencies for the next generation of c-Si based solar cells devices.

## Introduction

The European photovoltaics (PV) market still represents the predominant share of worldwide installations and electricity generated from PV is becoming increasingly competitive, with an average levelised cost of energy (LCOE) estimated to be between 0.10 – 0.16 €/kWh in 2011. This constant reduction of LCOE means that the European industry can only regain its competitiveness with (i) a concomitant reduction of production and investment costs (current net price level ~0.8 – 1.0 €/W<sub>p</sub> today) in Europe in order to face the strong price competition of emerging countries (China and Taiwan), (ii) investment in novel “advanced” industrial processes allowing for high efficiencies and low-cost device production, (iii) the development of high-end tools and processes which are more difficult to master and duplicate, securing a technology leadership. These conditions are necessary to ensure sustainable PV technology production in Europe and the construction of a robust European PV industry able to beat international competition. However, ultra-high-efficiency PV devices require manufacturing processes that are increasingly complex, which results in an increase in the related investment and fabrication costs. Given that the market still requires a reduction of the technology price, we are left with a paradox, and we must find ways to produce high-efficiency devices with competitive industrial processes.

## Goals of the project

The key objectives of the HERCULES project are:

1. To develop ultra-high efficiency modules at the pilot scale (mean power conversion efficiency  $\eta > 21\%$ )
2. To reduce production/investment complexity and demonstrate costs down to 0.7 €/W<sub>p</sub> at the pilot scale
3. To increase the durability of modules up to 35 years
4. To demonstrate ultra-high efficiency solar cells with  $\eta > 25\%$

## Brief description of the project (2013-2016)

The HERCULES project will develop ultra-high-efficiency devices and transfer processes along the entire manufacturing value chain from the laboratory to an industrial pilot line. At the core of the project lies the combination of the best use of silicon materials, of a reduced usage of costly material, which all requires a unique expertise in mastering of advanced processes and advanced production technologies, but still with a potential for high productivity and low cost.

Processing and manufacturing wise, the HERCULES project will encompass the entire process chain from wafer to cell and from cell to module. The following strategies will be developed in order to stimulate industrial take-up of the developed processes and achieve ultra-high-efficiency industrial modules at the pilot scale:

- Wafer production quality and costs will be assessed.
- New industrially compatible processes will be developed for layer deposition (front surface field, emitter and back-surface field)—including ion implantation, laser doping and hetero-emitter formation—with the goal of reducing the number of process steps and avoiding wet chemistry.
- Metallization and contacts: The use of low-silver content pastes will be promoted as well as the replacement of the expensive silver metallization with copper and the use of PVD processes (evaporation or sputtering) to deposit non-noble metals for silver-free cells. High performance indium TCOs and indium-free TCOs for HJT cells will be investigated.
- Interconnection and encapsulation: The impact of these strategies on module performance, cost and reliability will be evaluated.

PV-Lab contributes to the overall goal by further developing the silicon heterojunction (HJ) solar cell design with the aim at fabrication record efficiency devices. In particular, PV-Lab is involved in several tasks throughout the entire process chain from wafer to cell:

- c-Si substrate: Evaluation and study of the influence of wafer resistivity and impurities on the ultimate performance of heterojunction solar cells.

- Heteroemitter fabrication: Development of electron and hole collecting passivating structures based on amorphous silicon with high quality passivation properties, low optical absorption, and ideal band alignment to allow for high FF values.
- Contact formation: Investigation of the TCO/metal contact and TCO/a-Si:H contact with special attention to contact resistivity to determine internal resistive losses of the heterostructure and formulate solutions to improve the FF to values well above 80%.
- Fabrication of high-efficiency prototype solar cells, where PV-Lab is also leading and coordinating the work.

## Work performed and results achieved in 2014

During 2014 major efforts were put by PVlab on the development of improving the fill factor, short-current density and open-circuit voltage of our devices. In the following, we highlight for each of these topics a specific development.

### 1. Copper-Plated Grid Electrodes for Silicon Heterojunction Solar Cells

Front metallization is of critical concern in high-efficiency low-cost approaches, as such metallization should yield low resistive and shadowing losses, and should be also cost-effective. For this purpose we investigated copper electroplating and compared it with common silver printing techniques for the front metallization of silicon heterojunction solar cells (see Figure 1). We achieved smaller feature sizes by electroplating, significantly reducing optical shadowing losses and improving cell efficiency by 0.4% absolute. Interestingly, a detailed investigation of series resistance contributions reveals that, at maximum power point, a significant part of the lateral charge-carrier transport occurs inside the crystalline bulk, rather than exclusively in the front transparent conductive oxide. This impacts the optimization for the front-grid design of high-efficiency silicon heterojunction solar cells, enabling the use of TCO electrodes with higher transparency. We also investigated with advanced electron microscopy, the inner structure of copper-plated fingers and their interfaces. Finally, a cell efficiency of 22.4% is demonstrated with copper-plated front metallization, see also Figure 1 for the detailed solar cell parameters. For further details, please refer to Ref. 1.

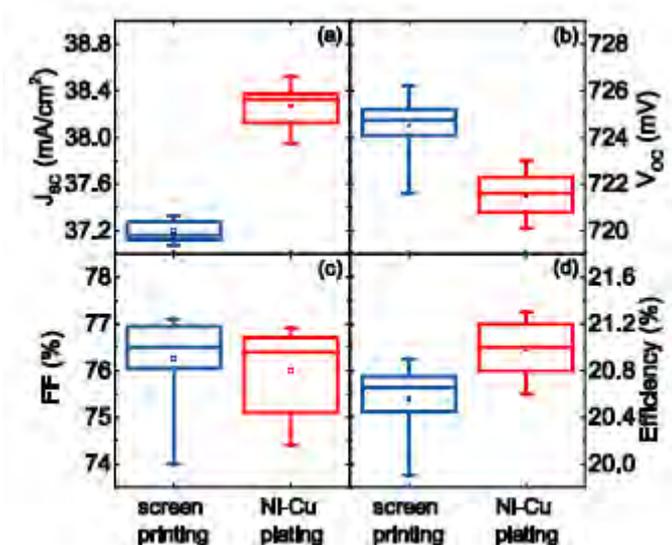


Figure 1. I-V characteristics under 1-sun illumination.

### 2. New window layers for lowered parasitic absorption.

Mitigating absorption losses in the blue and red parts of the spectrum, in both amorphous silicon and transparent conductive oxides is an important route towards ultimate heterojunction solar cell performance. For this purpose, we have investigated a number of different silicon-based alloys, including silicon oxide, to replace the intrinsic and doped front amorphous silicon stacks. By using stacks of intrinsic amorphous silicon and amorphous silicon oxide as front intrinsic buffer layers, we could show that this increases the short-circuit current density by up to 0.43 mA/cm<sup>2</sup> due to less reflection and a higher transparency at short wavelengths (see Figure 2). However, we find that the gain in current is more than offset by losses in fill factor. Aided by device simulations, we link these losses to impeded

carrier collection fundamentally caused by the increased valence band offset at the amorphous/crystalline interface, see also Figure 2. Consequently, it may be preferable to collect electrons at the a-SiOx:H buffer layer side, as the larger VB offset should not impede electrons. In that case, the cell architecture should be redesigned towards a rear-emitter cell (when using n-type wafers). For further details, please refer to Ref. II.

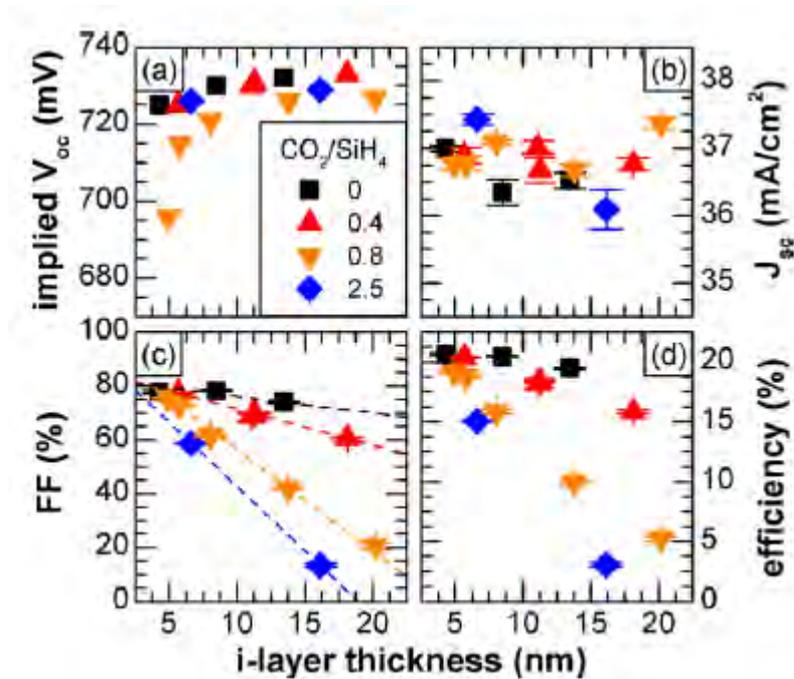


Figure 2. Output solar cell characteristics as a function of the front (i) a-SiOx:H layer thickness.

### 3.Improved understanding of surface passivation properties

Thin hydrogenated amorphous silicon (a-Si:H) films offer excellent surface passivation of crystalline silicon (c-Si) surfaces. Such interfaces are as a consequence also sensitive probes for the bulk electronic properties of a-Si:H. To gain insight in the precise microstructural changes of amorphous silicon during low-temperature annealing we probed the response of such films in terms of passivation and microstructure. We observed that during annealing the electronic improvement of the interfaces follows stretched exponentials as long as hydrogen evolution in the films can be detected. Once such evolution is no longer observed, the electronic improvement occurs much faster. This implies that for annealing induced changes in surface passivation, long time constants point at microstructural changes in the a-Si:H films. Interestingly, during subsequent light-soaking of such interfaces, we do not observe microstructural changes occur. These findings prove that (initial) post-deposition annealing of a-Si:H/c-Si interfaces is not a mere “fool’s” trick where initial gains would be completely offset by subsequent degradation under light exposure. Rather, such post-deposition annealing can be beneficial for the overall long-term performance of silicon heterojunction solar cells. For further details, please refer to Ref. III.

### National and international cooperation

In order to meet its objectives, the HERCULES partnership gathers the leading European Research Institutes and Industries in crystalline silicon solar photovoltaics committed to reinforce the competitiveness of the EU PV industry. The HERCULES set of expertise presents synergies both on the R&D side, with a diverse set of competences and experimental techniques that are available to the consortium, as well as through the whole industrial value chain, from the silicon feedstock to the module.

HERCULES partners include Research centers such as the National Institute for Solar Energy (INES) – Commissariat à l’Energie Atomique et aux Energies Alternatives (CEA), Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme (ISE), International Solar Energy Research Center Konstanz (ISC), CSEM, Institut für Solarenergieforschung Hameln (ISFH), Helmholtz-Zentrum Berlin für Materialien und Energie

(HZB), Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS), and industrial partners such as Meyer Burger, Roth & Rau, Norsun or Electricité de France amongst others.

## Evaluation 2014 and perspectives

2014 has been the first year of this project. PV-Lab has met deliverables, milestones and internal goals during this period. Critical scientific insight has been obtained for boosting all solar cell parameters (FF, Jsc, and Voc) to the values required for obtaining the longer-term goals set in the HERCULES project.

## Acknowledgements

All the PV-Lab collaborators, who contributed to the results presented in this report, are warmly acknowledged.

## References

- 
- I J. Geissbühler, S. De Wolf, A. Faes, N. Badel, Q. Jeangros, A. Tomasi, L. Barraud, A. Descoedres, M. Despeisse and C. Ballif, *Silicon heterojunction solar cells with copper plated grid electrodes: Status and comparison with silver thick-film techniques*, IEEE J. Photovoltaics **4**, 1055 (2014).
  - II J.P. Seif, A. Descoedres, M. Filipič, F. Smole, M. Topič, Z.C. Holman, S. De Wolf, and C. Ballif, *Amorphous silicon oxide window layers for high-efficiency silicon heterojunction solar cells*, J. Appl. Phys. **115**, 024502 (2014).
  - III E.M. El Mhamdi, J. Holovsky, B. Demareux, C. Ballif, and S. De Wolf, *Is light-induced degradation of a-Si:H/c-Si interfaces reversible?* Appl. Phys. Lett. **104**, 252108 (2014).



# CHEETAH

## COST-REDUCTION THROUGH MATERIAL OPTIMISATION AND HIGHER ENERGY OUT- PUT OF SOLAR PHOTOVOLTAIC MODULES

### Annual Report 2014

Author and Co-Authors	N. Wyrsh, S. de Wolf, C. Ballif
Institution / Company	EPFL-IMT Neuchâtel
Address	Rue de la Maladière 71B, 2002 Neuchâtel
Telephone, E-mail, Homepage	+41 21 695 43 57, <a href="mailto:nicolas.wyrsh@epfl.ch">nicolas.wyrsh@epfl.ch</a> , <a href="http://pvlab.epfl.ch/">http://pvlab.epfl.ch/</a>
Project- / Contract Number	CHEETAH / 609788
Duration of the Project (from – to)	01.01.2014 – 31.12.2017
Date	December 12, 2014

#### ABSTRACT

CHEETAH is a European integrated project (IP) financed by the 7<sup>th</sup> framework program. It combines collaborative project (CP) and coordination and support action (CSA) and aims to solve specific R&D issues in the EERA (European Energy Research Alliance) -PV Joint Research Program and to overcome fragmentation of European PV R&D and intensify the collaboration between R&D providers and industry to accelerate the industrialization of innovations. The consortium of 34 partners from 16 countries is led by *ECN* (Netherlands). It comprises also 2 Swiss partners: *EPFL* and *EMPA*.

The CHEETAH project is directly linked to the EERA-PV Joint Research Program, which aims to increase the effectiveness and efficiency of PV R&D in Europe, and to contribute to the R&D-needs of the Solar Europe Industry Initiative (SEII). Most of the EERA-PV members and associates are represented in CHEETAH. The CHEETAH's objectives are threefold:

1. Developing new concepts and technologies for wafer-based crystalline silicon PV (modules with ultra-thin cells), thin-film PV (advanced light management) and organic PV (very low-cost barriers), resulting in (strongly) reduced cost of materials and increased module performance
2. Fostering long-term European cooperation in the PV R&D sector, by organizing workshops, training of researchers, and stimulating efficient use of infrastructure;
3. Accelerating the implementation of innovative technologies in the PV industry, by a strong involvement of EPIA and KIC InnoEnergy in the program.

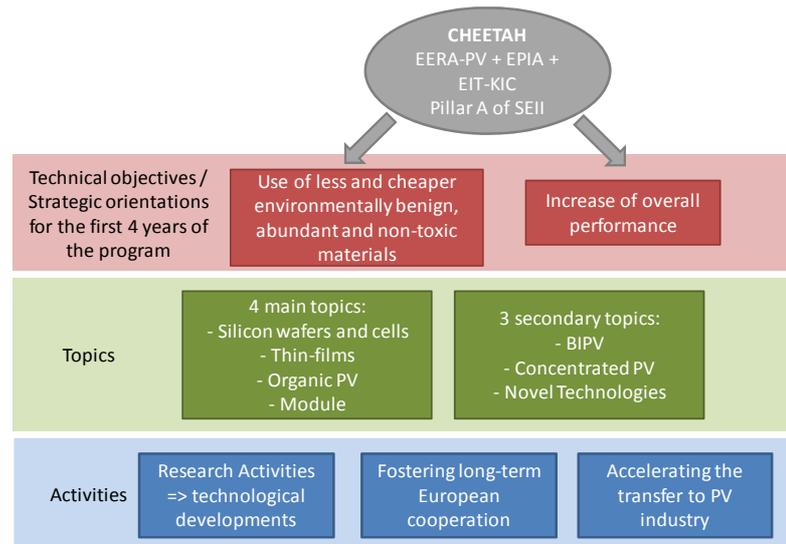
Within CHEETAH, EPFL activities are concentrated on the development of next generation thin-film Si based solar cells and their related characterization and modelling, the development of passivation contacts for ultra-thin c-Si based solar cells and the development and testing of innovative encapsulation schemes for modules based on those cell technologies. Note that these research activities are done jointly with other related research projects.

## Project goals

CHEETAH project is directly linked to the EERA (European Energy Research Alliance) -PV Joint Research Program. This program aims at

- Overcome bottlenecks in PV technology identified in the EERA Joint Program
- Reinforce the collaboration between PV R&D centers in Europe, started in EERA
- Contribute to implementation of developed PV technologies in the European industry
- Strengthen the competitiveness of European PV industry on a global scale
- Prepare trained scientists and engineers for the next wave of PV technology.

CHEETAH project focus and objectives are summarized in the figure below:



*Fig. 1: Focus of the CHEETAH program during the first 4 years.*

## Description of the project

The CHEETAH consortium comprises 34 partners from 16 countries including 2 Swiss partners (EPFL and EMPA). The project is organized in 10 work packages: beside management work package, 4 targeting coordination activities to reinforce mobility, education and cooperation and 5 work packages dealing with research activities. These latter comprised:

1. Ultrathin wafer development
2. Cell processing on ultrathin wafers
3. Module development for x-Si cells and thin-films
4. Advanced light management for thin-film PV
5. Very low cost OPV,

Within the project, EPFL is mainly involved in 3 the following research topics (or work packages):

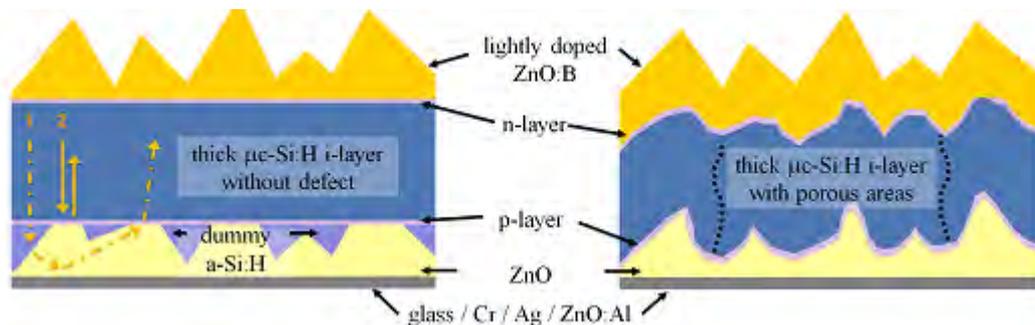
1. Cell processing on ultrathin wafers: On this topic EPFL is working mostly on heterojunctions structures. EPFL is contributing to the development of specific emitter with low blue wavelength absorption adapted to front side nanostructures as well as advanced passivation layer for these nanostructures. EPFL is also working on metallization using printing and plating techniques. Objective of this topic is to achieve 23.5% efficiency with 20 to 80  $\mu\text{m}$  thick wafer at a cost of  $<0.3 \text{ €/Wp}$ .
2. Module development for x-Si cells and thin-films: Main activities of EPFL will be on reliability testing of thin-film modules, including design of interconnection scheme for new thin-film device architecture and low-cost encapsulation scheme. Objective of this task (related to thin-film modules) is to reduce encapsulation costs by 20% as compared to state-of-the-art.

- Advanced light management for thin-film PV: Activities of EPFL are concentrated on the further improvement of thin-film Si cell efficiency by improving light-trapping scheme and better use of the solar spectrum. This should be achieved by a reduction of the parasitic light absorption, development of device architectures for optimum growth of the active layers (reduction of defects induced during material growth by the device morphology) and development of multi-junction device with up to 4 junctions. A stable efficiency of at 14.5% is sought with a cost reduction per watt of 20%.

## Work done and results

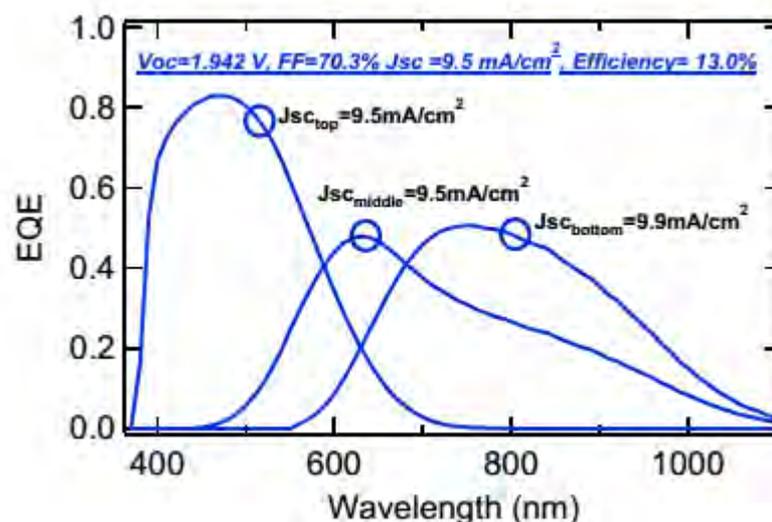
### Thin-film silicon cells

To complementary paths are followed in Cheetah to improve efficiency. The first one is based on the further development of device architecture where the material quality is not affected during manufacturing by the presence of light scattering features. A successful example of such approach is shown using "flat diffractive" structures as presented in Fig. 2.

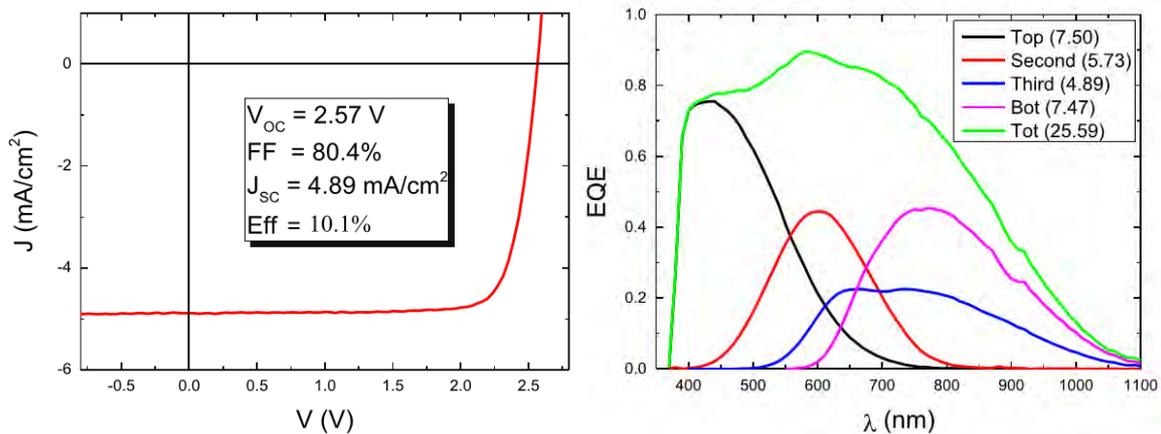


**Fig. 2:** Schematics of  $\mu\text{c-Si:H}$  solar cells grown on a) a flat light-scattering substrate with a defect-free  $\mu\text{c-Si:H}$  layer, and b) a standard solar cell grown on a textured substrate which results in a  $\mu\text{c-Si:H}$  layer that contains a lot of cracks. Valleys in the TCO material are thus filled with an inactive material with high contrast in the index of refraction with a subsequent polishing step to create flat diffractive structure.

The second path to improve is based on the use of multiple junctions to optimize device conversion efficiency. The combination of the two approaches resulted in achieving 13% stable efficiency for a  $\text{a-Si:H}/\mu\text{c-Si:H}/\mu\text{cSi:H}$  solar cell deposited on flat light scattering substrate (Fig. 3) [1]. Such approach should be further followed in Cheetah. One objective is also to increase the number of junctions aiming at reducing the cell thickness of the component cell and thus to improve cell stable efficiency. A first example with a quadruple junction device ( $\text{a-Si:H}/\text{a-SiGe:H}/\mu\text{c-Si:H}/\mu\text{c-Si:H}$ ) is presented in Fig. 4, exhibiting an outstanding  $V_{oc}$  of 2.57 V. Its efficiency is limited to 10.1% due to the non-optimized current matching in this device.



**Fig. 3:** External quantum efficiency (EQE) spectrum and electrical parameters of a triple-junction  $\text{a-Si:H}/\mu\text{c-Si:H}/\mu\text{cSi:H}$  solar cell on a flat light-scattering substrate with a UV nano-imprinted anti-reflective coating exhibiting a stable efficiency of 13%.



**Fig. 4:**  $J$ - $V$  curve (left) of a thin-film Si quadruple junction solar cell and (right) EQE spectra of the thin-film Si quadruple junction solar cell. The values in parentheses refer to the respective sub cell current densities

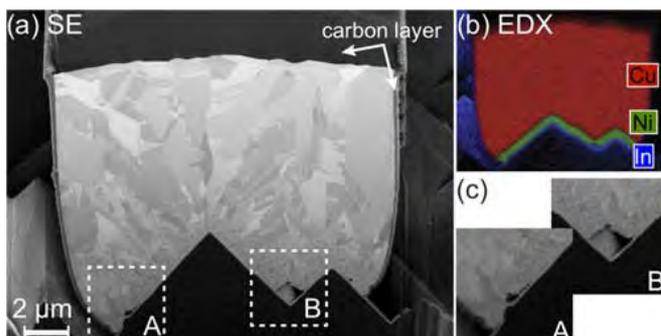
### Crystalline silicon cells

The objective of this work-package is to develop a process for the preparation of the next generation of silicon solar cells based on ultra-thin monocrystalline wafers (40 to 80  $\mu\text{m}$ ) with 23.5% efficiency, 2 g Si/W<sub>p</sub> and <0,3 €/W<sub>c</sub>. For this, the partners, including EPFL, work on an advanced solar cell structure dedicated to ultra-thin wafers, with a focus on the issues of light trapping, high surface passivation level and advanced metallization. The aim of this work-package is to address main technological challenges and to prove some new optical and electrical improvement on ultra-thin silicon SINTEF reference substrates as well as lift-off ultra-thin wafers.

Specific to these tasks, EPFL develops carrier selective passivating contacts based on silicon heterojunction technology. For such thin wafers, excellent passivation of the wafer surfaces becomes of extreme importance. This can be achieved with silicon heterojunction technology. Earlier, EPFL demonstrated by using such contacts, which are based on amorphous silicon layers, that indeed very good passivation can be obtained, yielding efficiencies as high as 21.1 % on wafers as thin as 80 micron (100 cm<sup>2</sup>). These cells featured open-circuit voltages as high as 747 mV [3].

In the Cheetah project, we develop further processes for high-efficiency ultra-thin silicon solar cells. Here, EPFL pays specific attention to low (parasitic) blue wave length absorption. For this purpose, layers under study are amorphous silicon oxides [4], to replace the intrinsic buffer layer in silicon heterojunction solar cells, and doped microcrystalline silicon and metal oxides layers, such as MoO<sub>x</sub> [5]. All these layers feature either increased bandgaps or lower absorption coefficients, lowering the parasitic absorption in the blue. Notably, all these layer depositions rely on low-temperature processes, full compatible with thin wafers.

Another task in this WP relates to new metallization schemes compatible with thin wafers. For silicon heterojunction solar cells, the current standard is the screen printing of low-temperature silver pastes for front grid definition. This process may however not be very optimal when applied to thin wafers, as it involves mechanical stress during the screen printing step. In addition, it is difficult to achieve narrow lines, which result in undesired shadow losses. Finally, the silver consumption may be unacceptably high, when aiming at an economical processing technology. For this reason, EPFL has developed a copper plating process, resolving all these issues (see Fig. 5) [6]. With this process, cell efficiencies as high as 22.4% have been achieved so far.

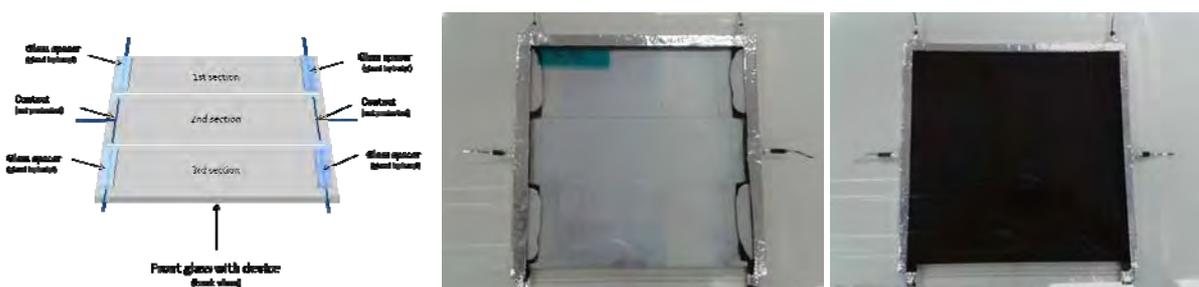


**Fig. 5:** (a) Secondary-electron SEM image of a Ni/Cu finger FIB cross section (in lens detector). (b) EDX maps of copper (using the  $K_{\alpha}$  X-ray energy), nickel ( $K_{\alpha}$ ), and indium ( $L_{\alpha}$ ). (c) Magnified view of two different kinds of defects observed at the ITO/Ni interface

## Module encapsulation

It has been shown in the past that specific non-encapsulated thin-film Si modules could sustain damp heat test conditions longer than encapsulated ones [2]. If thin-film modules without encapsulation can sustain damp heat or atmospheric conditions without detrimental effect on the performance, a much cheaper encapsulation scheme could be used aiming at just mechanically protecting the module.

To get more insight a test campaign was initialized to study the effect of atmospheric conditions on the performance of several similar thin-film silicon modules comprising either ZnO or SnO<sub>2</sub> layer for the transparent conductive oxide layers. A special module design was developed featuring three identical modules on the same substrate isolated from each other. Modules were deposited by *Jülich Forschungszentrum* and further encapsulated by *EPFL*. The segments of the three modules were left unprotected from the atmosphere (while protected from the rain or water splash), while for two of them the contact tabs were further encapsulated. A reference module with the same architecture was encapsulated with EVA and a back glass sheet. A picture of the fabricated special module is shown in Fig. 6.



**Fig. 6:** Schematic view of the module design (left) and back view (center) and front view (right) of the fabricated module.

Modules were measured before and after encapsulation for their I(V) characteristics as well as by electroluminescence to insure that no damage was introduced during the encapsulation. The modules are now being monitored in outdoor conditions by the *University of Ljubljana* (associated to *Jülich Forschungszentrum*).

## National and international collaborations

This Cheetah project allows to continue existing collaborations (for example with *Jülich Forschungszentrum*, *ECN*, the *Helmholtz-Zentrum Berlin* or *ENEA*) but also to foster new ones as many EU institutes active in PV are members or EERA and partners of Cheetah.

## Evaluation for year 2014 and future perspectives

Only very few deliverables or milestones were due in 2014. For the time being the work is progressing as planned. Several new results were presented in 2014 by EPFL during the EU Photovoltaic Conference in Amsterdam and at the 6<sup>th</sup> World Conference on Photovoltaic Energy Conversion in Kyoto. Several publications are in preparation (on Si heterojunction and thin-film silicon solar cells) and should be published early 2015.

## References

- [1] K. Söderström, PhD. Thesis, Lausanne, (2013).
- [2] P. Lechner et al., "Performance and reliability of large area thin film silicon solar cells". Proc. of the 21<sup>st</sup> EU Photovoltaic Solar Energy Conference, 1578 (2006).
- [3] B. Terheiden et al., "Manufacturing 100- $\mu$ m-thick silicon solar cells with efficiencies greater than 20% in a pilot production line", Phys. Stat. Sol. A (2014).
- [4] J.P. Seif, A. Descoedres, M. Filipič, Z.C. Holman, L. Barraud, S. De Wolf, and C. Ballif, "Amorphous silicon oxide window layers for high-efficiency silicon heterojunction solar cells", J. Appl. Phys. 115, 024502 (2014).
- [5] C. Battaglia, S. Martín de Nicolás, S. De Wolf, X. Yin, M. Zheng, C. Ballif and A. Javey, Silicon heterojunction solar cell with passivated hole selective MoOx contact, Appl. Phys. Lett. 104, 113902 (2014).
- [6] J. Geissbühler, S. De Wolf, A. Faes, N. Badel, Q. Jeangros, A. Tomasi, L. Barraud, A. Descoedres, M. Despeisse and C. Ballif, "Silicon heterojunction solar cells with copper plated grid electrodes: Status and comparison with silver thick-film techniques", IEEE J. Photovoltaics 4, 1055 (2014).



# DEVELOPMENT OF THIN HIGH-EFFICIENCY LARGE-AREA INTERDIGITATED BACK- CONTACTED SILICON HETEROJUNCTION SOLAR CELLS FOR MASS PRODUCTION (HET-IBC)

## Annual Report 2014

Author and Co-Authors	B. Paviet-Salomon <sup>1,2</sup> , A. Tomasi <sup>1</sup> , S. Martin de Nicolas <sup>1</sup> , N. Holm <sup>1</sup> , S. De Wolf <sup>1</sup> , A. Descoeurdes <sup>2</sup> , M. Despeisse <sup>2</sup> , C. Ballif <sup>1,2</sup> , D. Lachenal <sup>3</sup> , B. Legradic <sup>3</sup> and B. Strahm <sup>3</sup>
Institution / Company	<sup>1</sup> EPFL, IMT, PV-Lab, <sup>2</sup> CSEM, PV-Center, <sup>3</sup> Meyer Burger Research SA
Address	Rue Jaquet-Droz 1, Case postale, CH-2002 Neuchâtel
Telephone, E-mail, Homepage	+41 32 720 54 71, <a href="mailto:bertrand.paviet-salomon@csem.ch">bertrand.paviet-salomon@csem.ch</a> , <a href="http://www.csem.ch">www.csem.ch</a>
Project- / Contract Number	CTI 13348.1
Duration of the Project (from – to)	01.03.2012 – 01.08.2014
Date	03.12.2014

### ABSTRACT

The "HET-IBC" project is a two-year CTI project between the PV-Lab of the École polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL) and Meyer Burger Research SA (formerly Roth & Rau Research AG), with the support of the PV-Center from CSEM SA. Final goal of the project is to develop back-contacted silicon heterojunction (BC-SHJ) solar cells with efficiency over 21.0 % using mass production compatible techniques.

In this report we present the results obtained during the last year of the project. We firstly describe the use of wet-etching and plasma-etching techniques to pattern the a-Si:H layers at the rear side of our BC-SHJ devices. These techniques are meant as alternatives to the in-situ shadow masking patterning developed during the first year of the project.

In the second part of this report, we describe how the shape of the rear a-Si:H fingers and the coverage of the TCO/metal electrodes influence the final performances of the BC-SHJ cells. We therefore developed a tailor-made technique to accurately measure the shape of the a-Si:H fingers. This technique is based on Raman scattering and is presented in the third part of this report.

In the fourth and fifth parts, we report a champion cell with 21.5 % efficiency, which is the European record to date for such device and ranks 3<sup>rd</sup> worldwide. We analyse the main current losses and propose routes to mitigate them, aiming at reaching even higher efficiency.

Finally, we summarized the main achievements of the HET-IBC projects in 2012-2014. Even though the HET-IBC project ended 01.08.2014, we are truly convinced there is still room to improve our BC-SHJ devices, and soon reach > 24.0 % efficiency. Works towards this aim will thus be carried out in 2015.

## Introduction

The combination of the amorphous/crystalline silicon heterojunction technology with the back-contacts design (hereafter referred to as BC-SHJ devices) has long been identified as the most promising architecture to reach over 25.0 % efficiency for single junction solar cells on crystalline silicon wafers. Such devices indeed feature the high short-circuit current density ( $J_{sc}$ ) allowed by the back-contact design (no shading at the front side) together with the impressive open-circuit voltage ( $V_{oc}$ ) of the heterojunction cells, owing to the outstanding passivation properties of the amorphous silicon (a-Si:H) layers. In 2014 Panasonic, Japan [1], and Sharp, Japan [2], released BC-SHJ devices featuring efficiencies over 25.0 %, hence validating the potential of the BC-SHJ technology to reach very high efficiencies.

In spite of these excellent results, a cost-effective process flow for BC-SHJ devices, compliant with the mass production requirements of yield and throughput, is still to be demonstrated. In this regard, finding the suitable techniques for the patterning of the rear side of the device is especially challenging. Besides, on the scientific side, a complete understanding of the device physics is still sought for. In particular, the keys in reaching high fill-factor (FF) on such devices are still under investigation. Last but not least, an accurate assessment of the current losses in BC-SHJ devices is mandatory to take all the benefits of the back-contacted design, hence reaching  $J_{sc} > 42.0 \text{ mA/cm}^2$ .

## Project goals and description (2012-2014)

The HET-IBC project aims at fostering the spread of the BC-SHJ technology by developing an industrial-compliant process flow to manufacture high-efficiency, large area interdigitated back-contacted silicon heterojunction solar cells on thin wafers. As final project goal, efficiencies over 21.0 % are targeted. More specifically, the HET-IBC project consisted in six workpackages, namely:

- **WP1: device simulation and definition.** This workpackage aims at using numerical simulations to get insights into the BC-SHJ device physics and define critical parameters (emitter/BSF ratio, pitch...), and to optimize the overall cell architecture (anti-reflection coatings, passivation layers).
- **WP2: patterning feasibility.** In the frame of this WP, several techniques for a-Si:H and TCO/metal patterning are developed. Especially, shadow masking, dry- and wet-etching will be considered for a-Si:H patterning, while inkjet printing will be used for TCO/metal.
- **WP3: implementation of the HET-IBC core.** This WP aims at establishing a suitable process flow for the manufacturing of BC-SHJ devices with > 21.0 % efficiency.
- **WP4: front surface passivation and anti-reflection coatings.** This WP aims at developing high-bandgap, passivating layers to be used at the front side of BC-SHJ devices, both for passivation and anti-reflection purposes. The main target here is to maximize the cells  $J_{sc}$ .
- **WP5: contacting scheme for module integration.** In this WP, preliminary tests are carried out to define suitable strategies to encapsulate BC-SHJ devices.
- **WP6: mass production feasibility.** Based on the outputs of WPs 1 to 5, this WP will evaluate the Cost of Ownership for the mass production of BC-SHJ devices.

### In 2014, the focus has been set on:

- Continuous improvement of the BC-SHJ process flow, aiming at steadily increasing the cells efficiency;
- Development of alternatives to the shadow masking for the a-Si:H patterning, namely by developing wet- and dry-etching techniques;
- Characterization of the patterned rear layers and their optimization;
- Assessment of the current losses in BC-SHJ devices and routes to mitigate them.

## Work performed and results achieved in 2014

### 1. Alternative a-Si:H layers patterning techniques

In the 2013 OFEN report, we presented an a-Si:H layers patterning scheme based on shadow masks placed onto the substrates during the PECVD deposition steps. Though we obtained excellent results with this technique, its upscaling to larger devices and its robustness both appeared questionable. We

thus sought for alternative patterning techniques that are compatible with mass-production requirements.

Firstly, we investigated the wet-etch patterning of a-Si:H layers, using an HF:HNO<sub>3</sub>:CH<sub>3</sub>COOH solution. We control the etch rate of the a-Si:H layer by changing the HF content of the solution. We thus obtained etch rates between 0.1 Å/s and 1.1 Å/s, as illustrated in Fig. 1. Then, we deposited an etch mask using inkjet printing and etched the regions in-between the masked area. As a result, sharply defined a-Si:H patterns were obtained, as can be seen in Fig. 2. We also obtained promising passivation levels on these etched layers.

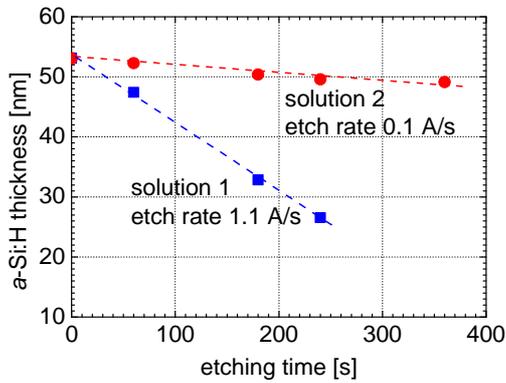


Fig. 1. Etch rates of a-Si:H layers using different HF:HNO<sub>3</sub>:CH<sub>3</sub>COOH solutions.

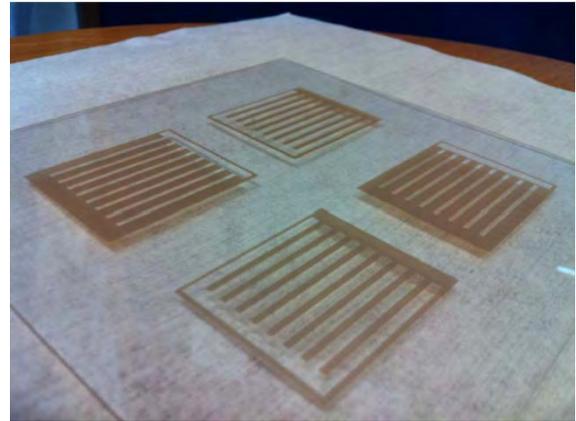


Fig. 2. Patterned a-Si:H layers using the wet etching technique.

Secondly, we developed a dry etching technique for the a-Si:H patterning. This technique is based on the use of an H<sub>2</sub> plasma that etches away the a-Si:H. To obtain local patterns, a shadow mask is required (see Fig. 3). Tuning the plasma conditions (pressure, power and gas ratios), we obtained an etch rate of 2.1 nm/min. This allows to efficiently pattern a-Si:H layers on large areas, as illustrated in Fig. 4. However, obtaining good passivation levels with this technique appears challenging.

Overall, the two techniques investigated above feature both pros and cons. Even though good passivation results were obtained using the wet-etching scheme, we think this technique is not cost-effective due to the high price and the large volumes of chemicals needed at mass-production level. Therefore the plasma etching technique could be more promising, provided good passivation levels are reached.

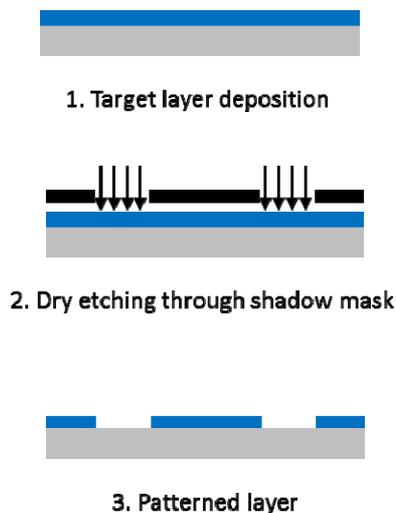


Fig. 3. Process flow for the patterning of a-Si:H layers using the H<sub>2</sub> plasma dry etching technique.

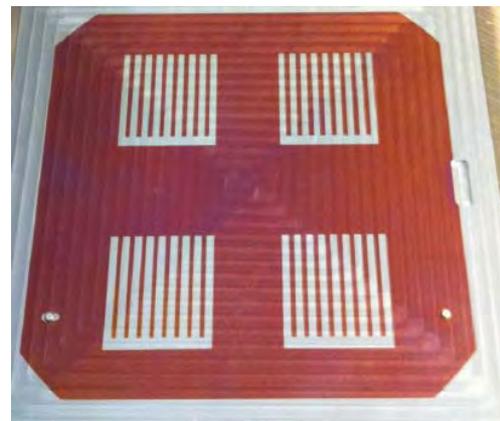


Fig. 4. Patterned a-Si:H layers using H<sub>2</sub> plasma dry etching.

## 2. Progress on rear-electrodes optimization

In BC-SHJ devices the TCO/metal electrode must be precisely aligned on top of the doped a-Si:H layers. The accuracy of the employed alignment technologies determines therefore also the minimum gap distance that must be maintained, while designing the back-electrode, in-between the edge of the doped a-Si:H fingers and the edge of the TCO/metal electrode fingers (indicated with the parameter “d” in Fig. 5).

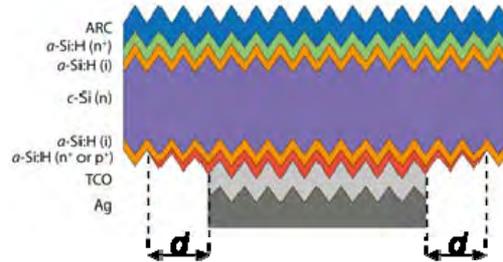


Fig. 5. Gap “d” between the edges of the doped a-Si:H fingers and the TCO/metal electrode.

This minimum distance should be always maintained in order to avoid any undesired direct contact between the TCO and the intrinsic a-Si:H layers covering the whole c-Si back surface. Previously reported results [3] were associating detrimental effects on overall device performances to a reduced back-electrode coverage of the p-type a-Si:H layer. Therefore, we decided to investigate possible effects of an increased distance “d”, also in our BC-SHJ devices, and to assess the suitability of the developed processing technology. As reported in Fig. 6, we observed instead, unexpectedly, degrading FF,  $V_{oc}$  and overall solar cell conversion efficiencies for increasing back-electrode coverages. The same detrimental effects were shown to appear, for a fixed back-electrode geometry, for decreasing deposition times of the p-type a-Si:H layer. We linked these effects to the layer thickness tapering induced by patterning via *in-situ* shadow masking. The observation and the magnitude of this tapering effect are more extensively illustrated in Section 3. From this analysis, we could conclude that, in our technology, the employed a-Si:H layer patterning method is a more critical factor than the layer alignment accuracy.

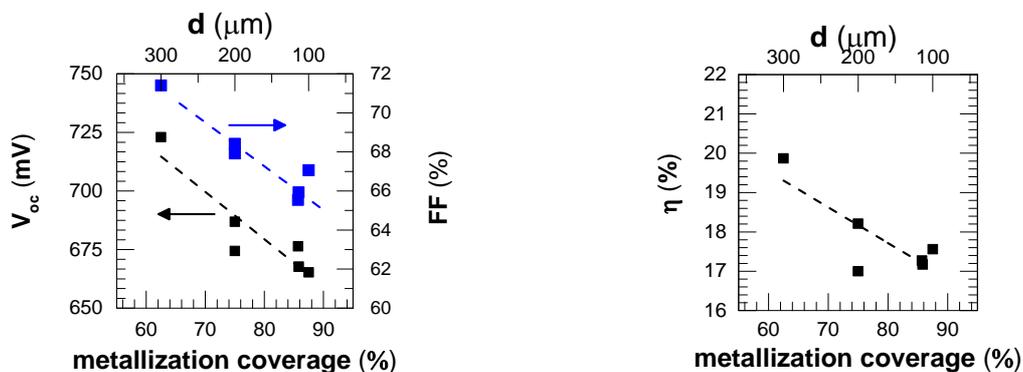


Fig. 6. Variation of solar cell electrical parameters with changing metallization coverage of the emitter region (i.e. changing distance “d” between edge of TCO/metal and p-type a-Si:H fingers) in our BC-SHJ devices.

## 3. Accurate measurement of the patterned a-Si:H fingers

To improve the BC-SHJ cells results, it is mandatory to be able to control the shape of the patterned a-Si:H fingers. We thus developed a method to measure the height and width of the a-Si:H fingers. The patterns under test are illuminated by a laser with a wavelength of 442 nm and a spot size of 2  $\mu\text{m}$ . The Raman scattering peak of the c-Si substrate is attenuated due to the absorption of the laser light on the a-Si:H fingers above. Hence, we can calculate the a-Si:H thickness from the attenuation of the c-Si Raman peak (see Fig. 7). Repeating this measurement at different positions on the a-Si:H fingers allows to realize an accurate mapping of their shape. A typical height profile is plotted in Fig. 8. As can be seen, the a-Si:H finger features a strong thickness tapering at its edges. As described in Section 2, several experimental evidences suggest that this tapering is detrimental for the BC-SHJ cell results. It

especially can lead to severe  $V_{oc}$  and FF losses. We thus adjusted accordingly our a-Si:H deposition parameters to mitigate this tapering.

As a conclusion, this Raman-based technique proved very useful in providing insights into the shape of the a-Si:H fingers and how to control it.

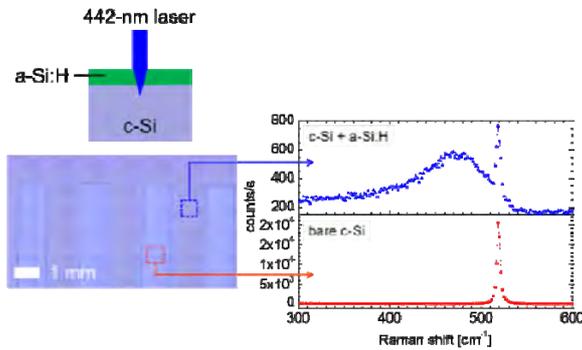


Fig. 7. Principle of the measurement of patterned a-Si:H layers thickness using Raman spectroscopy.

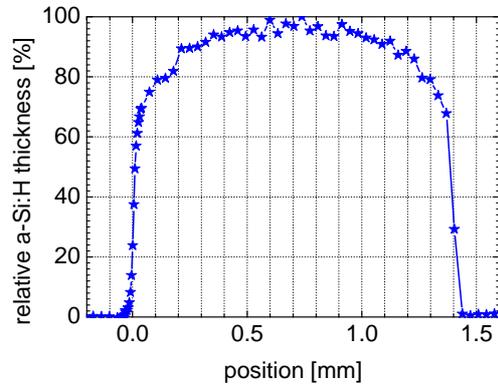


Fig. 8. Illustrative example of the height profile of an a-Si:H finger patterned using in-situ shadow masking.

#### 4. BC-SHJ devices processing

As a reminder, the BC-SHJ structure and its process flow are depicted in Fig. 9 and 10, respectively. In 2014, this process flow has been continuously improved. **As a major achievement, a champion cell featuring an efficiency of 21.5 % has been obtained.** Its IV curve and parameters are plotted in Fig. 11. This excellent result is the European record to date for such a device, and ranks 3<sup>rd</sup> worldwide, as can be seen from the state-of-the-art for BC-SHJ devices given in Table I.

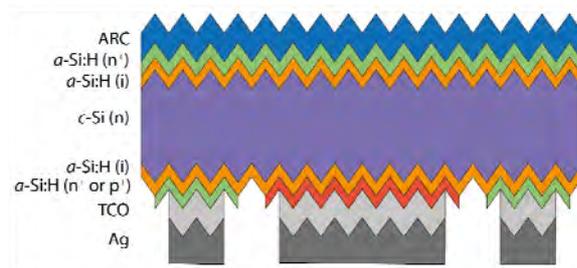


Fig. 9. Architecture of our BC-SHJ device.

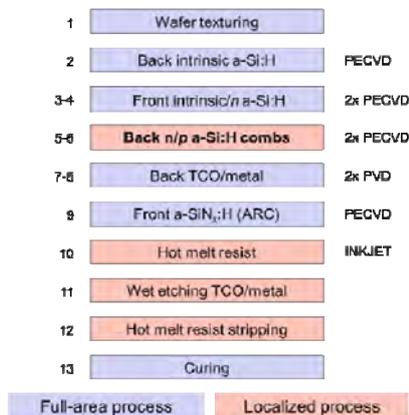


Fig. 10. Process flow for the BC-SHJ devices developed within the frame of this project.

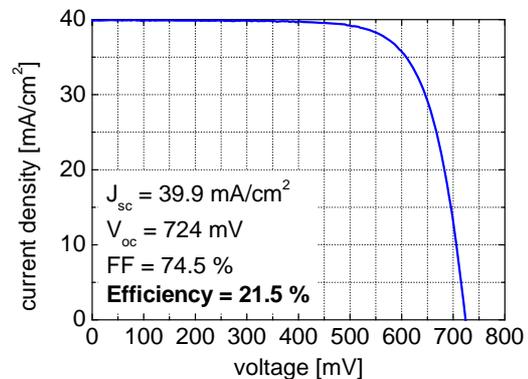


Fig. 11. IV-curve of the best BC-SHJ device produced during this project.

Table I. State-of-the-art of BC-SHJ devices with efficiency > 19.0 %.

Affiliation and ref.	$\eta$ [%]	$V_{oc}$ [mV]	$J_{sc}$ [mA/cm <sup>2</sup> ]	$V_{oc}$ [mV]	FF [%]
Panasonic, Japan [4]	25.6	740	41.8	740	82.7
Sharp, Japan [2]	25.1	736	41.7	736	81.9
EPFL, Switzerland [5]	21.5	724	39.9	724	74.5
LG, Korea [6]	20.5	716	37.5	716	76.4
HZB, Germany [7]	20.2	673	39.7	673	75.7
CEA-INES, France [8]	19.0	699	34.6	699	78.5

## 5. Analysis of $J_{sc}$ losses in BC-SHJ devices

Even though our champion cell currently features a  $J_{sc}$  close to 40.0 mA/cm<sup>2</sup>, further  $J_{sc}$  improvements are mandatory to reach higher efficiency. We hence aimed at (i) identifying the origins of the  $J_{sc}$  losses in our BC-SHJ devices, (ii) calculating the resulting  $J_{sc}$  losses breakdown, and (iii) mitigating these losses.

The  $J_{sc}$  losses are calculated by integrating the area between the external quantum efficiency (EQE) and the absorption curves, as proposed in [9], [10], where further details can be found.

Fig. 12 plots the  $J_{sc}$  losses breakdown of our current best BC-SHJ, as well as the projection for a future,  $J_{sc}$ -optimized device. Looking at the current best device, it is noticeable that the most significant contributions to the overall  $J_{sc}$  losses are the UV and IR losses, closely followed by the reflection losses and long-wavelength light escaping at the front. In contrast, bulk losses and light escaping at the back are less significant.

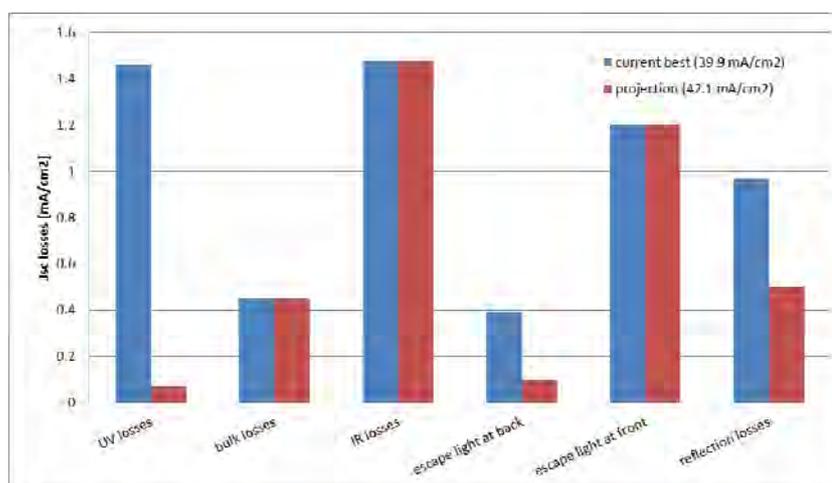


Fig. 12.  $J_{sc}$  losses breakdown of our current best BC-SHJ device and projection for a future  $J_{sc}$ -optimized device.

Below are some routes that are currently under investigation to mitigate the  $J_{sc}$  losses and reach  $J_{sc}$  values > 42.0 mA/cm<sup>2</sup>:

- **UV losses:** a complete re-design of the BC-SHJ front side is needed to minimize the UV losses. We are currently developing high-bandgap passivating layers that will eventually allow to keep UV losses < 0.1 mA/cm<sup>2</sup> while featuring excellent passivation.
- **Reflection losses:** we developed a SiN<sub>x</sub>/SiO<sub>x</sub> double-layer anti-reflection coating. We obtained a gain of 0.4 mA/cm<sup>2</sup> compared to the previous single-layer ARC.
- **Light escaping at the back:** we demonstrated that a large coverage of the metal electrodes on the a-Si:H fingers helps mitigating the amount of light escaping at the back.

Strategies to mitigate the IR losses and long-wavelength light escaping at the front are ongoing. A paper with further details will be published soon [11].

## Evaluation of 2014 and perspectives for 2015

In 2014 the BC-SHJ cells process flow has been steadily improved and resulted in a champion device featuring an efficiency of 21.5 %. This is the European record to date for such a device, and ranks 3<sup>rd</sup> worldwide. We also investigated wet-etching and H<sub>2</sub> plasma dry etching as alternatives to the shadow masking for the a-Si:H patterning. Further work is needed to bring these techniques to maturity. Beside cells processing, we also obtained interesting insights into the device physics. Especially, we calculated the breakdown of the J<sub>sc</sub> losses in BC-SHJ devices and identified their origin. We then proposed several ways to mitigate them, showing that reaching J<sub>sc</sub> > 42.0 mA/cm<sup>2</sup> is feasible in the mid-term. Regarding characterization, we developed a technique based on Raman scattering to accurately measure the height profile of the patterned a-Si:H fingers. With this technique we identified the features in the a-Si:H fingers shape that could be detrimental to the cell result, and we thus accordingly adjust our processing parameters.

The CTI project ended 01.08.2014. It is rated as very successful by both the research and the industrial partners. All milestones and deliverables were fulfilled in due time. Besides, we published several papers in the frame of this CTI project [5], [12], [13], [14], [15].

We are truly convinced that there is still room to improve our BC-SHJ devices. We established a clear roadmap towards > 24.0 % efficient devices. Developments to reach this target will thus go on in 2015.

## References

- [1] K. Masuko, M. Shigematsu, T. Hashiguchi, D. Fujishima, M. Kai, N. Yoshimura, T. Yamaguchi, Y. Ichihashi, T. Mishima, N. Matsubara, T. Yamanishi, T. Takahama, M. Taguchi, E. Maruyama, and S. Okamoto, "Achievement of More Than 25 % Conversion Efficiency with Crystalline Silicon Heterojunction Solar Cell," *IEEE J. Photovoltaics*, vol. 4, no. 6, pp. 1433–1435, 2014.
- [2] J. Nakamura, N. Asano, T. Hieda, C. Okamoto, H. Katayama, and K. Nakamura, "Development of Heterojunction Back Contact Si Solar Cells," *IEEE J. Photovoltaics*, vol. 4, no. 6, pp. 1491–1495, 2014.
- [3] T. Desrues, P.-J. Ribeyron, A. Vandeneynde, A.-S. Ozanne, F. Souche, D. Muñoz, C. Denis, D. Diouf, and J.-P. Kleider, "B-doped a-Si:H contact improvement on silicon heterojunction solar cells and interdigitated back contact structure," *Phys. Status Solidi*, vol. 7, no. 3–4, pp. 1011–1015, Jan. 2010.
- [4] K. Masuko, M. Shigematsu, T. Hashiguchi, D. Fujishima, M. Kai, N. Yoshimura, T. Yamaguchi, Y. Ichihashi, T. Mishima, N. Matsubara, T. Yamanishi, T. Takahama, M. Taguchi, E. Maruyama, and S. Okamoto, "Draft - Achievement of more than 25% conversion efficiency with crystalline silicon heterojunction solar cell," 2014.
- [5] A. Tomasi, B. Paviet-Salomon, D. Lachenal, S. Martin de Nicolas Agut, A. Descoedres, J. Geissbühler, S. De Wolf, and C. Ballif, "Back - Contacted Silicon Heterojunction Solar Cells with Efficiency > 21 %," *IEEE J. Photovoltaics*, vol. 4, no. 4, pp. 1046–1054, 2014.
- [6] S.-Y. Lee, H. Choi, H. Li, K. Ji, S. Nam, J. Choi, S.-W. Ahn, H.-M. Lee, and B. Park, "Analysis of a-Si:H/TCO contact resistance for the Si heterojunction back-contact solar cell," *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 120, pp. 412–416, Jan. 2014.
- [7] N. Mingirulli, J. Haschke, R. Gogolin, R. Ferré, T. F. Schulze, J. Düsterhöft, N.-P. Harder, L. Korte, R. Brendel, and B. Rech, "Efficient interdigitated back-contacted silicon heterojunction solar cells," *Phys. status solidi - Rapid Res. Lett.*, vol. 5, no. 4, pp. 159–161, Apr. 2011.
- [8] S. De Vecchi, T. Desrues, F. Souche, D. Muñoz, and M. Lemiti, "Laser assisted patterning of hydrogenated amorphous silicon for interdigitated back contact silicon heterojunction solar cell," *Proc. SPIE*, vol. 8473, p. 84730R–1, Oct. 2012.
- [9] Z. C. Holman, A. Descoedres, L. Barraud, F. Z. Fernandez, J. P. Seif, S. De Wolf, and C. Ballif, "Current Losses at the Front of Silicon Heterojunction Solar Cells," *IEEE J. Photovoltaics*, vol. 2, no. 1, pp. 7–15, 2012.
- [10] Z. C. Holman, A. Descoedres, S. De Wolf, and C. Ballif, "Record Infrared Internal Quantum Efficiency in Silicon Heterojunction Solar Cells With Dielectric/Metal Rear Reflectors," *IEEE J. Photovoltaics*, vol. 3, no. 4, pp. 1243–1249, Oct. 2013.
- [11] B. Paviet-Salomon, A. Tomasi, S. De Wolf, M. Despeisse, D. Lachenal, and C. Ballif, "Analysis and mitigation of current losses in back-contacted silicon heterojunction solar cells (working paper)."
- [12] A. Tomasi, B. Paviet-salomon, D. Lachenal, S. Martin, D. N. Agut, A. Descoedres, S. Nicolay, S. De Wolf, C. Ballif, and A. P. Technology, "Lithography-free Interdigitated Back-Contacted Silicon Heterojunction Solar Cells with Efficiency > 21 %," in *Proceedings of the 40th IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, 2014.

- [13] D. Lachenal, D. Baetzner, W. Frammelsberger, B. Legradic, J. Meixenberger, P. Papet, B. Strahm, B. Paviet-Salomon, A. Tomasi, N. Holm, S. De Wolf, and C. Ballif, "Interdigitated back contact design combined with silicon heterojunction technology : a potential candidate for very high efficiency solar cells," in *Proceedings of the 29th European Photovoltaic Solar Energy Conference*, 2014.
- [14] J. Geissbühler, S. De Wolf, A. Faes, N. Badel, Q. Jeangros, A. Tomasi, L. Barraud, A. Descoedres, M. Despeisse, and C. Ballif, "Silicon heterojunction solar cells with copper - plated grid electrodes : Status and comparison with silver thick - film techniques," *IEEE J. Photovoltaics*, vol. 4, no. 4, pp. 1055–1062, 2014.
- [15] J. Geissbühler, S. De Wolf, B. Demareux, J. P. Seif, D. T. L. Alexander, L. Barraud, and C. Ballif, "Amorphous/crystalline silicon interface defects introduced by hydrogen plasma treatment," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 102, 2013.



# NODHID – THIN FILM ON CRYSTALLINE SILICON: NOVEL CELL AND MODULE DESIGNS FOR HIGH ENERGY DENSITY PHOTOVOLTAICS

## Annual Report 2014

Author and Co-Authors	Jonas Geissbühler, Stefaan De Wolf and Christophe Ballif
Institution / Company	IMT-PVLAB / EPFL, Neuchâtel
Address	Maladière 71b , 2000 Neuchâtel
Telephone, E-mail, Homepage	0041 21 695 43 52, <a href="mailto:Jonas.geissbuehler@epfl.ch">Jonas.geissbuehler@epfl.ch</a> , <a href="http://pvlab.epfl.ch/">http://pvlab.epfl.ch/</a>
Project- / Contract Number	NODHID
Duration of the Project (from – to)	August 2011 – July 2015
Date	15.12.2014

### ABSTRACT

This project deals with the realization of high-efficiency silicon heterojunction solar cells. For this purpose, new techniques related to advanced metallization and patterning of films of these devices are investigated.

First, advanced characterization of electrodeposited nickel-copper metallization has been done by using electron microscopy. Such metallization is used as front grid. As a result, macro- and nanometric voids have been detected at the nickel/ indium tin oxide interface which results to a lower adhesion of the metallic finger.

To overcome this issue, during the past year, a new process based on an evaporated seed-layer of copper has been successfully developed. With this new process, the finger adhesion has been significantly improved and the metallization process has been simplified.

Finally, a better understanding of the charged carrier flow in the device has been obtained by measuring the voltage distribution at the indium tin oxide surface. By measuring this, the current density in the front transparent conductive oxide layer can be extracted. As a result, a significant part of the current generated by the solar cell is laterally flowing through the wafer instead of exclusively in the front transparent conductive oxide when the cell is operated at its maximum power point.

## Introduction

Recently, silicon heterojunction (SHJ) solar cells established the new record efficiency for crystalline silicon solar cell with an efficiency of 25.6 % demonstrated [1]. This high energy-conversion efficiency is enabled by the remarkable surface passivation provided by the hydrogenated amorphous silicon (a-Si:H) buffer layers. Next, a-Si:H p- and n-doped are deposited to form the emitter and the back surface fields, acting as hole and electron contacting layers, respectively. Lateral transport of charged carrier is ensured by the transparent conductive oxide (TCO) layers and by an electrical front-grid commonly done by screen-printing of a low-temperature silver paste [2].

## Project goals

In the framework of the NODHID project (NOvel cell and module Designs for HIgh energy Density PhotoVoltaics), the photovoltaic and thin-film electronic laboratory of the institute of microengineering of the EPFL (IMT-PVLab) is developing new cell architectures in order to further increase the energy-conversion efficiency of SHJ solar cells. This project is financially supported by the AXPO Naturstrom Fonds. During the year 2014, the main objectives of the NODHID projected have been as follow:

- Advanced characterization of the interface properties in a Ni/Cu electrodeposited contact.
- Development of new processes to improve further the reliability of electrodeposited contacts.
- Cell performance analysis of devices with Ni/Cu electrodeposited contact.

## Work carried out and results achieved

### Advanced charaterization of front-metallization made by Ni-Cu electrodeposition

Due to the relatively low electrical conductivity of the low temperature silver paste used in the SHJ metallization and to the variable price of silver, copper electrodeposition contact is often presented as a reliable alternative to standard screen-printed contacts. Since adhesion between copper directly electrodeposited on indium tin oxide (ITO) is difficult to obtain, we demonstrated earlier a reliable process based on a first deposition of a  $\sim 1\mu\text{m}$  thick nickel layer to promote the adhesion followed then by  $\sim 14\mu\text{m}$  of copper [3]. However, due to their narrow width ( $\sim 15\mu\text{m}$ ), these metal lines are more sensitive to thermal stress than their silver printed counterpart and can peel-off more easily. To understand better why the adhesion is lower than for the screen-printing cells, we carried out advanced characterization with electronic microscopy. First, focused ion beam (FIB) cross-section of a Ni-Cu metal finger has been prepared and observed by using scanning electron microscopy (SEM). As displayed in Fig. 1 a), the nickel adhesion layer doesn't show uniform coverage on the ITO layer and macroscopic cracks are observed [Fig. 1 (c)]. To investigate further the nickel-ITO interface, a FIB-lamella has been prepared and observed by using transmission electron microscopy (TEM).

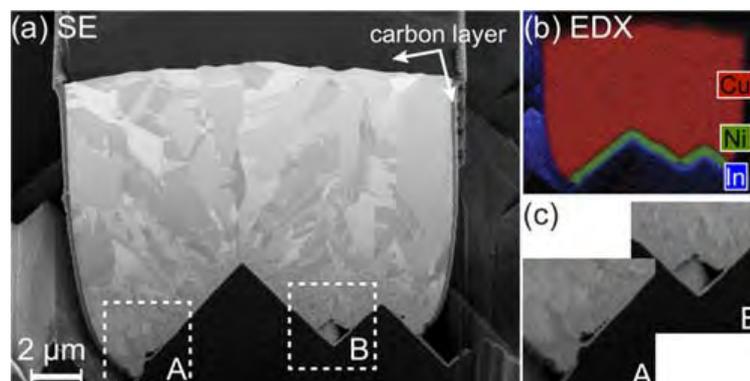


Fig. 1. (a) Secondary-electron SEM image of a Ni/Cu finger FIB cross section. (b) EDX maps of copper, nickel, and indium. (c) Magnified view of two different kinds of defects observed at the ITO/Ni interface. From [3].

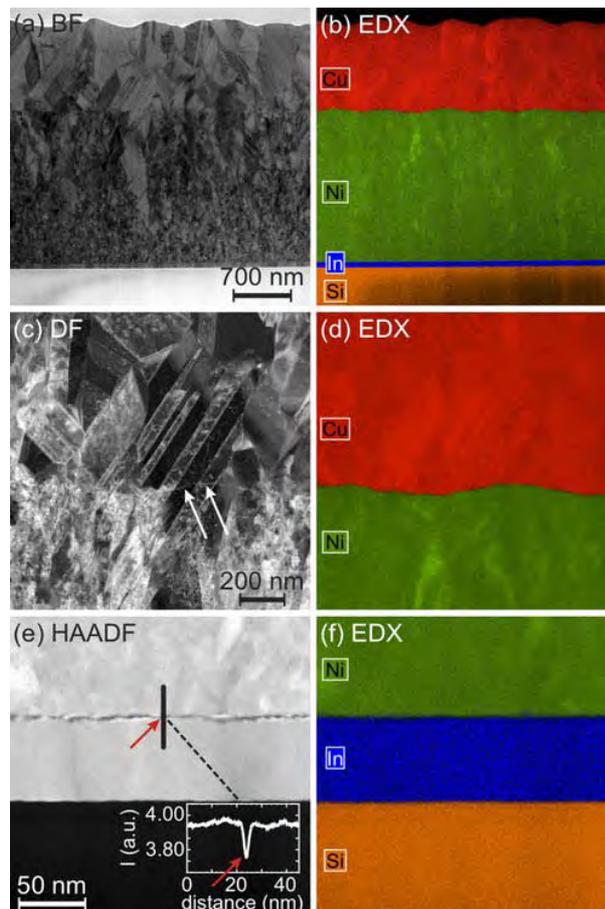


Fig. 2. (a) Bright-field TEM observation of the entire Si/ITO/Ni/Cu stack and (b) EDX map of the image displayed in (a). (c) Dark-field image of the Ni/Cu interface, with the corresponding EDX map in (d). Arrows indicate contrast features spanning across the Ni/Cu interface in (c). (e) High-angle annular darkfield image of the Si/ITO/Ni interfaces along with an intensity profile across the ITO/Ni interface, with arrows indicating porosity. (f) EDX map of the image displayed in (e). From [3].

Figure 2 (a) and (b) shows respectively the bright-field TEM image of the ITO/Ni/Cu stack and its energy dispersive x-ray maps. We observe that the layers do not present any voids in the middle of the bulk of the layers. A very good interface quality is observed between the nickel and the copper [Fig. 2 (c)] with even the presence of crystal epitaxy of copper on the nickel layer. As a consequence, a very good adhesion between the nickel and the copper layers was observed. However, as shown in Fig. 2 (e), nanometric voids are revealed by the high-angle annular darkfield image (HAADF). This, linked with the macroscopic voids observed by FIB/SEM in Fig.1 (a) and (c) explains why adhesion may be critical between the ITO and the nickel layers. As a consequence, growth rate and final thicknesses of the metal layers must be carefully controlled in order to reduce as much as possible the internal stress contained in the metallic finger to prevent its peel-off.

#### **Development of new processes to improve further the reliability of electrodeposited contacts.**

In order to further improve the adhesion of metallic fingers, another metallization process has been developed. In this process, the nickel plating on the ITO, which induces nano- and macroscopic defects, is replaced by evaporation of a copper seed-layer on the ITO. Next, photolithography is carried out for the patterning and copper plating is done to locally thicken the copper. Finally, the photoresist is removed and the copper seed-layer between the fingers is back-etched. Figure 3 presents a summary of this metallization process.

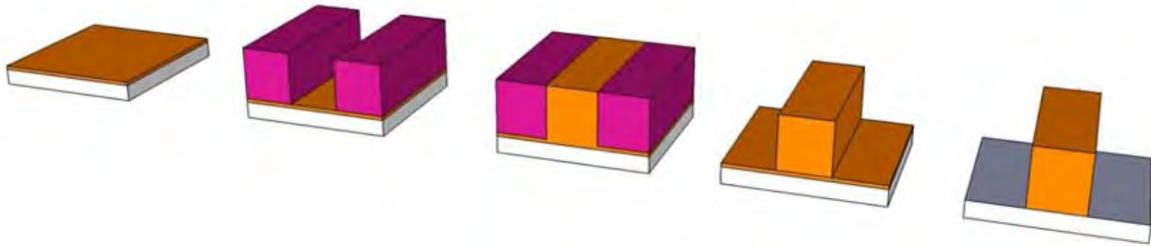


Fig. 3. Metallization process with the copper seed-layer deposition, the photolithography, the copper electrodeposition and the seed-layer back-etching.

By using this process, better finger adhesion have been observed compared to the former nickel-copper process with similar and even better cell performances. Moreover, this process removes the nickel electroplating and reduces the overall complexity of the metallization process. [4]

### Cell performance analysis of devices with Ni/Cu electrodeposited contact.

In order to better understand how carriers are collected by the front-electrode, voltage scanning of the front-TCO has been made. As seen on Fig. 4 (b), at the short-circuit condition, the current flowing laterally through the TCO produces a voltage drop. By measuring the magnitude of this drop and by knowing the sheet resistance of the front-TCO, the amount of current passing in the front TCO can be measured. For the short-circuit condition this correspond exactly with the  $J_{SC}$  current. As a consequence, we can deduce that the entire part of the current is following through the front-TCO when the cell is at the short-circuit condition. However, the magnitude of this voltage drop is significantly reduced when the cell is operated at its maximum power point [Fig.4 (a)]. By comparing the current deduced by this technique with the current extracted from the cell at this operation point, we have found that more than the half of the current is flowing throuh the wafer and not exclusively in the front-TCO .

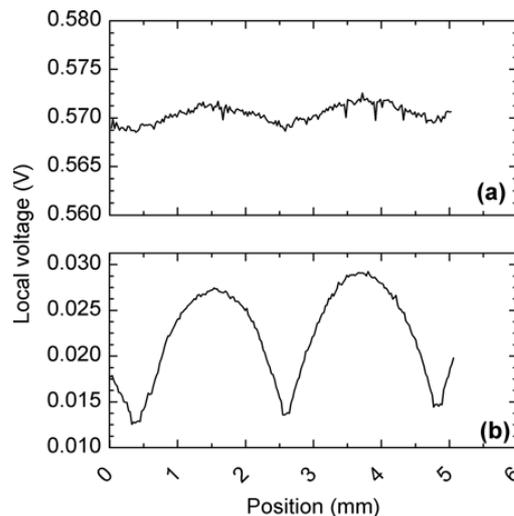


Fig. 4. Voltage scan of the front-TCO of a SHJ cell operating at its: (a) maximum power point (b) at the short-circuit condition. From [3].

### National cooperation

For the metallization of SHJ solar cells presented here, a collaboration between the Centre Suisse d'électronique et de microtechnique (CSEM), the Centre interdisciplinaire de microscopie électronique (CIME) de l'EPFL et le laboratoire de photovoltaïque (PV-LAB) of EPFL has been established.

### Evaluation 2014 and Outlook 2015

The work achieved during the year 2014 enabled the manufacturing of SHJ solar cells with more reliable electrodeposited copper front-grid. In addition, the overall process for the metallization has been simplified by removing the nickel adhesion layer.

As an outlook, more experiments and characterizations of such contacts will be made on other TCO than indium tin oxide. By successfully merging new TCOs with better optical and electronical properties with the copper electrodeposition, efficiencies of SHJ solar cell will be further increased.

## References

- [1] K. Masuko, et al., "Achievement of more than 25% conversion efficiency with crystalline silicon heterojunction solar cell," in 40th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Denver, Colorado, USA, 2014.
- [2] S. De Wolf, A. Descoedres, Z. C. Holman, and C. Ballif, *Green* **2**, 7 (2012)
- [3] Jonas Geissbühler et al. *IEEE JOURNAL OF PHOTOVOLTAICS*, **4**,4, (2014)
- [4] Jonas Geissbühler et al. 5th metallization workshop of silicon solar cells. Konstanz (2014)



## TRIGGER

# HIGH EFFICIENCY TRIPLE-JUNCTION THIN FILM SILICON SOLAR CELLS IMPLEMENTING AMORPHOUS SILICON-GERMANIUM ALLOYS

## Annual Report 2014

Author and Co-Authors	J.-W. Schüttauf, F.-J. Haug, C. Ballif
Institution / Company	EPFL, IMT PV-Lab
Address	Rue A.-L. Breguet 2, CH-Neuchatel
Telephone, E-mail, Homepage	<a href="http://www.empa.ch/tfpv">www.empa.ch/tfpv</a>
Project- / Contract Number	CTI-13333.1 / TRIGGER
Duration of the Project (from – to)	1. 3. 2012 – 28. 2. 2015
Date	16. 12. 2014

### ABSTRACT

The main goal of the CTI-Trigger project is to fabricate thin-film silicon triple-junction solar cells with stabilized efficiencies exceeding 13%. Two device configurations are targeted. The first with an amorphous top tandem of a-Si:H and a-SiGe:H, combined with a  $\mu\text{c-Si:H}$  bottom cell, the other with an a-Si:H top cell in combination with two stacked  $\mu\text{c-Si:H}$  cells that represent a bottom tandem. The first configuration offers the advantage of thin cells and thus faster deposition times, but it can potentially suffer from stronger light induced degradation. The second approach needs thicker films and thus longer deposition time, but will exhibit a better stability. Therefore, one aspect of the project is also to study the most cost-effective option for industrial production.

## Project goals

The main goal the demonstration of thin-film silicon triple-junction solar cells with stabilized efficiencies exceeding 13%. In the original description of work of the project, this efficiency was targeted with an amorphous silicon (a-Si:H) top cell, an amorphous silicon-germanium (a-SiGe:H) middle cell and a microcrystalline silicon (uc-Si:H) bottom cell. The motivation was a result reported by United Solar on a triple-junction cell with silicon-germanium alloy as middle cell exceeding 16% efficiency (initial).

## Status

At PV-lab, high-quality a-Si:H and uc-Si:H single-junction devices and combined tandem cells were already available before the start of the project. No research had been conducted on a-SiGe:H, however, so the main focus in the first two years of the project was to develop high-quality a-SiGe:H single-junction devices. We mostly investigated Ge-content and hydrogen dilution related to material quality and stability. Furthermore, we thoroughly investigated which is the ideal band gap grading profile of the absorber layer, and modified the p-type layer compared to standard a-Si:H devices. Hydrogen dilution values close to the amorphous/(micro)crystalline transition were found to lead to the most stable material. A band gap grading profile of the absorber layer with a high band gap at the interfaces (avoiding band offsets) and the lowest band gap relatively close to the p/i interface clearly gave the best results.

For the p-layer, an a-SiC:H layer led to too severe band offsets, thereby hindering charge transport. When this layer was replaced by a standard a-Si:H p-layer, the FF showed a considerable increase, albeit that a loss in current density was found due to the reduced band gap of this film. The most important and tunable parameter is the Ge-content, which enables the fabrication of devices with different band gaps. These results are presented below.

## Work during the reporting period

In Table 1, an overview of the relevant device parameters (open circuit voltage ( $V_{OC}$ ), fill factor (FF), short-circuit current density ( $J_{SC}$ ) and efficiency) is shown for different  $GeH_4/SiH_4$  gas flow ratios, leading to different Ge contents in the absorber layers. Higher Ge contents lead to higher (infra)red responses, but also to reduced Voc and FF values. The efficiencies of these a-SiGe:H-based single-junction cells are similar to the best ones that can be found in the literature [1,2].

Table 1: Device performance of single-junction a-SiGe:H cells.

$GeH_4/SiH_4$ flow ratio	$V_{OC}$ (mV)	FF	$J_{SC}$ (mA/cm <sup>2</sup> )	Eff (%)
10%	795	0.71	17.9	10.1
11%	783	0.69	18.3	9.9
12%	766	0.65	19.0	9.5
13%	751	0.65	19.4	9.5

The two devices with the highest  $GeH_4/SiH_4$  gas flow ratios (i.e. 12% and 13%) were subsequently implemented in a-Si:H/a-SiGe:H/uc-Si triple-junction cells. The main device parameters of these triple junction cells are shown in Table 2. The EQE curves (both initial and after 1000 h of light soaking) of the best device are shown in Figure 1.

Table 2: Overview of all relevant solar cell parameters for the two best triple-junction devices fabricated so far. Both initial and light-soaked results are presented.

	12%	13%	12%	13%
	Initial	Initial	Light-Soaked	Light-Soaked
$J_{SC}$ (mA/cm <sup>2</sup> )	9.1	9.2	8.9	8.8
$V_{OC}$ (V)	2.09	2.05	2.00	1.96
FF (%)	71.4	69.5	63.5	61.6
Eff (%)	13.6	13.1	11.3	10.6

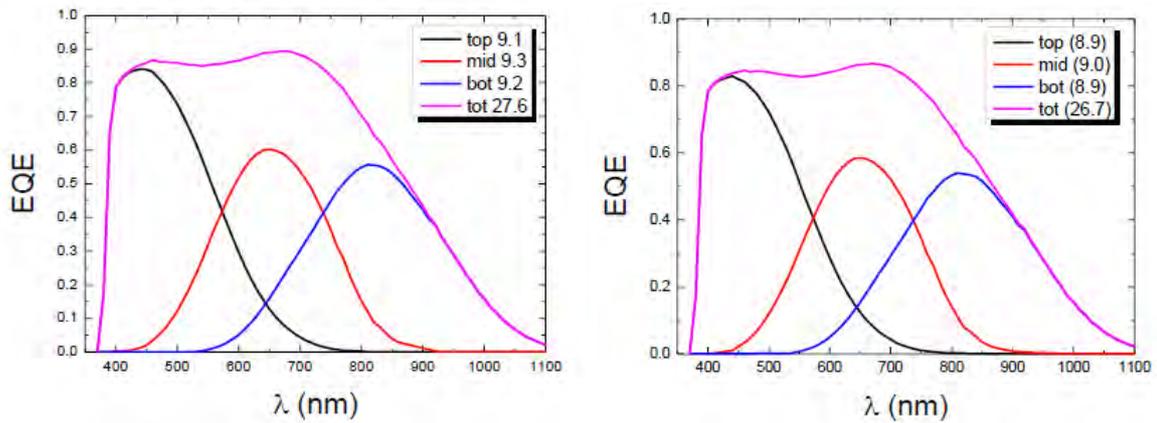


Figure 1: EQE curves (initial, right and stable, left) of our best a-Si:H/a-SiGe:H/ $\mu$ c-Si:H triple cell.

The best triple-junction device has an initial efficiency of 13.6% and a stabilized efficiency of 11.3% [3]. With triple-junction cells in a-Si:H/ $\mu$ c-Si/ $\mu$ c-Si:H configuration, however, we have been able to fabricate a device with a similar initial efficiency (13.7%), but a considerably higher stabilized efficiency of 12.8% thanks to a very low light-induced degradation. This low light-induced degradation was obtained by using thin a-Si:H top cells, and highly stable  $\mu$ c-Si:H middle and bottom cells. These results were already obtained and described in progress reports in 2013, and published in 2014 [4].

After having compared the results and performed cost calculations, we have decided to continue with the a-Si:H/ $\mu$ c-Si/ $\mu$ c-Si:H device configuration in the remainder of the project. In order to obtain even higher efficiencies, the incorporation of a top cell with a higher band gap seems to be indispensable. Furthermore, the quality of the  $\mu$ c-Si:H material should be further improved by using modified plasma conditions that allow for the fabrication of denser material. Improved intermediate reflector layers, especially after the middle cell, as well as a modified back contact are also expected to lead to better cell results. More transparent front electrodes with sophisticated surface morphologies will also be tested in these devices.

Finally, first tests on quadruple-junction devices have been performed. A device with an open circuit voltage as high as 2.57 V has been fabricated. Its efficiency, however, was limited to 10.1% due to non-optimized current matching. With building blocks currently available in the lab, quadruple-junction devices in a-Si:H/a-Si:H/ $\mu$ c-Si:H/ $\mu$ c-Si:H configuration with stabilized efficiencies exceeding 14% should be within reach. A detailed roadmap has been presented in Ref [3]. Briefly said, this device should employ (i) very transparent front electrodes, (ii) a high-gap a-Si:H top cell with an open circuit voltage around 1 V [5], (iii) a low-gap a-Si:H second cell leading to an excellent current density for this material [5], (iv) an excellent in-house intermediate reflector that has already shown its merits in record tandem devices [6], (v) a high-Voc  $\mu$ c-Si:H third cell [7], and (vi) a high current  $\mu$ c-Si:H bottom cell [4], possibly fabricated using an SiF<sub>4</sub> plasma chemistry to obtain even higher current density in the future [7].

## References

- [1] B. Yan *et al.*, in Proc. of the 33<sup>rd</sup> IEEE PVSC, San Diego, 2008, pp. 1-6.
- [2] B. Yan *et al.*, J. Vac. Sci. Technol. A 30 (2012), 04D108.
- [3] J.W. Schüttauf *et al.*, Accepted for publication in Sol. Energy Mater. Sol. Cells (2015).
- [4] J.W. Schüttauf *et al.*, IEEE J-PV 4 (2014), 757.
- [5] M. Stuckelberger *et al.*, Accepted for publication in Prog. Photovolt: Res. Appl. (2014).
- [6] M. Boccard *et al.*, IEEE J-PV 4 (2014), 1368.
- [7] S. Hänni, Ph.D. Thesis, EPFL (2014).



# SOLUTION DEPOSITED ZNO-BASED FRONT CONTACTS FOR CIGS SOLAR CELLS

## SWISS PROJECT WITHIN “NOVAZOLAR” SOLAR-ERA NETWORK

### Annual Report 2014

Author and Co-Authors	Jérôme Steinhauser, Yaroslav Romanyuk and Ayodhya Tiwari
Institution / Company	Laboratory for Thin Films and Photovoltaics, Empa
Address	Überlandstrasse 129, 8600 Dübendorf
Telephone, E-mail, Homepage	058 765 4169, <a href="mailto:yaroslav.romanyuk@empa.ch">yaroslav.romanyuk@empa.ch</a> , <a href="http://www.empa.ch/ftpv">www.empa.ch/ftpv</a>
Project- / Contract Number	SI/501100 / SI/501100-01
Duration of the Project (from – to)	01.07.2014 – 30.06.2016
Date	05.12.2014

#### ABSTRACT

The aim of the “NovaZolar” project within the European SOLAR-ERA.NET program is to develop an innovative, low-cost process of in-situ monitored aqueous solution deposition of the ZnO-based buffer-window combination for high-efficiency CIGS solar cells. The novelty is to use a single deposition technique – CBD – for depositing the Cd-free window-buffer combination that should ultimately replace the present CdS buffer by CBD followed by the sputtered i-ZnO/Al:ZnO window. A solar efficiency of > 20% is targeted, which is comparable to that for best cells with CdS buffer and should translate into CIGS module efficiency of 14-16%.

Besides the scientific and technological impact for developing the innovative low-temperature solution deposition for the transparent conducting oxide (TCO) and testing a new CIGS solar cell architecture, the main commercial impact will be on i) cost reductions by avoiding expensive vacuum sputtering of ZnO and toxic Cd waste disposal, and ii) simplified TCO equipment making turn-key CIGS production lines more cost competitive. Reliable techniques for process monitoring and quality control at both in-situ and on-line levels will improve fabrication yield, and hence also contribute to reduction of manufacturing costs. Cost analysis and technical assessment of transferability of the developed solution techniques will be done by CIGS-manufacturing companies from Switzerland, France and Germany in this industry-driven project.

## Introduction and Project Goals

The Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub> (CIGS) thin film solar cell technology has made a steady progress within the last decade by raising the conversion efficiency to 21.7% on laboratory scale [1], thus exceeding the highest efficiency for polycrystalline silicon cells [2]. Champion CIGS modules achieve efficiencies of up to 17.4% as mini-modules [3] or 15.9% for standard size [4], whereas commercially available CIGS modules are typically 11-12% efficient [5]. A state-of-art CIGS solar cell has the configuration substrate/Mo contact/CIGS absorber/CdS buffer/i-ZnO/Al:ZnO window/metal grid. The CdS buffer layer is deposited by chemical bath deposition (CBD), and the transparent conductive oxide (TCO) layer of i-ZnO/Al:ZnO is deposited by vacuum sputtering. Both the CdS buffer and sputtered TCO layer are considered as bottlenecks of the current CIGS technology because of environmental concerns and the need of expensive vacuum equipment, respectively. Alternative Zn(O,S) or In<sub>2</sub>S<sub>3</sub> buffers obtained by CBD, atomic layer deposition, sputtering or ILGAR could yield efficiencies comparable to CdS buffers but sputtered ZnO:Al contacts were usually employed [6],[7] The Japanese company Solar Frontier is the only one offering Cd-free CIGS modules with the record efficiency of 13.5% [2] and cells up to 20.9% [8], whereas EU industries are lagging behind.

Project partners have recently shown encouraging results on the way of replacing the CdS buffers and achieving non-vacuum TCO contacts. This includes the high-rate CBD of the Zn(O,S) buffer demonstrated by ZSW enabling the fabrication of small area (0.5 cm<sup>2</sup>) solar cells with up to 19.1% efficiency and full size modules with 13.1% [9]. The proprietary electrodeposition of conductive ZnO:Cl was developed at IRDEP and successfully applied for co-evaporated CIGS solar cells with efficiencies of up to 15.8% [10]. Finally, a novel solution approach for highly conductive ZnO:Al without the need of conducting substrate has recently been disclosed by Empa and the first application of the AZO layers as TCOs in CIGS cells showed a promising efficiency of 14.8% [11].

The overall **project goal** is to develop a combination of Cd-free buffer and TCO layers by scalable solution processing which would translate in the reduction of CIGS module costs, lower the equipment complexity, and increase material utilization. The buffer-TCO combination will be realized on one material – ZnO – where the Zn(S,O) buffer will be followed by a solution deposited ZnO:Al TCO contact. The two subsequent depositions will be ultimately integrated into one CBD processing step.

The Swiss sub-project of Empa and Flisom AG is focused on the solution deposition of the ZnO-based transparent front contact for in CIGS cells and modules.

## Work and Results

### Chemical bath deposition of transparent and conductive Al-doped ZnO

Chemical bath deposited Al-doped ZnO (CBD AZO) layers are grown on a seed layer (i-ZnO, 50 nm, sputtered on borosilicate glass) from an aqueous ammonia solution saturated with ZnO and heated at around 90 °C. A non-vacuum seed layer obtained by spin- or dip coating of ZnO solution or ZnO nanoparticle dispersion is also feasible [12] and will be implemented once the CBD-AZO is established. The solution also contains ammonium citrate as a structure directing agent and ammonium nitrate as a buffer [11]. Aluminium is incorporated into the film as a dopant by either from dissolving aluminium nitrate in the deposition solution or by gradually adding a solution of ammonium citrate and aluminium nitrate during the deposition [12]. The layers are then exposed to UV radiation (Hg lamp with UVA, ~50 mW/cm<sup>2</sup>) for 10 minutes.

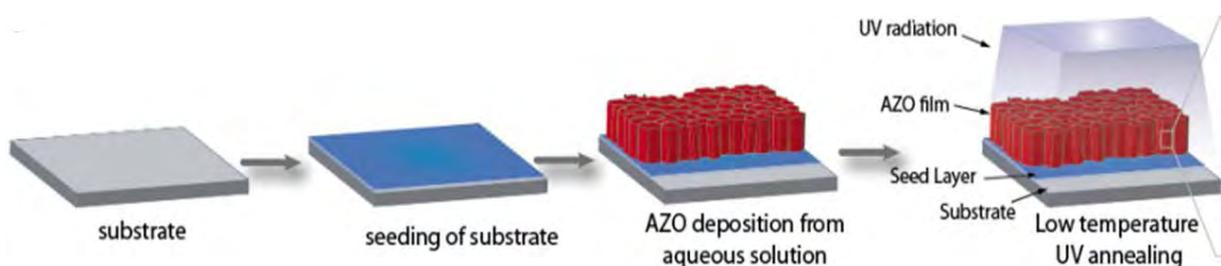


Fig. 1: Processing sequence of CBD AZO layers.

## Results during M1-M6

### Development and optimization of the CBD AZO base line

To establish a reproducible CBD AZO baseline and explore the matrix of deposition parameters, several process optimization series were performed in a vertical CBD reactor by varying the deposition temperature and the chemical composition of the solution.

Fig.2 shows the thickness and the resistivity of CBD AZO layers as a function of the deposition temperature. A continuous increase in thickness with the increase in deposition temperature indicating a thermally limited growth is observed. Layers deposited at temperature higher than 90°C show one order of magnitude lower resistivity. This could be attributed to either a better incorporation of the Al dopant or a better crystal quality for the films grown at higher temperature.

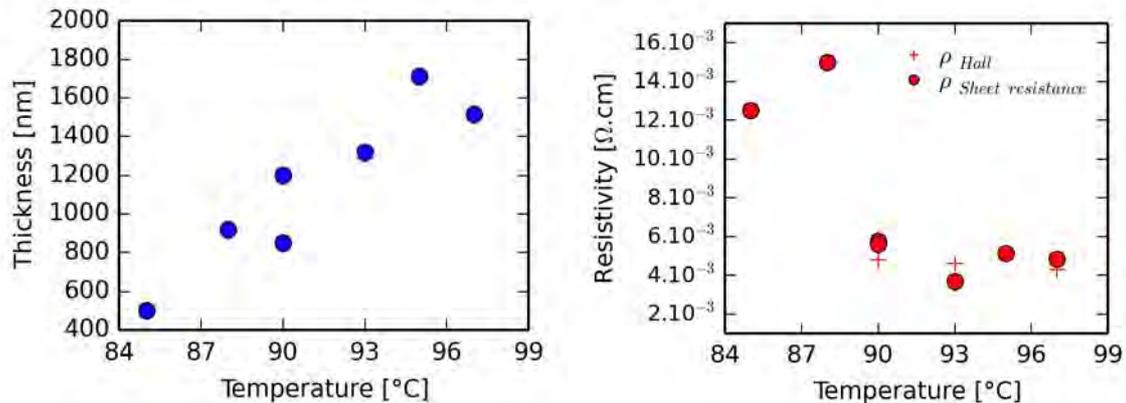


Fig. 2: Thickness (left) and resistivity deduced from Hall measurements (crosses) and from sheet resistance measurements (full circles) (right) as a function of the deposition temperature.

Fig.3 shows the resistivity of CBD AZO layers as a function of the citrate concentration in the solution. One can observe an optimum in resistivity for the layers deposited with a concentration of citrate around 1.5 mM. We assume that increasing citrate concentration up to 1.5 mM helps to achieve a compact layer growth, which results in the reduced thickness and improved conductivity. At citrate concentrations higher than 1.5 mM the growth rate does not change but additional carbon species can be incorporated in the layer, and specifically along the grain boundaries, resulting in the increased resistivity.

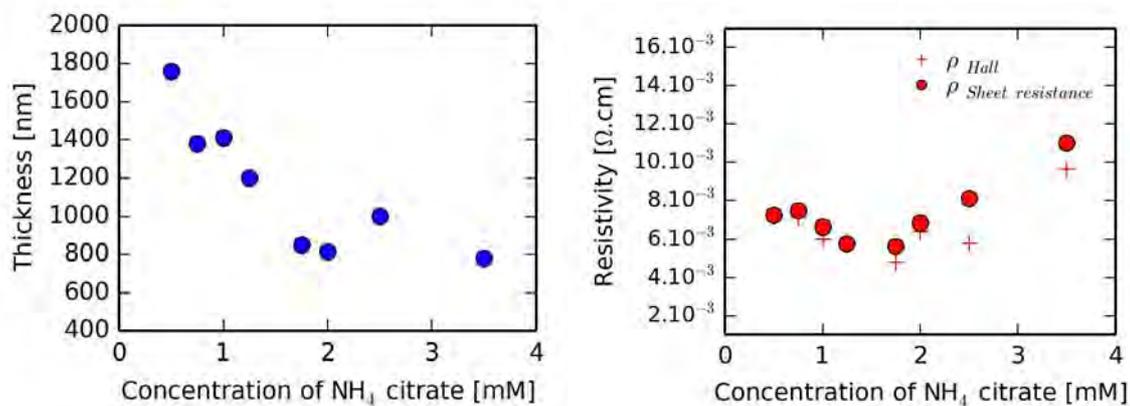


Fig. 3: Thickness (left) and resistivity deduced from Hall measurements (crosses) and from sheet resistance measurements (full circles) (right) as a function of the concentration of citrate in the solution at the beginning of the deposition.

These optimizations works lead to reproducible 5x5 cm<sup>2</sup> CBD AZO layers with a sheet resistance of ~50 Ω<sub>sq</sub> and a visible transmittance higher than 80%. Table 1 summarizes the properties and process parameters of the best CBD AZO layer obtained so far.

<i>Deposition parameters</i>		
Time	60	min
Temperature	90	°C
Citrate concentration	1.25	mM
Doping solution Al(NO <sub>3</sub> ) <sub>3</sub> concentration	100	mM
<i>Layer properties</i>		
Thickness	1200	nm
Sheet resistance	48	Ω <sub>square</sub>
Resistivity	5.8 10 <sup>-3</sup>	Ω.cm
Free carrier density	1.5 10 <sup>20</sup>	cm <sup>-3</sup>
Free carrier mobility	7	cm <sup>2</sup> .V <sup>-1</sup> .sec <sup>-1</sup>
Visible transmittance	>80	%

Table 1: Deposition parameters and properties of the 5x5 cm<sup>2</sup> CBD AZO layer on the i-ZnO seed deposited by sputtering.

## National / international cooperation

The NovaZolar project within the SOLAR-ERA network foresees a close collaboration between all project partners:

EMPA - Swiss Federal Laboratories for Materials Science and Technology	Switzerland
Flisom AG	Switzerland
CNRS - Centre national de la recherche scientifique	France
EDF	France
NEXCIS	France
ZSW - Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung	Germany
Manz CIGS Technology GmbH	Germany
IREC - Fundacio Privada Institut de Recerca en Energia de Catalunya	Spain

## Conclusions 2014 and Outlook 2015

A reproducible baseline process was established yielding CBD AZO layers with a sheet resistance of ~50 Ω<sub>sq</sub> and a visible optical transmittance higher than 80%. During next year the focus will be to i) set-up the tunable UV-irradiation system to identify the mechanism of the UV post treatment, ii) to implement AZO CBD into CIGS solar cells for performing stability tests to prove the intrinsic stability of solution-grown AZO, and iii) to achieve a nucleation onto solution-processed i-ZnO seed layers and Zn(O,S) buffers in cooperation with other NovaZolar partners.

## References

- [1] ZSW, **Medie release 12/2014**, Stuttgart, 22.09.2014, <http://www.zsw-bw.de/uploads/media/pi12-2014-ZSW-WeltrekordCIGS.pdf>.
- [2] M.A. Green, K. Emery, Y. Hishikawa, W. Warta, E.D. Dunlop, **Solar cell efficiency tables (version 44)**, Prog. Photovolt: Res. Appl. 22 (2014) 701-710.
- [3] E. Wallin, U. Malm, T. Jarmar, O. Lundberg, M. Edoff, L. Stolt, **World-record Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub>-based thin film sub-module with 17.4% efficiency**, Prog. Photovolt: Res. Appl. 20 (2012) 851-854.
- [4] Manz, **Press release**, 2012 <http://www.manz.com/media/news/archive/2012/cigs-erreicht-erstmalis-wirkungsgrad-von-multikristallinen-modulen-416>.
- [5] PICON Solar, **Presentation at 4th Thin-film Industry Forum**, 2012, <http://www.picon-solar.de/download/Total%20cost%20of%20ownership%20for%20CIGS%20thin%20film%20PV%20module%20production.pdf>.
- [6] N. Naghavi et al., **Buffer layers and transparent conducting oxides for chalcopyrite Cu(In,Ga)(S,Se)<sub>2</sub> based thin film photovoltaic: present status and current developments**, Prog. Photovolt: Res. Appl. 18 (2010) 411-433.

- [7] R. Sáez-Araoz, J. Krammer, S. Harndt, T. Koehler, M. Krueger, P. Pistor, A. Jasenek, F. Hergert, M. Ch. Lux-Steiner, Ch.-H. Fischer, **ILGAR In<sub>2</sub>S<sub>3</sub> buffer layers for Cd-free Cu(In,Ga)(S,Se)<sub>2</sub> solar cells with certified efficiencies above 16%**, Prog. Photovolt: Res. Appl. 20 (2012) 855-861.
- [8] SolarFrontier, **Media release from 02.04.2014**, <http://www.solar-frontier.com/eng/news/2014/C031367.html> .
- [9] D. Hariskos, R. Menner, P. Jackson, S. Paetel, W. Witte, W. Wischmann, M. Powalla, L.Bürkert, T. Kolb, M. Oertel, B. Dimmler, B. Fuchs, **New reaction kinetics for a high-rate chemical bath deposition of the Zn(S,O) buffer layer for Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub>-based solar cells**, Prog. Photovolt: Res. Appl. 20 (2012) 534-542..
- [10] J. Rousset E. Saucedo, K. Herz, D. Lincot, **High efficiency CIGS based solar cells with electrodeposited ZnO:Cl as transparent conducting oxide front contact**, Prog. Photovolt: Res. Appl. 19 (2011) 537-546.
- [11] H. Hagendorfer, K. Lienau, S. Nishiwaki, C. M. Fella, L. Kranz, A. R. Uhl, D. Jaeger, L. Luo, C. Gretener, S. Buecheler, Y. E. Romanyuk , A. N. Tiwari, **Highly Transparent and Conductive ZnO:Al Thin Films from a Low Temperature Aqueous Solution Approach**, Adv. Mater. 26 (2014) 632-636.
- [12] P. Fuchs, H. Hagendorfer, Y. E. Romanyuk, A. N. Tiwari, **Doping strategies for highly conductive Al-doped ZnO films grown from aqueous solution**, Phys. Status Solidi A. doi: 10.1002/pssa.201431145 (2014).



# COMBINING MACROSCOPIC AND MICROSCOPIC CHARACTERIZATION OF RECOMBINATION LOSSES IN HIGH EFFICIENCY CIGS SOLAR CELLS - HOW TO REACH THE THEORETICAL LIMIT?

Annual Report 2014

Author and Co-Authors	B. Bissig, F. Pianezzi, P. Reinhard, S. Buecheler, A. N. Tiwari
Institution / Company	Empa, Laboratory for Thin Films and Photovoltaics
Address	Überlandstrasse 129, 8600 Dübendorf
Telephone, E-mail, Homepage	058 765 6130, <a href="mailto:ayodhya.tiwari@empa.ch">ayodhya.tiwari@empa.ch</a> , <a href="http://www.empa.ch/tfpv">www.empa.ch/tfpv</a>
Project- / Contract Number	NR. 200021_149453 / 1
Duration of the Project (from – to)	01.02.2014–31.01.2017
Date	15.12.2014

## ABSTRACT

Recently our group at Empa reported a 20.4% conversion efficiency world record for thin film solar cells based on Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub> (CIGS) light absorbing layers. This efficiency of flexible solar cell on polymer film surpasses the efficiency of solar cells on glass and matches to the long back established benchmark efficiency of polycrystalline Si wafer based solar cells.

Despite the achievement of high efficiency (>20%) CIGS solar cells on glass or polymer film substrates, these values remain significantly lower than the theoretically predicated efficiency around 33% for this technology. Since only little is known about the major loss mechanisms in such devices it is evident that a deeper understanding of the electronic transport mechanisms is required to find what limits the efficiency, and how to close the efficiency gap between the practically developed devices and the theoretical Shockley-Queisser limit.

During this research project it is aimed to obtain a deeper understanding of the electronic transport in CIGS solar cells, such that new strategies to overcome the present limitations can be developed.

## Introduction and project objectives

### Concept

Highest efficiency Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub> solar cells are grown in a so called three stage process where through consecutive co-evaporation of the metals in Se atmosphere a chalcopyrite crystal is formed. Through the introduction of a post deposition treatment with KF (KF-PDT) by our group in 2013 a series of new CIGS record efficiencies were achieved and most recently a new record of 21.7 % was reported by ZSW, Germany [1]. Despite a vast amount of literature, the factors that limit the cell efficiency, especially the detailed nature of recombination is not well understood. In this project we address this fundamental question on highly efficient cells.

### Overall project objectives

This project combines micro- and macroscopic optical and electronic characterization methods to correlate the – deficiencies of the - fundamental PV parameters (short circuit current density  $J_{sc}$ , open circuit voltage  $V_{oc}$ , fill factor FF and finally efficiency) to the underlying physical mechanisms. Thereby two main questions are addressed:

- a) By which mechanism does the KF post deposition treatment improve the device?
- b) Which are the remaining dominant loss mechanisms in high efficiency polycrystalline CIGS solar cells?

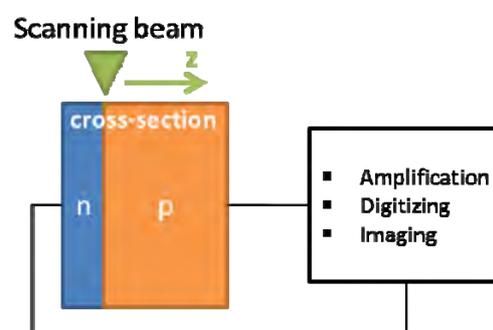
In this first part of the project the focus was placed on question a). Initial investigations on KF treated samples showed that the CIGS surface region – a few tens of nm - was Cu depleted but Cd enriched [2]. Based on temperature dependent I-V measurement we proposed a model that assumed an inverted n-type CIGS surface layer [3]. Such a layer would prevent minority carrier transport in the vicinity of the imperfect junction region, and could thus effectively decrease recombination. This can explain the typically observed increase in  $V_{oc}$  and FF in case of KF-PDT treated samples as compared to the conventional NaF PDT.

### Specific research objectives in this year

The first year of this project aims to answer the question whether a buried junction (n-type CIGS) in absorber is present. First, "electron beam induced current" EBIC technique was applied to check for a significantly shifted junction position away from the CIGS surface. In a second step, a novel beam induced current based system has been developed for further investigation. It is based on injection of He<sup>+</sup> ions and would potentially increase the lateral resolution as compared to EBIC. This in turn would allow probing for an extremely shallow buried junction.

## Methodology

Electron beam induced current (EBIC) denotes a methodology that allows to laterally resolve the carrier collection probability in a pn-junction on sub micrometer scale. Here investigations have been performed on samples that were cleaved, therefore this technique also allows accessing the collection throughout a cross section of the solar cells, see Fig. 1.



**Fig 1:** Illustration of the beam induced current working principle. An incoming beam of particles generates charge carriers which are separated in the pn-junction region of a solar cell. This current is recorded by a digitizing system and finally used as imaging contrast.

High energy particles up to 30 keV as available from SEM columns are used to locally generate excess electron-hole pairs. Due to the internal field and diffusion these carriers can be collected if the

sample is electrically contacted inside the microscope. After amplification this current can be recorded on each pixel. If this is repeated for every pixel in usual SEM scanning mode one can build up an image where the contrast indicates the measured current i.e. the carrier collection probability. The lateral resolution of this technique is defined by the volume in which electron hole pairs are generated by the excitation beam [4].

This is the reason why the EBIC signal does only represent a convolution of excitation volume and collection probability. We estimated the generation volumes of injected electrons as a function of their energy (CASINO [5] simulations). This is a rough estimate, but it makes clear that only lowest beam energies allow probing of features/changes of only a few tens of nm size.

## Performed work and results

By means of EBIC the region close to the metallurgical junction between CdS and CIGS was investigated. We compare the case of absorbers with and without KF PDT. A NaF-PDT was applied in both cases.

Because of the limited resolution obtained with standard EBIC we developed an EBIC like technique that uses He ions instead of electrons as probing particles, so called He<sup>+</sup> ion beam induced current IBIC, for better resolution. The increased particle mass is expected to cause He to be scattered at lower angles i.e. reducing the width of the excitation volume as estimated from SRIM [6] simulations. Therefore IBIC can potentially increase the lateral resolution as compared to EBIC. This technique is currently developed at EMPA Dübendorf which is one of the few institutions in Europe having a highly focused He ion source as provided by the ZEISS Orion Helium ion microscope (HIM) [7].

In contrary to the EBIC case, the FWHM of IBIC profiles only show weak energy dependence. Remarkably IBIC allows high resolutions already at highest beam energies. In principle this promises high resolution at good SNR as the current scales with energy. For a full assessment of possible advantages also the gain defined as “measured/injected-current” needs to be considered. It is apparent that either the generation- or collection-efficiency is somewhat reduced in case of IBIC. In conclusion, for similar gain e.g. an SNR of 100 the corresponding FWHM values are 500 nm and 150 nm in cases of EBIC and IBIC respectively. This indicates potential advantage of IBIC.

## National cooperation

The IBIC technique is developed in collaboration with Fabio La Mattina from the Laboratory for Reliability Science and Technology at Empa Dübendorf.

## Conclusions 2014 and Outlook 2015

Research and development work for a deeper understanding of the mechanisms causing reduced current gain and the necessity of pre-scanning for good signal quality will be addressed. Eventually we aim to use IBIC to gain deeper knowledge about the nm scale nature of carrier collection in CIGS solar cells.

## References

- [1] 1. Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung, G. *ZSW brings world record back to Stuttgart*. 2014; Available from: <http://www.zsw-bw.de/en/support/press-releases/press-detail/zsw-brings-world-record-back-to-stuttgart.html>
- [2] 2. Chirila, A., et al., *Potassium-induced surface modification of Cu(In,Ga)Se-2 thin films for high-efficiency solar cells*. Nature Materials, 2013. **12**(12): p. 1107-1111.
- [3] 3. Pianezzi, F., et al., *Unveiling the effects of post-deposition treatment with different alkaline elements on the electronic properties of CIGS thin film solar cells*. Physical Chemistry Chemical Physics, 2014. **16**(19): p. 8843-8851.
- [4] 4. Reimer, L., *Scanning Electron Microscopy: Physics of Image Formation and Microanalysis*. Springer Series in Optical Sciences, ed. P.W. Hawkes. Vol. 45. 1998, Berlin Heidelberg: Springer-Verlag. 253 ff.
- [5] 5. Drouin, D., et al., *CASINO V2.42—A Fast and Easy-to-use Modeling Tool for Scanning Electron Microscopy and Microanalysis Users*. Scanning, 2007. **29**(3): p. 92-101.
- [6] 6. Ziegler, J.F., J.P. Biersack, and U. Littmark, *The stopping and range of ions in solids*. The stopping and ranges of ions in matter. 1985, New York: Pergamon Press. 321 S.
- [7] 7. Notte, J., et al., *An introduction to the helium ion microscope*. Frontiers of Characterization and Metrology for Nanoelectronics: 2007, 2007. **931**: p. 489-496.



# ROLL-TO-ROLL MANUFACTURING OF HIGH EFFICIENCY AND LOW COST FLEXIBLE CIGS SOLAR MODULES (EU-FP7 R2R-CIGS)

## Annual Report 2014

Author and Co-Authors	Stephan Buecheler, Patrick Reinhard, Timo Jäger and Ayodhya N. Tiwari
Institution / Company	Laboratory for Thin Films and Photovoltaics, Empa
Address	Überlandstrasse 129, 8600 Dübendorf
Telephone, E-mail, Homepage	044 823 6107, <a href="mailto:stephan.buecheler@empa.ch">stephan.buecheler@empa.ch</a> , <a href="http://www.empa.ch/tfpv">www.empa.ch/tfpv</a>
Project- / Contract Number	FP7-283974 / R2R-CIGS
Duration of the Project (from – to)	Apr. 2012 – Sep. 2015
Date	15.12.2015

### ABSTRACT

Thin film solar cells with Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub> (CIGS) compound semiconductor as absorber material show excellent efficiency and with proper encapsulation long term performance stability. CIGS solar module technology on rigid glass substrate is already mature and industrial companies are producing hundreds of MWp each year. Bringing flexible CIGS solar modules to industrial maturity will yield the next breakthrough for further cost reduction by taking into account the inherent advantages of thin film technology, e.g. high throughput and large scale coating with less energy and material consumption. Within this project efficiencies above 19% have been achieved for lab-scale flexible CIGS solar cells on polymer substrate with front and back interface properties of the CIGS controlled on nanoscopic range. The project R2R-CIGS will contribute to industrial large scale production of flexible high efficiency CIGS solar cell devices based on processes for roll-to-roll manufacturing. The aim is to develop efficient solar modules by implementing innovative cost-effective processes such that production costs below 0.5 €/Wp can be achieved in large volume factories with annual capacity of 500MWp in future.

## Introduction and project goals

The project R2R-CIGS will contribute to industrial large scale production of flexible high efficiency CIGS solar cell devices with roll-to-roll manufacturing processes. The aim is to develop efficient solar modules by implementing innovative cost-effective processes such that production costs well below 0.5 €/Wp can be achieved in large volume factories with annual capacity of 500MWp in future. This ambitious target will be achievable when the efficiencies of flexible solar cells are comparable to those based on glass substrates and high throughput process with less energy and material consumption are implemented.

An important objective for meeting this target is to achieve 20% cell efficiency and to develop 16% module efficiency on flexible substrate in order to demonstrate the technical potential and to reach comparable performance to CIGS technology on glass. On large area solar module level the roll-to-roll (R2R) manufacturability of monolithically interconnected cells has to be demonstrated for achieving high efficiency modules with long term performance stability.

For cost-effective manufacturing some of the bottleneck problems have to be solved including but not limited to: Chemical bath deposition (CBD) of CdS should be substituted by a deposition method for Cd-free buffer layer which is more compatible to R2R production. Moisture barrier coatings for efficient and low-cost encapsulation should be developed to overcome the problems of efficiency degradation due to corrosion of electrical contacts. Improvements in the current state-of-the-art will be achieved by implementing the concepts of nanotechnology in terms of modification in the structural, chemical, and electrical characteristics on nano-scale range for improving the CIGS absorber, buffer layer, TCO and encapsulation. Control of properties of surfaces and interfaces on nano-scale will be the most important aspect for achieving high efficiencies and stable performance of solar cells. These concepts, especially of buffer-, barrier-, and TCO- layers have already shown encouraging results for technologies based on rigid glass, however, some of them need further development for roll-to-roll manufacturing.

A key advantage of thin film solar cells is the monolithical interconnection, successfully implemented on glass but still a challenging task for flexible substrates. Although preliminary results are shown, further development is needed for improving the patterning technique and reducing the losses due to laser-material interactions.

The knowledge gained in this project, based on some innovative concepts that have shown promising results, will be transferred to pilot line scale and for industrial production.

### The main objectives of Empa in this project are:

- Flexible solar cells on polymer film with 20% efficiency and mini-module with 16% efficiency by control of composition gradient, surface, and interface properties on nano-scale
- Transfer of innovative buffer layer process for roll-to-roll manufacturing and replacing CBD-CdS by higher yield processes such as ultrasonic spray
- Scale-up of static multi-stage CIGS deposition process from laboratory scale towards inline R2R compatible processes
- Implementation of the up-scaled multi-stage CIGS deposition process into pilot lines yielding flexible CIGS modules with 14% efficiency from R2R manufacturing

### The consortium of this project includes 4 European research institutes and 6 European industries and SMEs:

1. TNO (Nederlandse Organisatie voor Toegepast Natuurwetenschappelijk Onderzoek), Netherlands
2. Empa (Swiss Federal Institute for Materials Science and Technology), Switzerland
3. Manz CIGS GmbH, Germany
4. Flisom AG, Switzerland
5. ZSW (Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg), Germany
6. CPI (Centre for Process Innovation), UK
7. Isovoltaic GmbH, Austria

8. Beneq Oy, Finland
9. Left the project
10. Mondragon Assembly Coop., Spain
11. VDL Enabling Technologies Group Eindhoven, Netherlands

## **Work and results**

### **DC and pulsed DC sputtering of doped ZnO from rotatable targets**

Empa investigated the effect of different AZO window layers deposited from a rotating target and their influence on the solar module stability during accelerated stress tests.

The module properties that are mainly influenced by the TCO quality are the short circuit current (by the light transmission) and the fill factor through the series resistance (by the TCO sheet resistance). Since both of these properties are depending on film thickness, solar modules with AZO thicknesses between 450 to 1400 nm were produced by changing the speed of the in-line movement of the substrate relative to the target. Two series with 4 modules on flexible substrates each were fabricated. The first series covered TCO thicknesses between 450 and 900 nm. Although the thickness changes are considerable, almost no influence in the JSC can be observed. The improved electrical properties on the other hand are clearly visible in the fill factor. None of the samples reached the corresponding RF reference module #1 with  $\eta=13.8\%$ . In the second series samples with TCO thicknesses between 1000 and 1400 nm were produced. In this range the PV properties do not change much. Variations in fill factor, especially of the 1200 nm sample, are probably due to problems in the module fabrication. All those samples show efficiencies similar to the RF reference #2 of 13.0 %.

As a result, the best combination of deposition time, material usage and properties lies between a TCO thickness of 1000 and 1200 nm.

### **Flexible CIGS solar cell with nano-scaled compositional grading**

In order to facilitate the transfer of the multistage co-evaporation process from a static setup to a R2R setup better understanding of the evolution of the CIGS microstructure during the growth process is necessary. CIGS depositions were stopped at different stages (end of 1st and 2nd stage) and analysed in view of their grain morphology and nano-scaled compositional grading. Further experiments were made in order to gain more insights on the different influences of Na and K addition during or after CIGS growth. It was found that the addition of alkali elements in a post-deposition treatment should be preferred because it avoids the formation of electronic defects that limit the solar cell efficiency.

Additional material characterization of the CIGS layers subjected to NaF and KF PDT was performed in order to determine the amount of alkali elements added onto the CIGS layer and the actual amount remaining in the final device, as well as their influence on the electronic properties. Careful control of the amount of evaporated KF is necessary for highest efficiency devices.

The KF PDT developed by our group was applied to fabricate mini-modules (area of ca. 10 cm<sup>2</sup>) and to show the homogeneity of the process and its potential for scale-up. Externally certified efficiency of 16% was measured for a mini-module on flexible polyimide film consisting of 8 cells monolithically interconnected by laser patterning at Flisom. Further process and stack optimization enabled achieving 16.9% efficiency (in-house measurement).

## **Appraisal 2014 and Outlook 2015**

Influences of Na and K-post-deposition treatment methods on the properties of low-temperature grown CIGS have been identified. Flexible CIGS mini-modules with efficiency > 16% by static multi-stage co-evaporation process are achieved.

In 2015, further investigation of the interplay between Na and K addition is planned, especially in view of the ion exchange process that typically leads to a partial removal of Na in absorbers treated with K. The amount of Na in CIGS absorbers is usually thought to be linked to the carrier density in the final solar cell, and should be maximized for highest efficiency. Based on this assumption, different strategies will be pursued in order to optimize the charge carrier density in absorbers. Furthermore, additional studies will be conducted in order to support the transfer of the static alkali addition process to the alkali addition process on a moving substrate. Especially, the influence of the sequence of incident evaporation flux as well as the influence of the substrate temperature during deposition will be assessed. Together with project partners these findings will be transferred to R2R deposition equipment aiming for a final implementation in pilot lines.



# FLEXIBLE PHOTOVOLTAIC CELLS OPTIMIZED FOR HIGH CONVERSION EFFICIENCY FROM INDOOR TO OUTDOOR ILLUMINATION CONDITIONS, USED IN NEW WRISTWATCH PRODUCTS

Annual Report 2014

Author and Co-Authors	Fabian Pianezzi, Stephan Buecheler and Ayodhya N. Tiwari
Institution / Company	Laboratory for Thin Films and Photovoltaics, Empa
Address	Überlandstrasse 129, 8600 Dübendorf
Telephone, E-mail, Homepage	+41 58 765 6107, <a href="mailto:stephan.buecheler@empa.ch">stephan.buecheler@empa.ch</a> , <a href="http://www.empa.ch/tfpv">www.empa.ch/tfpv</a>
Project- / Contract Number	KTI 15166.1
Duration of the Project (from – to)	01.10.2013 - 30.09.2015
Date	09.12.2014

## ABSTRACT

The goal of the project is to develop flexible CIGS photovoltaic (PV) cells optimized to yield high conversion efficiencies under low (indoor) to high (outdoor) illumination intensities, tailored for new generations of innovative wristwatch products. Device processing will be optimized to meet the stringent requirements of high performance under low illumination conditions.

## Introduction

Thin film solar cells based on  $\text{Cu(In,Ga)Se}_2$  (CIGS) absorber layers yield excellent device performance under approximately 1 sun illumination intensity. Highest record efficiency of 20.4% on flexible polyimide substrate has been demonstrated under AM1.5G standard test conditions. However, the solar cell efficiency is known to depend on illumination conditions, e.g. under an illumination intensity that is 100 to 1,000 times less intense than the standard 1 sun, most of the standard CIGS solar cells exhibit disproportionately lower conversion efficiency. For several applications, especially under indoor or low illumination conditions, high conversion efficiency, exceeding 10%, is highly desired, which in general is not the case with thin film solar cells. The goal of the project is to improve the device efficiency at low light illumination intensity by applying innovative device modification at the CIGS/CdS/ZnO interfaces.

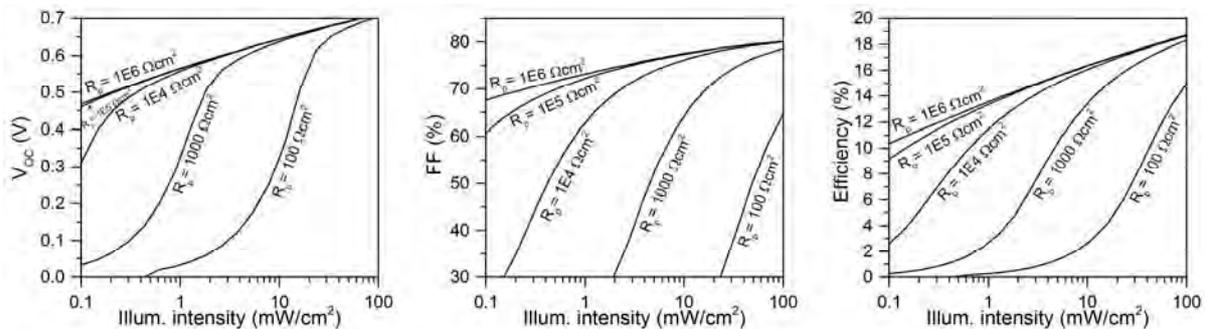
## Description of the project

### Develop and validate indoor illumination testing techniques

It is assumed that white light LED will be the relevant illumination source for future indoor lightning. A test setup with a large area LED light source was developed to measure the PV performance of the CIGS solar cells under various light intensities ranging from 100 lx up to 10'000 lx. For even higher illumination intensities it is assumed that the solar AM1.5G spectrum is relevant as typical indoor lightning is below 1000 lx. Therefore, solar cells were tested under LED and AM1.5G spectrum.

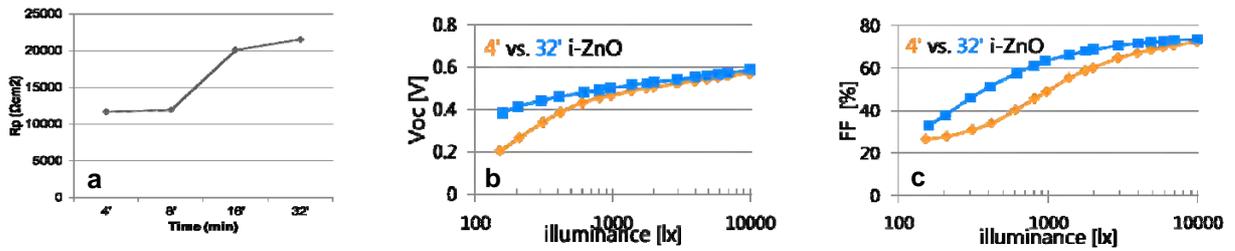
### Reduce the leakage current in the CIGS photovoltaic cells

Leakage current in solar cells becomes critical for the device performance as soon as this current that flows in the circuit at a voltage close to the maximum power point is comparable to the generated photocurrent. Therefore, under low light condition (100 or even 1000 weaker) where the photocurrent is small, the leakage current becomes even more critical as compared to standard operating condition. The theoretical dependence of the open circuit voltage ( $V_{oc}$ ), fill factor (FF) and efficiency on the illumination intensity for different parallel resistances  $R_p$  is shown in figure 1.



**Figure 1:** Theoretical dependence of  $V_{oc}$ , FF and efficiency on illumination intensity for different parallel resistance.

In order to improve the parallel resistance of state-of-the-art ZnO:Al/i-ZnO/CdS/CIGS/Mo solar cells the processing parameters were modified. The thickness of the i-ZnO layer was identified as one the critical parameters influencing  $R_p$ . In figure 2 the  $R_p$  dependence on the i-ZnO deposition time is shown. With increasing i-ZnO layer thickness (=longer deposition time)  $R_p$  improves. This is also reflected in the low light performance of the resulting solar cells, as shown in figure 2b and 2c. Especially, in the region below 1'000 lx (relevant for indoor application) the performance is improved for the device with longer i-ZnO deposition time.



**Figure 2:**  $R_p$  dependence on the deposition time of the i-ZnO layer (a) and the influence on  $V_{oc}$  (b) and  $FF$  (c) at different illumination intensities.

### Solar cell geometry for wristwatch products

To use the developed solar cells for wristwatch products in the future the cell geometry had to be adapted. Not only the optimum design for PV performance of the cell had to be taken into account but also the aesthetics, such as for example uniform optical appearance, was important. As a result also the conductivity of the transparent conducting oxide as well as the metal grid geometry were optimized for the specific cell design.

### National and international cooperation

This is a collaborative project between the Laboratory for Thin Films and Photovoltaics at Empa, Asulab and ETA at Swatch Group and Flisom company.

### Evaluation 2014 and Outlook 2015

The project is well on track and the defined milestones have been met. The leakage current could be reduced in CIGS solar cells and thereby the low light performance improved. Additional optimization of the CdS/CIGS junction formation is expected to further improve the low light performance and is subject of the activities during the next year. Proper encapsulation of the cells to protect the cell against moisture is another important aspect which will be addressed during the next year.



# PERFORMANCE STABILITY OF FLEXIBLE CIGS SOLAR MODULES

## Annual Report 2014

Author and Co-Authors	J. Perrenoud, S. Buecheler, A.N. Tiwari, B. Keller, R. Kern
Institution / Company	Empa/ Flisom
Address	Überlandstrasse 129, 8600 Dübendorf
Telephone, E-mail, Homepage	<a href="mailto:julian.perrenoud@empa.ch">julian.perrenoud@empa.ch</a> , <a href="http://www.empa.ch/tfpv">www.empa.ch/tfpv</a>
Project- / Contract Number	CT112800.3
Duration of the Project (from – to)	01.07.2013 - 30.06.2015
Date	09.12.2014

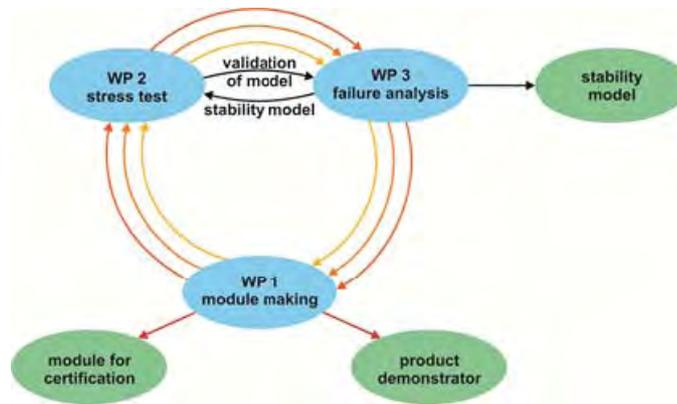
### ABSTRACT

Development of flexible CIGS solar modules for high performance and low cost are essential for diverse applications. Long term performance evaluation of encapsulated solar modules through accelerated tests and analyses of degradation and failure mechanisms on microscopic and macroscopic levels are necessary for proving improved long term performance stability and enabling market entry readiness. Long term performance evaluation of encapsulated solar modules through accelerated tests and analysis of degradation and failure mechanisms on microscopic and macroscopic levels are conducted in this project. Analytical methods and tools to optimize CIGS solar module designs for specifically targeted applications are developed. The final project goal is to certify the modules of Flisom according to the IEC standards 61646:2008 and 61730:2004 and fulfill even stricter extended test conditions which will be defined during this project.

## Goals of the project

Main objectives of this project are the development of flexible solar modules ready for certification, analysis and minimization of failure and degradation mechanisms as well as the formulation of a degradation model.

The project is structured in 3 work packages (WP). The chosen strategy to reach the project targets is an iterative approach as illustrated in Figure 1. A close interaction between the modeling efforts, numerical simulations, the experimental characterization and the product design should lead to a rapid, target-oriented product development cycle.



**Figure 1:** Illustration of interdependency of WPs in the iterative product development strategy. Also shown are the main deliverables of the project: (i) Product demonstrators which proof the marketability for targeted applications, (ii) Product development ready for module certification and (iii) validated

## Description of the project

Thin film solar cells have emerged as one of the most promising options for highly-efficient and cost-effective solar electricity generation with a potential of reaching grid parity on short term also in central Europe. Compared to rigid solar cells on wafers or glass substrates high performance flexible and lightweight CIGS solar modules offer even better potential for the reduction of production costs as well as overall system costs for enabling economical solar electricity.

Thin film solar cells with CIGS compound semiconductor as absorber material show excellent efficiency and with proper encapsulation long term performance stability as proven on glass substrate. CIGS solar module technology on rigid glass substrate is already mature and industrial companies are producing hundreds of MWp each year. However, the field of flexible CIGS solar cells is an emerging field of immense potential and importance, the field is still in early stage of R&D as well as in industrialization.

In the scope of this project the design of the flexible solar modules will be optimized for long term performance stability. This includes the single cell and module geometry for reducing resistive losses, the interconnection principle for adjusting output current and voltage, and the electric circuit design for reducing cell failure and shading losses. The optimization of the design of the flexible solar modules will yield improved initial device performance, however, for maximum energy harvesting the performance stability over time is of great importance. For power generation in the field a performance stability of >20 years is desired<sup>1</sup>.

In consumable electronics performance stability over 2-5 years is sufficient in most cases.

Prototype samples of different sizes intended for diverse applications are developed and performance stability tests of monolithically interconnected and encapsulated solar modules are measured and analyzed. Comparison of small size mini-modules of Empa (with characteristics of high performance processed on research lab type machines) and Flisom (with characteristics of devices processed under industrial conditions) provide valuable information on the impact of processing condition differences and potentials of the technologies for various applications. Components of the solar module

<sup>1</sup> The PV performance of a solar module is called stable if the output power is greater than 90% of the initial value after twenty years of operation in the field.

including the layers, substrates, interconnects, encapsulation can cause performance stability degradation when the solar module is exposed to solar light and various environmental conditions of temperature and humidity cycles.

The developed models based on the separated external conditions are cross-checked under combined tests as well as real outdoor conditions.

PV module certification according to the IEC standards 61646:2008 and 61730:2004 is mandatory for placing flexible solar modules on the international market. Within this project the first very important steps and proofs are planned towards long term performance stability and identifying the encapsulation materials and procedures. Measurements of such mini-modules and modules as well as models for long term performance stability and failure analyses are developed.

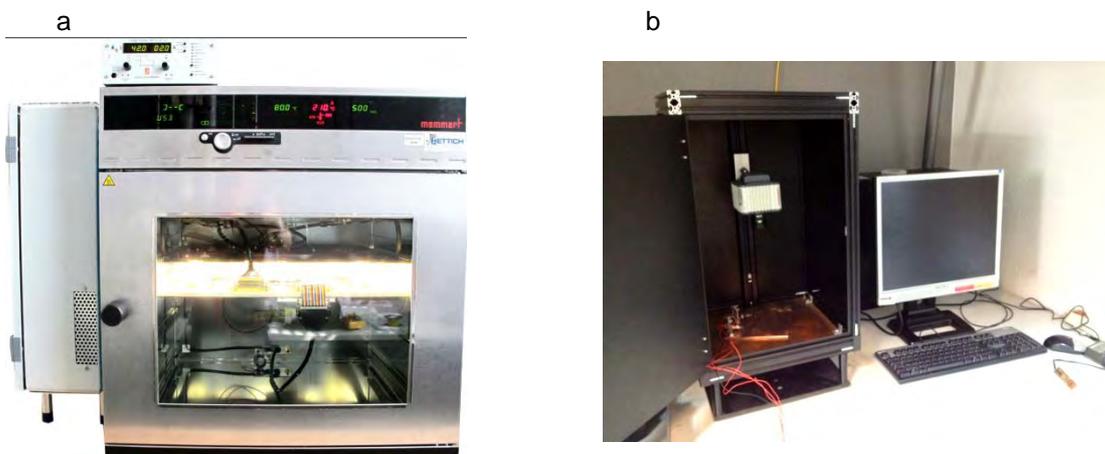
**The overall goals of the project can be summarized as follows:**

1. Availability of methods and tools to optimize CIGS solar modules structure grown on flexible substrate for long time performance stability (>20 years).
2. Better understanding of CIGS solar module aging and failure mechanisms through measurements and models in order to match solar module designs to requirements for cost-efficiency and reliability.
3. Proven design and performance data on different prototype solar module samples and demonstrators.

The mechanisms which cause degradation of the PV performance are related to corrosion of electrical contacts due to moisture penetration on the one hand and to elemental diffusion as well as phase and structure alteration in the active layers induced by illumination and/or heating of the device on the other hand. Furthermore, different structure and microstructure of cells and layers can exhibit different degradation characteristics. The impact of the external factors moisture, illumination and heat on the performance are investigated by using two different test setups, a climatic chamber with controllable relative humidity and temperature as well as a light soaking chamber with controllable illumination, temperature and gas mixture. The influence of the internal factors (microstructure, layers and interfaces) are analyzed by using well defined cell structures from Empa-TFPV laboratory as reference samples.

**Selected equipment of EMPA and Flisom**

The equipment used in this project includes chambers to test the solar cell under damp heat conditions and under the influence of illumination combined with heat. Such chambers are shown in figure 2. Further special equipment dedicated for this project has been set up including a tool to measure electro luminescence emission from solar modules for failure analysis. This instrument is shown in figure 2b.



**Figure 2:** Picture of Empa equipment for illumination stresstest a) and electro luminescence failure analysis b).

## Work carried out and results achieved

2014 all tests and measurements were performed on modules produced at Flisom. Comparison with Empa mini modules has been finished in 2013. For comparison few Flisom modules were finalized with Empa CdS and or Empa TCO to study influences of heat and mechanical stress during roll-to-roll deposition.

More than 50 mini-modules have been exposed to an accelerated stress test operating at 80°C in maximum power point (MPP) conditions for at least 100h. No degradation of the CIGS absorber or contact layers was observed. Degradation of CIGS modules under such test conditions has been reported in literature mainly connected to sodium diffusion from glass substrates. As Flisom's polyimide substrates do not contain alkali metals and sodium is introduced by a well-controlled process such instability was not expected for Flisom modules. These expectations could now be confirmed. However, in some cases failures connected to shunts forming on scribe lines have been observed. These were analyzed by infrared (IR) imaging, electroluminescence imaging (EL) and electron beam induced current mapping (EBIC).

3D focused ion beam cutting SEM imaging in combination with EBIC and TEM revealed that such shunts can be correlated with mechanical stress. The origin of the mechanical stress was identified and measures have been elaborated in order to avoid this during manufacturing.

Three main groups are distinguished for further tests: climate tests, illumination stress tests and hot spots / shading.

Climate tests are a very important part of the IEC standards to demonstrate that the encapsulated modules can withstand ingress of humidity and temperature variations during operation. So far, climate tests have been performed under four different conditions. The most critical one for CIGS modules is generally said to be the damp heat test. The modules are exposed to a temperature of 85°C and relative humidity of 85% for 1000 hours. The encapsulated modules did show a good stability under these harsh conditions. Several modules are always exposed to test conditions simultaneously in order to acquire statistically relevant test data. A second climate test is the thermal cycling, where the temperature in the chamber cycles between -40°C and 85°C, whereas the humidity is not controlled. This test is especially harsh for the encapsulation build-up as the different materials have different thermal expansions and the cycles can lead to mechanical stress and finally to delamination of the different layers. The third test, called humidity freeze, is combined with thermal cycling. After undergoing 50 temperature cycles, the modules stay in damp heat conditions at 85°C and 85% relative humidity for 20 hours and then are cooled down fast to -40°C and are kept there for about 1h. This cycle is repeated ten times. If any water has accumulated inside the encapsulation, it would freeze and lead to bursting of the package. None of the encapsulated modules from the first iterations showed any defects after the prefixed number of cycles.

## National and international cooperation

This is a collaborative project between Flisom Company and Empa involving the Laboratory for Thin Films and Photovoltaics and the Laboratory for Electronics/Metrology/Reliability at Empa.

## Evaluation 2014 and Outlook 2015

The project has completed 1.5 of 2 years. Failure mechanisms have been successfully identified. Module production has already been modified to avoid excessive mechanical stress which can form a seed for shunts. Characterization methods to analyze failure are routinely employed and allow monitoring device stability also in the future. The final 6 month will focus on the development of a lifetime prediction model concerning damp heat degradation. The progress of the project is well aligned with the project plan and the project partners are confident to achieve all the set project goals.



# TRAINING FOR SUSTAINABLE LOW COST PV TECHNOLOGIES: DEVELOPMENT OF KESTERITE BASED EFFICIENT SOLAR CELLS

## KESTCELLS

### Annual Report 2014

Author and Co-Authors	Stefan Haaß, Yaroslav Romanyuk and Ayodhya Tiwari
Institution / Company	Laboratory for Thin Films and Photovoltaics, Empa
Address	Überlandstrasse 129, 8600 Dübendorf
Telephone, E-mail, Homepage	058 765 4169, <a href="mailto:yaroslav.romanyuk@empa.ch">yaroslav.romanyuk@empa.ch</a> , <a href="http://www.empa.ch/tfpv">www.empa.ch/tfpv</a>
Project- / Contract Number	KESTCELLS / 316488
Duration of the Project (from – to)	01.09.2012 – 31.08.2016
Date	09.12.2014

#### ABSTRACT

The overall objective of this project is the creation of an ITN network for the structured interdisciplinary training of researchers in advanced thin film photovoltaic (PV) technologies. The project proposes the development of new technologies compatible with the cost, efficiency, sustainability and mass production requirements that are needed to become a reliable and future alternative to conventional non renewable energy sources. With this objective in mind, the project will focus on the development of kesterite based solar cells. Kesterites  $\text{Cu}_2\text{ZnSn}(\text{S},\text{Se})_4$  are quaternary compounds with a crystalline structure similar to that of Chalcopyrite  $\text{Cu}(\text{In},\text{Ga})(\text{S},\text{Se})_2$  but they are composed of cheap and earth-abundant elements.

In cooperation with IREC (Spain), Univ. Northumbria, HZB, Univ. Luxembourg, Univ. Uppsala, NEX-CIS, Free Univ. Berlin, Autonomous Univ. Madrid and Univ. d'Aix-Marseille, the Laboratory for Thin Films and Photovoltaics at Empa engaged one motivated PhD student, Mr. Stefan Haass, to perform from 1 August 2013 research activities on the synthesis of photovoltaic grade CZTS(Se) by chemical and PVD routes, develop alternative back contacts and buffer layers (CdS and Cd-free buffers) for optimal heterojunctions with CZTS/Se absorbers, and to prepare kesterite-based solar cells. The research program is complimented with numerous exchange visits and training occasions for the young researcher.

## Introduction and Project Goals

The overall objective of this project is the creation of a Marie Curie Initial Training Network (ITN) for the structured interdisciplinary training of researchers in advanced thin film photovoltaic (PV) technologies. Lack of professionals with these competences has been already identified as one of the main risks for the future development and consolidation of a competitive PV European industrial strategic sector. The project proposes the development of PV technologies based on new kesterite type materials and processes compatible with the cost, efficiency, sustainability and mass production requirements that are needed in order to become a reliable and future alternative to conventional non renewable energy sources. Kesterites are quaternary compounds with general composition  $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$  (CZTS) and  $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$  (CZTSe) and their crystalline structure is very similar to that of chalcopyrites as  $\text{Cu}(\text{In,Ga})(\text{S,Se})_2$  (CIGS), but in contrast to CIGS, kesterites are formed by earth abundant or cheap elements [1]. The specific scientific objectives of KESTCELLS are:

- To achieve a much deeper understanding of the fundamental properties of kesterites
- To identify and understand the role of secondary phases
- To improve the knowledge on the main doping mechanisms
- To apply this knowledge for the design and development of kesterite based solar cells
- To optimise and demonstrate these processes for the achievement of cells with an efficiency  $\eta > 10\%$  without the involvement of toxic or hazardous reagents

### Subproject at Empa has the following objectives:

- Synthesis of photovoltaic grade CZTS(Se) by chemical and PVD routes
- Development of alternative back contacts and buffer layers (CdS and Cd-free buffers) for optimal heterojunctions with CZTS/Se absorbers. Study of interfaces.
- Preparation of solar cells and their optoelectronic characterization, extension to flexible substrates

## Work and Results

### Development of optimal CZTSSe based heterojunctions

The fabrication of the CZTSSe based heterojunctions is achieved by using a solution approach of metal-salts and thiourea dissolved in dimethylsulfoxide (DMSO) [2]. The solution is spin-coated in several steps onto a Mo-coated sodalime-glass including an annealing step on a hotplate after each layer as shown in Fig. 1.

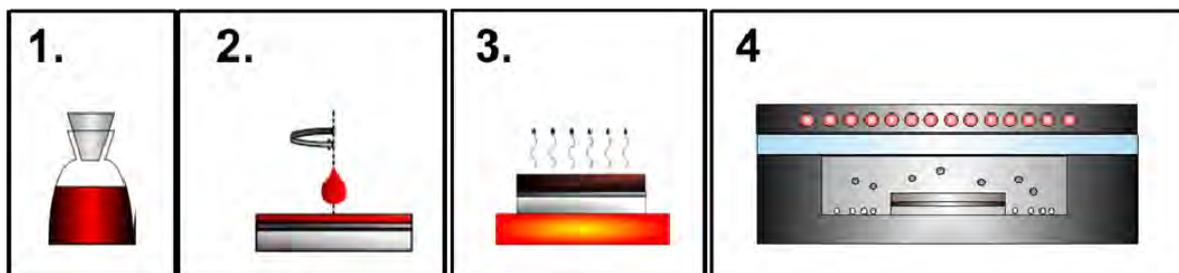


Fig. 1: Fabrication steps of the CZTSSe absorber layer

In order to improve the grain growth and the incorporation of Selenium in the final annealing step, a layer of NaF is evaporated on top of the precursor [3] or NaCl is added to the precursor solution [4]. Finally, the precursor is annealed at  $500^\circ\text{C}$  in Selenium atmosphere inside a graphite box in a rapid thermal processing (RTP) furnace. Hereafter an etching step with a KCN-solution is used to remove copper-rich secondary phases from the surface. With a standard CBD process a layer of CdS is deposited that forms the *p-n* junction with the CZTSSe absorber layer. Finally, i-ZnO / Al:ZnO window layer is deposited by rf-sputtering, followed by e-beam evaporation of the top metal grid. The fabricated devices with a total cell area of  $0.09\text{ cm}^2$  are characterized by IV-measurements under AM 1.5 illumination, external quantum efficiency (EQE), scanning electron microscopy (SEM) and advanced characterization of intrinsic doping and defects with admittance spectroscopy (AS) and time-resolved photoluminescence (TRPL). The composition and morphology was monitored by X-ray fluorescence (XRF), X-ray diffraction (XRD), Raman spectroscopy, SEM/EDX.

## Results of the secondments

### University of Uppsala (01/2014 – 04/2014)

During the secondment at Uppsala University the research focus was set on the deposition and characterization of Zn(O,S) as an alternative buffer layer. Zn(O,S) layers with varying ratios of oxygen to sulphur were deposited by Atomic Layer Deposition (ALD) onto CZTSSe absorber layers and characterized by XPS and IV-measurements. The results show that CZTSSe absorbers can be combined with Zn(O,S) buffer layers resulting in working solar cell devices although issues with shunting need to be addressed in order to achieve similar results in final efficiencies (Fig. 2).

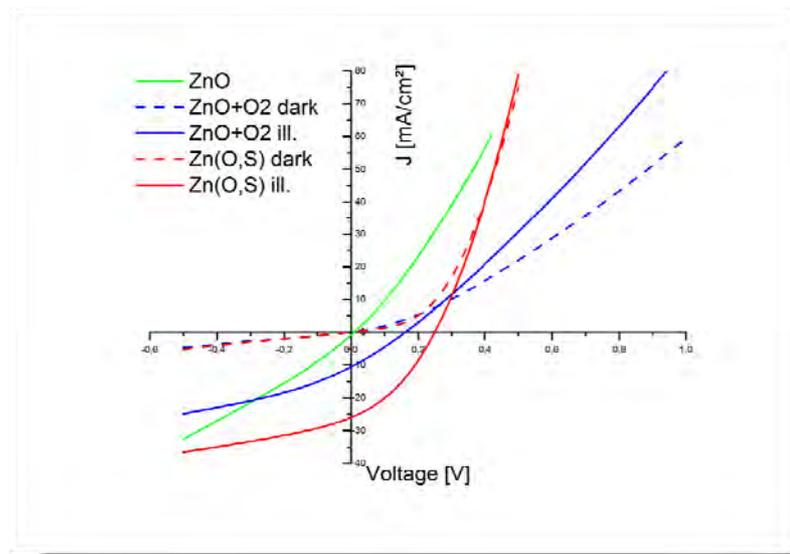


Fig. 2: Increasing the resistance of the buffer layer by incorporating oxygen (ZnO+O<sub>2</sub>) or sulfur reduces shunting and increases cell performance

### Northumbria University (07/2014 – 09/2014)

At Northumbria University advanced electrical and optical characterization on CZTSSe absorbers and solar cell devices with up to 8.3% efficiency were performed. Samples with varying annealing parameters were characterized with Hall-, Seebeck- and resistivity-measurements as well as transmission- and reflectance-measurements (Fig. 3) and the results were connected to electrical properties of the solar cell device.

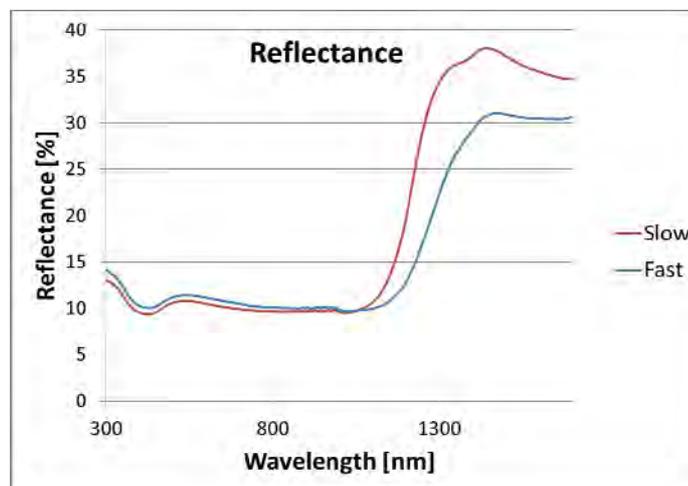


Fig. 3: Reflectance measurement on the absorber resulting from different annealing conditions (fast / slow ramping to the final annealing temperature of 500°C).

## Properties of solar cells based on solution deposited CZTSSe absorbers

The solar cells produced with the above described approach show efficiencies up to 9% (Fig. 4). IV-measurements were performed in a steady-state sun-simulator under standard test conditions ( $1000 \text{ Wm}^{-2}$ ,  $25^\circ\text{C}$ , AM 1.5G illumination) and result in a  $J_{\text{SC}}$  of  $33.2 \text{ mA/cm}^2$  and a  $V_{\text{OC}}$  of  $438 \text{ mV}$ . Furthermore XRD patterns show strong peaks for the kesterite phase and no secondary phases that are detectable by this technique (Fig. 5).

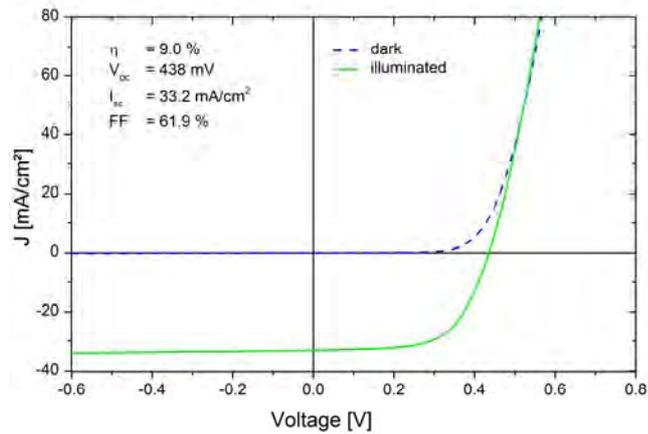


Fig. 4: Illuminated (green) and dark (blue) IV-curve of cell SH58B-B22 with 9% efficiency.

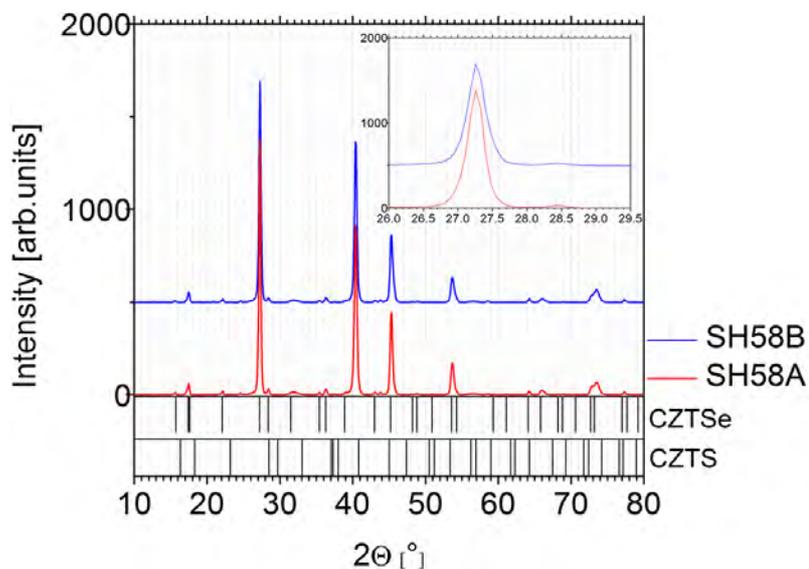


Fig. 5: XRD pattern of the  $5 \times 5 \text{ cm}^2$  sample. Strong peaks for Kesterite phase at  $27.18^\circ$ ,  $45.2^\circ$  and  $53.6^\circ$ . The peaks are shifted towards higher angles because of incorporation of Sulfur in the lattice.

SEM image of the top-view (Fig. 6) reveals a densely packed absorber layer with average grain size of 1-2  $\mu\text{m}$ .

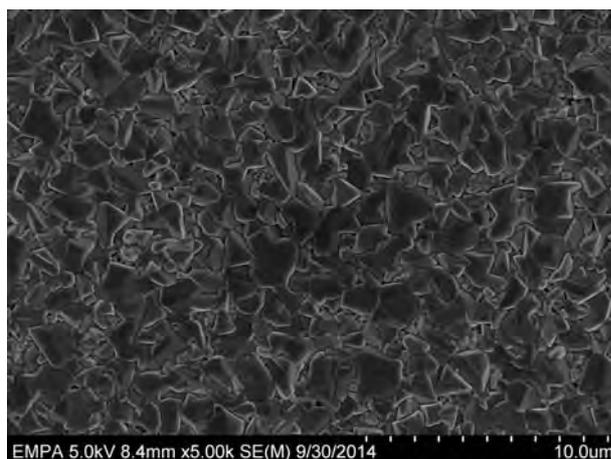


Fig. 6: SEM top-view of the selenized absorber layer.

The TRPL measurements (Fig. 7) show a lifetime of minority carriers in the absorber layer between 1.5 - 2.5 ns. This is higher than the lifetime of 0.44 ns previously reported for the CZTSe absorbers processed from solutions in alcohols with an organic binder [5] but is still much lower than typical lifetimes of > 50 ns for high-quality CIGS absorbers. This indicates that a further reduction of defect density and passivation of grain boundaries with alkali dopants is necessary for increasing the lifetime and diffusion lengths in DMSO-processed absorbers.

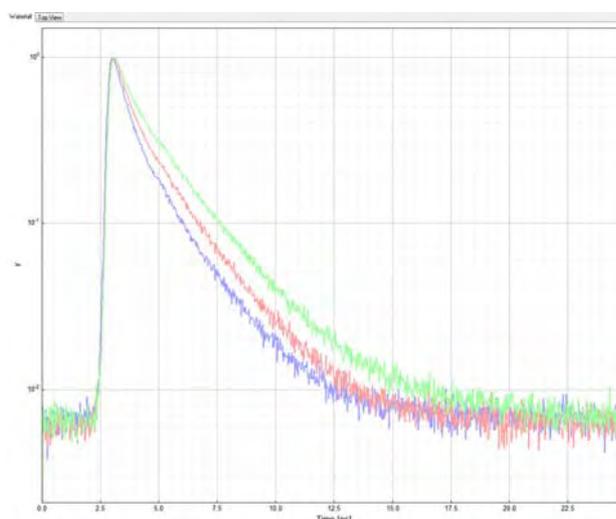


Fig. 7: TR-PL signal of 3 cells resulting in a minority carrier lifetime of approximately 1.5 – 2.5 ns.

## National and international cooperation

The project foresees a close collaboration between all project partners:

IREC: Fundació Institut de Recerca de l'Energia de Catalunya, Spain

UL: University of Luxembourg

HZB: Helmholtz Zentrum für Materialien und Energie GmbH, Germany

EMPA: Swiss Federal Laboratories for Materials Science and Technology

NU: Northumbria University, UK

AMU: Aix-Marseille University, France

FUB: Freie Universität Berlin, Germany

UAM: Universidad Autónoma de Madrid, Spain

UU- ASC: Uppsala University, Ångström Solar Centre

ASNT: Abengoa Solar New Technologies S.A, Spain  
NEXCIS, Rousset, France

The project involves a comprehensive training program with a well-balanced structure including local training elements (doctorate programs, internal seminars) and network wide activities (thematic workshops intensive courses, network workshops) with the active participation of all the members of the network. All partners of the network will be hosting 1-2 researchers during a short-term visit.

## Conclusions 2014 and Outlook 2015

The solar cell efficiencies have successfully been increased from 5% at the beginning of the project to over 9%. This result has been obtained by the successful application of sodium in order to achieve increased grain growth and electrical passivation of grain boundaries. The change from an open two-zone-furnace to a closed graphite box inside the RTP system allowed a more precise control of crucial partial pressures of SnS, SnSe and Se during the annealing process.

In the upcoming year further optimization of the annealing process to improve reproducibility, uniformity and identify the main inhomogeneity factors will continue. The incorporation of potassium dopants and induced metal compositional gradients inside the precursor layer will be tested to overcome current restrictions in the performance of CZTSSe solar cells.

## References

- [1] D.B. Mitzi, O. Gunawan, T.K. Todorov, K. Wang, S. Guha, **The path towards a high-performance solution-processed kesterite solar cell**, *Sol. Energy Mater. Solar Cells*, 95 (2011) 1421-1436.
- [2] W. Ki and H.W. Hillhouse, **Earth Abundant Element Photovoltaics Directly from Soluble Precursors using a Non-Toxic Solvent**, *Adv. Energy Mater.* 1 (2011) 732–735.
- [3] C. M. Sutter-Fella, J. A. Stuckelberger, H. Hagendorfer, F. La Mattina, L. Kranz, S.Nishiwaki, A. R. Uhl, Y. E. Romanyuk and A. N. Tiwari, **Sodium Assisted Sintering of Chalcogenides and Its Application to Solution Processed  $\text{Cu}_2\text{ZnSn}(\text{S,Se})_4$  Thin Film Solar Cells**, *Chem. Mater.* 26 (2014) 1420-1425.
- [4] M. Werner, C. M. Sutter-Fella, H. Hagendorfer, Y. E. Romanyuk, A. N. Tiwari,  **$\text{Cu}_2\text{ZnSn}(\text{S,Se})_4$  solar cell absorbers processed from Na-containing solutions in DMSO**, *Phys. Status Solidi A*, DOI: 10.1002/pssa.201431146 (2014).
- [5] Y.E. Romanyuk, C.M. Fella, A. R. Uhl, M. Werner, A. N. Tiwari, T. Schnabel, E. Ahlswede, **Recent trends in direct solution coating of kesterite absorber layers**, *Sol. Energy Mater. Solar Cells* 119 (2013) 181–189.



# HUB OF APPLICATION LABORATORIES FOR EQUIPMENT ASSESSMENT IN LASER BASED MANUFACTURING

## APPOLO

### Annual Report 2014

Author and Co-Authors	Stephan Buecheler <sup>1</sup> , Ayodhya N. Tiwari <sup>1</sup> , Andreas Burn <sup>2</sup>
Institution / Company	<sup>1</sup> Empa, Laboratory for Thin Films and Photovoltaics <sup>2</sup> Bern University of Applied Sciences, Applied Laser-, Photonics- and Surface Technologies
Address	<sup>1</sup> Überlandstr. 129, 8600 Dübendorf, Switzerland <sup>2</sup> Pestalozzistr. 20, 3400 Burgdorf, Switzerland
Telephone, E-mail, Homepage	058 765 6107, <a href="mailto:stephan.buecheler@empa.ch">stephan.buecheler@empa.ch</a> , <a href="http://www.empa.ch/tfpv">www.empa.ch/tfpv</a> 034 426 4246, <a href="mailto:andreas.burn@bfh.ch">andreas.burn@bfh.ch</a>
Project- / Contract Number	FP7-609355 / APPOLO
Duration of the Project (from – to)	01.09.2013 – 31.08.2017
Date	10.12.2014

#### ABSTRACT

The APPOLO project seeks to establish and coordinate connections between the end-users, which have demand on laser technologies for (micro)fabrication, knowledge accumulated in the application laboratories of the research institutes, as well as universities and the laser equipment manufacturers (preferable SMEs) of novel lasers, beam control and guiding, etc. The goal is to facilitate faster validation of the process feasibility and adaptation of the equipment for manufacturing, as well as assessment of the selected production processes.

The core of the consortium comprises laser application laboratories around Europe which are connected into a virtual hub to accumulate knowledge and infrastructure and promote the easy-to-access environment for the development and validation of laser-based technologies. All the partners have chosen a few directions for the assessment of novel laser technologies. Empa is collaborating in ultra-short pulse laser scribing for monolithic interconnections in thin film CIGS solar cells.

## Introduction / Aims of the project

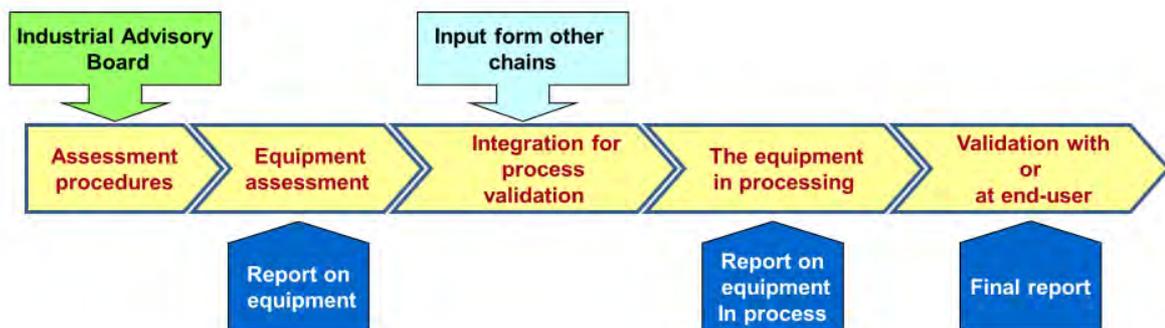
The overall objective of the APPOLO project is to establish and coordinate connections between I) end-users, which have demand on laser technologies for (micro) fabrication, II) knowledge accumulated in the application laboratories of research institutes and universities, and III) the laser equipment manufacturers (preferable SMEs: for integration, lasers, beam control and guiding, software, etc.).

Furthermore it is anticipated to facilitate faster validation of the process feasibility adaptation or customization of the technology & equipment for manufacturing conditions, including:

- reliability of the components;
- their interaction;
- assessment of the dedicated production processes;
- process speed, quality and repeatability;
- socio-economic issues.

## Description of the project

In the APPOLO project 8 complex assessment value chains are foreseen defined in separate work packages. An example is given in the figure below. Empa is involved in the value chain on thin film CIGS solar cell scribing with picosecond lasers which comprises WP2 in the APPOLO project. Dr. Andreas Burn from Bern University of Applied Sciences is WP leader of this activity.



## Work carried out and results achieved

The aim of the CIGS scribing cluster in WP2 is the assessment of new equipment & reliable laser scribing processes. This includes integration & assessment in the processes, final validation at end-user facilities, and development of novel approaches for thin-film CIGS solar cells on different substrates (glass, polymer, metal). For the evaluation standard monolithic integrated interconnect scheme is utilized: P1, P2 and P3 scribes have been performed between deposition steps.

A European hub for the assessment of industrial laser processes and equipment is being established and a model assessment value chain for CIGS thin-film solar module patterning has been implemented in Switzerland (Onefive GmbH, BFH, EMPA, Flisom AG). An assessment process with evaluation criteria and assessment experiments has been developed for the general and the model case.

## National and international cooperation

The APPOLO project is coordinated by Dr. Gediminas Raciukaitis, Head of Department of Laser Technology, Center for Physical Sciences & Technology, Vilnius, Lithuania. The consortium is formed by 21 partners from eight different countries has been built with the scope to cover the expertise needed for the project. The consortium is assembled from:

- research institutions with active and experienced staff across Europe, connected to the Hub of Application Laboratories;
- SMEs companies producing equipment and components for laser material processing;
- system integrator with global scope;
- end-users.

The HUB of the Application Laboratories is a common entry point to the assessment service provider net. Core of the HUB are the laser application laboratories, centers or departments at The Center for Physical Science and Technology (Lithuania), Leibniz-Institut für Oberflächenmodifizierung (Germany), Universidad Politécnica de Madrid (Spain), Lappeenranta University of Technology (Finland), and Bern University of Applied Sciences (BUAS) (Switzerland).

The HUB is surrounded by SMEs – laser manufacturers (Ekspla, Time Bandwidth Products, OneFive), component suppliers (Next Scan Technologies - scanners, Amsys - monitoring tools) and small system integrators (Lightmotif and ELAS).

Companies that are interested in those components are: Mondragon Assembly as global integrator, Daetwyler, CRF, Abengoa Solar, Flisom, Sächsische Walzengravur and Bioage SRL are end-users for equipment to be assessed and laser technologies, using the equipment. Empa will provide materials for validation and engage AG is responsible for management of IPR related issues within the consortium.

The lab scribing tool at BUAS has received a make-over and now offers new functionalities that increase productivity during process optimization. The electrical quality measurements were integrated early in the parameter optimization process for the high-throughput scribing. In a common effort of Flisom, Empa and BUAS, the electrical test structures compatible with the three partners' setups are being developed.

More information on the project can be found on the webpage: <http://www.appolo-fp7.eu/>

## **Evaluation 2014 and Outlook 2015**

The lab scribing tool at BUAS has received a make-over and now offers new functionalities that increase productivity during process optimization. The electrical quality measurements were integrated early in the parameter optimization process for the high-throughput scribing. In a common effort of Flisom, Empa and BUAS, the electrical test structures compatible with the three partners' setups are being developed. The proposed assessment proves to be valid for the evaluation of laser processes for scribing of functional layers in CIGS solar cells. The project is running as planned and no corrections are applied to the work plan for the next period.



## SCALENANO PROJECT

# DEVELOPMENT AND SCALE-UP OF NANO-STRUCTURED BASED MATERIALS AND PROCESSES FOR LOW COST HIGH EFFICIENCY CHALCOGENIDE BASED PHOTO-VOLTAICS

### Annual Report 2014

Author and Co-Authors	Dr Alessandro Virtuani
Institution / Company	SUPSI-DACD- ISAAC
Address	Via Trevano, CH-6952 Canobbio (Lugano, TI)
Telephone, E-mail, Homepage	058 666 63 14, <a href="mailto:alessandro.virtuani@supsi.ch">alessandro.virtuani@supsi.ch</a> , <a href="http://www.isaac.supsi.ch">www.isaac.supsi.ch</a>
Project- / Contract Number	Scalenano_FP7-284486
Project duration (from – to)	01.02.2012 – 31.07.2015
Date	09.12.2013

#### ABSTRACT

SCALENANO aims at contributing to a further reduction of manufacturing costs of PV solar modules, in line with the 20/20/20 target established by the European Commission and the European Strategic Energy Technology Plan (SET-Plan). Cu(In,Ga)(S,Se)<sub>2</sub> PV technologies, have already entered the stage of mass production. However, current production methods typically rely on costly, difficult to control over large surfaces, vacuum-based deposition processes which are known for lower material utilization of 30-50%. This compromises the potential reduction of material costs inherent to thin film technologies. At the forefront of this, SCALENANO will develop alternative environmental friendly and vacuum free processes based on the electro-deposition of nanostructured precursors. The project also includes the exploration and development of alternative processes with a very high potential throughput and process rate, as well as their extension to next-generation kesterite based absorbers, that will allow the proposition of an industrial roadmap for the future generation of chalcogenide based cells and modules.

The status of the project is briefly reviewed.

Further details: [www.scalenano.eu](http://www.scalenano.eu)

## Project partners

SCALENANO, funded by the 7<sup>th</sup> Framework Program (Energy) of the European Union with a budget of over EUR 10 million (CHF 12 mio.), is one of the largest R&D projects on PV ever funded by the EU. For its accomplishment an interdisciplinary consortium of 13 R&D groups was appointed. This comprises five research institutes, four universities and four companies from different industrial sectors. SCALENANO runs from February 1, 2012 to July 31, 2015.

IREC (Research Centre, Spain, Coordinator)

SUPSI (University, Switzerland)

EMPA (Research Centre, Switzerland)

IIT (Research Centre, Italy);

Uni-Luxemburg (University, Luxemburg)

Uni-Nottingham (University, UK)

FUB Uni-Berlin (University, Germany)

HZB (Research Centre, Germany);

CEA (Research Centre, France);

NEXCIS (SME, France);

IMPT (SME, UK)

quitted project early 2014

MERCK (Industry, Germany)

SEMILAB (SME, Hungary)

## Involvement of SUPSI in the project

Within the project the **Institute for Applied Sustainability to the Built Environment Institute (ISAAC)** of SUPSI is actively involved in helping the industrial partners to **scale-up the technology**. SUPSI is in fact mainly involved and leads work-package WP5 (Scale-up processes: from cell to module) which started in m7 (August 2012).

SUPSI main opportunity in the project is that of building internal know-how in the field of module technology and of consolidating pre-existing knowledge in the field of performance testing of CIGS-based devices (power rating, life-time, energy yield, etc.).

## SUPSI' main achievements in 2014

### Encapsulation of modules

Lamination trials have started at SUPSI in m18 with test material provided by NEXCIS (30x60 cm<sup>2</sup> bare modules) and are presently on-going. The modules were encapsulated and completed at SUPSI by connecting the terminals and attaching a junction box to the rear side of the modules. The following encapsulant materials have been tested alone and in combination with an **edge sealant (PIB): EVA, IONOMER, PVB, POLYOLEFIN.**

EVA is historically the encapsulant material most used for the encapsulation of solar PV modules. The rationale for working with different polymers lies in the fact that for CIGS modules, EVA is effective only in combination with an edge sealant.

IONOMER has been tested to verify whether this material could be used for the encapsulation of the modules without using an edge sealant.

PVB is an encapsulant used for the lamination of *laminated safety glass* which provides specific structural resistance (i.e. glass particle size and dispersion of particles) to glass/glass laminates in case of impact. This material is often used to laminate modules for BIPV (Building Integrated PV) installations.

POLYOLEFIN could be considered as an alternative to EVA, with the advantage of not releasing acetic acid during the curing process. For CIGS POLYOLEFIN too is better used in combination with an edge-sealant.

**Table I:** encapsulant materials used in the lamination trials with and without edge sealant.

Encapsulant	Including Modifications to standard recipe	Hrs in Damp Heat (status Dec 19 <sup>th</sup> , 2014)	Ongoing Damp-heat (hrs)
EVA	N	1000	1000
EVA + edge sealant	Y	3358	1000
IONOMER	Y	1000	1000
IONOMER + edge sealant	Y	1000	1000
PVB	Y	0	1000
PVB + edge sealant	N	0	1000
POLYOLEFIN	Y	0	1000
POLYOLEFIN + edge sealant	Y	0	1000

For all materials, besides the reference process (recipe) provided by the supplier, in view of optimizing the industrial process, trials were performed with reduced curing time and, for some polymers (e.g. EVA) at a reduced temperature.

### EVA

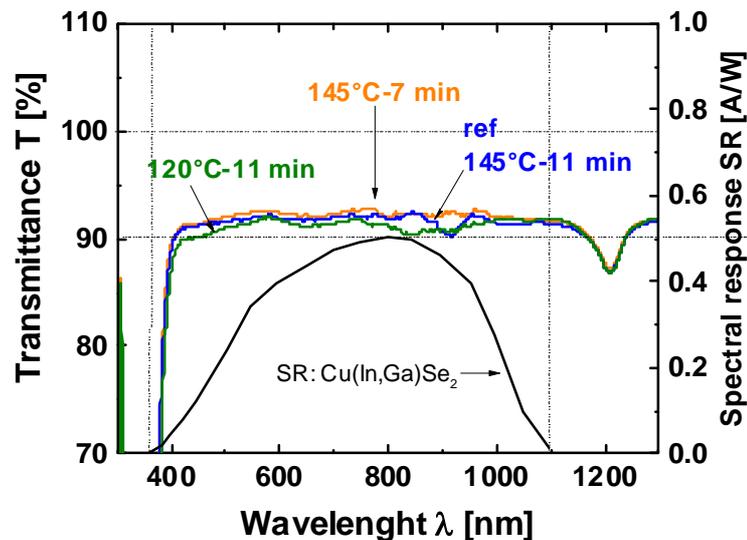
In the present report we focus our attention on the earlier set of trials with EVA in combination with an edge sealant (PIB) for which the damp-heat (DH) testing is in a more advanced state. The modules subjected to DH tests were six.

#### *Optical tests: transmittance*

Glass/EVA/glass samples (5x5 cm<sup>2</sup>) were processed during the lamination processes and tested at SUPSI with a fast-acquisition spectro-radiometer Avantes. Additional test samples were sent to NEX-CIS for a cross-check.

**Requirements:** specs for total transmission > 91%.

Fig. 1 shows results of transmittance ( $T = I_1/I_0$ ) measurements where  $I_1$  and  $I_0$  correspond, respectively, to the light intensity measured with and without the sample under test



**Fig. 1:** Transmittance ( $T = I_1/I_0$ ) measurements performed at SUPSI on glass/EVA/glass samples processed at different temperatures and curing times. The spectral response of a typical  $Cu(In, Ga)Se_2$  is shown too.

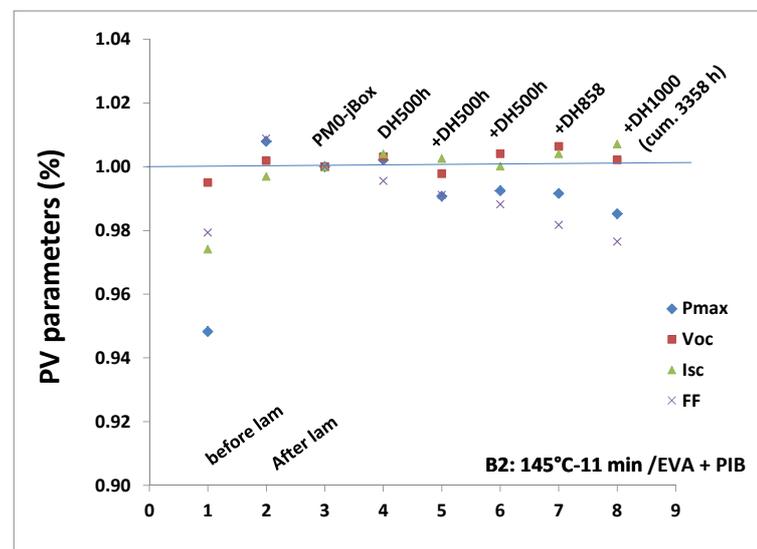
Modules were flashed before the lamination process (*as received*), after the lamination, after the application of the junction box (**PM0**), and after each cycle in DH. The PM0 measure is taken as a reference value. Fig 2 shows the values of the normalized PV parameters for modules B2.

From these plots it can be inferred that the lamination process is generally beneficial in increasing particularly the current of the devices (improved optical coupling) and the FF of devices. The application of the junction box does not introduce parasitic resistances (FF remains constant).

These results are not necessarily consistent with what is often observed for CIGS modules in the literature which tend to experience a reduction in performance after the lamination process and after exposure at high temperatures in the dark, as in a DH chamber, a phenomenon which is generally known as *dark annealing*.

The combined examination of power measurements (PM), electro-luminescence (EL), visual inspection (VIS) and wet-insulation test (WL) reveals that the modules laminated with **EVA in combination with an edge-sealant** (PIB) have shown an excellent resistance upon exposure to DH test (cumulative 3358 hrs) with only a very modest power loss for module B2 (-1.7 %) and a more significant one (-5.3%) for B3, which considering the overall duration of the DH test, is considered to be more than acceptable.

Similar results are obtained for all other devices laminated with EVA + edge sealant (B4, B5, B6, B7).



**Fig. 2:** Normalized PV parameters of module **B2** before and after the lamination step, after the application of the junction box (PM0, reference value), and after and after each cycle of DH.

### Life-time testing

As described in the previous section, initial testing is used to provide feedback to the encapsulation process. This task has so far mainly involved the use of climatic chambers for damp-heat testing, electroluminescence imaging, visual inspection, and wet-insulation testing in combination with power rating (Wp) of the modules.

In addition, a set-up for the testing of **Potential Induced Degradation (PID)** of solar modules has been realized at SUPSI.

High voltage potentials have long been recognized as a stress factor for PV modules. Nevertheless, only in recent years field degradation of PV modules has been explained by this mechanism particularly for c-Si devices. Considerable degradation rates can in fact be observed for modules with solar cell exposed to high negative potentials with respect to ground. For c-Si the effect is from time to time partly reversible.

Thin-film (TF) modules realized in a super-strate structure (as a-Si and CdTe, where the TCO layer is directly in contact with the front glass) may experience electrochemical corrosion (so called *bar-graph corrosion*) of the Transparent Conductive Oxide (TCO) layers due to high negative potentials.

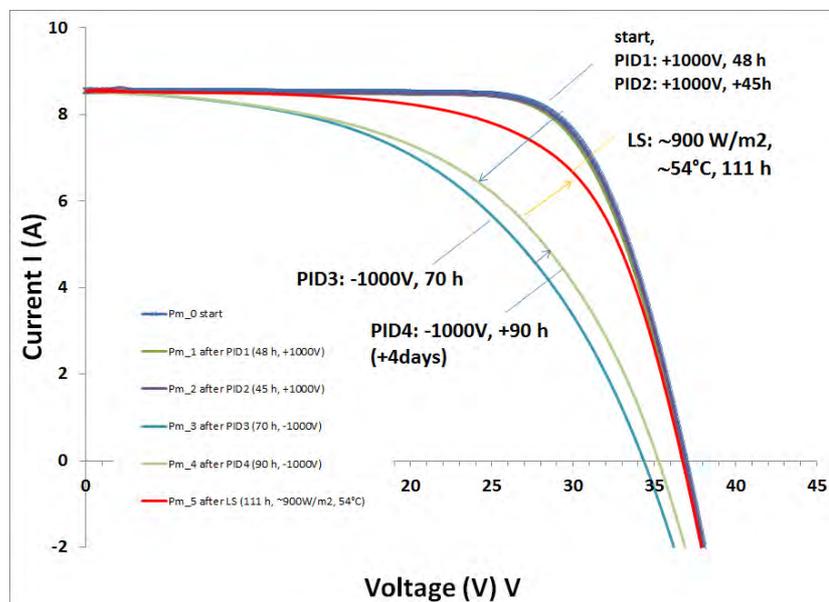
CIGS modules grown in a substrate structure (with a polymer layer separating the TCO from the front glass) have long been believed to be immune from this phenomena. Nevertheless, recent works (e.g. Lechner et al., 28<sup>th</sup> EUPVSEC) have observed PID degradation for the CIGS technology as well.

For this reason a PID set-up has been realized at SUPSI using as first test samples conventional c-Si modules. The set-up is briefly shown and described in Fig. 3 and could be used to test SCALENANO modules.

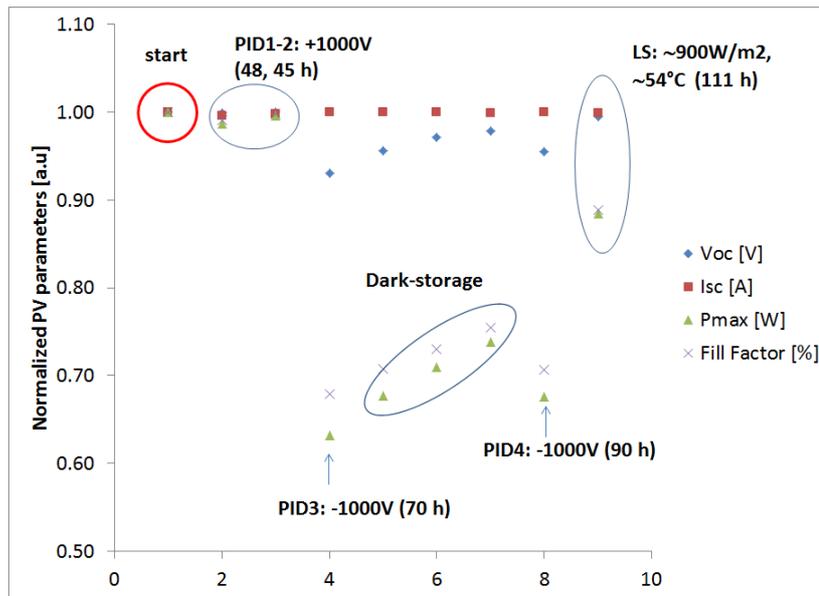


**Fig. 3:** PID set-up at SUPSI: (a) c-Si module in a basin with the front layer immersed in water and a very thin water layer sprayed on the rear side. A  $\pm 1\text{kV}$  potential is applied to the terminals of the module and the frame grounded. An Al foil is then applied to the rear of the module in order to obtain a uniform electrical field across the edges and the rear side of the module.

Preliminary results can be observed in Fig. 4 and 5 for a conventional c-Si module. No degradation can be observed when applying + 1kV to the terminals of the module (2 cycles of 48 and 45 h) whereas a considerable degradation (- 35% of Pmax) can be observed when a negative -1kV potential is applied (2 cycles of 70 and 90 h). A light-soaking (LS) of the module (111 h, 900 W/m<sup>2</sup>, 54°C) is able to partly regenerate the module's power (90% of initial Pmax).

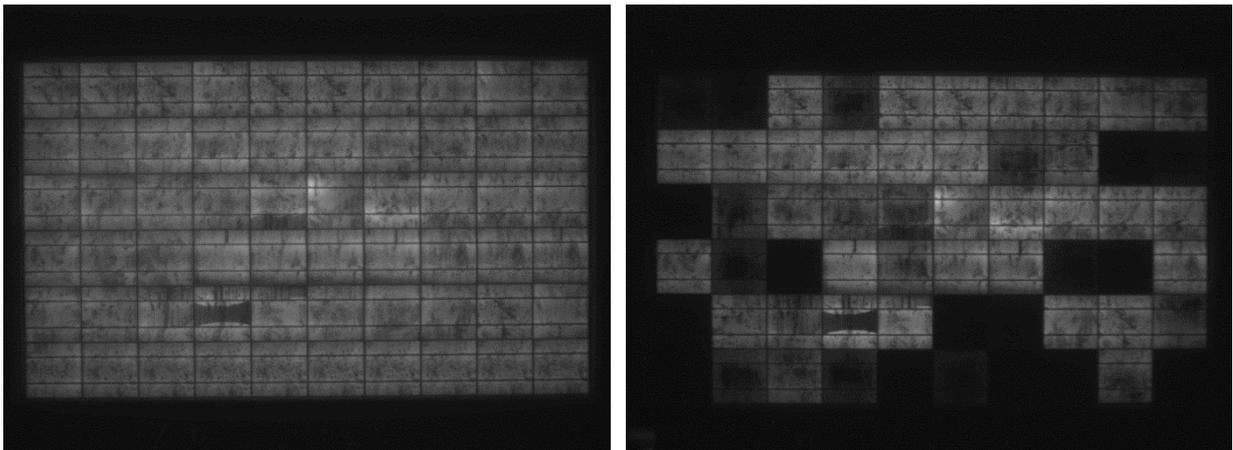


**Fig. 4:** PID measurements on a conventional c-Si at SUPSI: IV curves.



**Fig. 5:** PID measurements on a conventional c-Si at SUPSI: normalized PV parameters.

EL images of the module before and after the exposure of the module to -1kV for 70 h are shown in Fig. 6.



**Fig. 6:** EL images of the module before and after the exposure of the module to -1kV for 70 h.

### Performance and reliability testing of electro-deposited PV modules

Another task in charge of SUPSI is the assessment of the performance (power, Wp), durability and energy-yield (kWh/kWp) of the devices manufactured within the project. Preliminary activities for a proper pre-conditioning procedure of the electro-deposited CIGS modules – prior to power rating - have started.

### Energy yield measurements of Scalenano modules under real operating conditions

Two large-area modules (60 x 120 cm<sup>2</sup>) manufactured by Nexcis and close to the final industrial product were installed on the November 2014 on SUPSI's outdoor test-stand in Lugano for energy yield measurements.

The stand is south orientated with an inclination of 45°. Each module is equipped with a Maximum Power Point Tracker (MPPT3000) developed by SUPSI. The MPPT3000 is a multifunction testing device for the measurement of single PV modules. Voltage and current ranges can be adapted to optimize measurement accuracy. The device combines maximum power point tracking with a full I-V tracer function. Three auxiliary channels are available for the measurement of meteorological data.

The module's temperature is recorded with a PT100 fixed on the back of the module. Each test stand is equipped with at least three pyranometer and different reference cells to monitor the in-plane irradiance. Meteorological data like global, diffuse horizontal irradiance and its spectral distribution, wind speed and ambient temperature as well as pressure and humidity are recorded simultaneously by a separate data logger.

Fig. shows the energy-rating test stand and the devices under test together with a c-Si reference module which will be used as a bench-mark technology.



**Fig. 7:** outdoor energy rating test-stand at supsi with in-plane irradiance measurement at 45°, horizontal global and diffuse irradiance. Modules (a) and (b) are Nexcis large-area devices; (c) is a c-si reference module used as bench-mark technology.



## CONNECT-PV

# Conductive Transparent Electrodes: A Competence Cluster for Highly Efficient Thin Film Photovoltaics

## Annual Report 2014

Author and Co-Authors	Thomas Lanz, Beat Ruhstaller
Institution / Company	Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften ZHAW Institute of Computational Physics
Address	Wildbachstr. 21 CH-8401 Winterthur
Telephone, E-mail, Homepage	<a href="mailto:lanz@zhaw.ch">lanz@zhaw.ch</a> , <a href="http://www.icp.zhaw.ch">www.icp.zhaw.ch</a>
Project- / Contract Number	SI/501099-01 / SI/501099-01
Duration of the Project (from – to)	01.09.2014 – 30.09.2017
Date	01.12.2014

### ABSTRACT

The project aims at the development of highly conductive and transparent contact layers to be used in flexible thin film photovoltaics. These layers are a central requirement for the realization of low production cost, flexible solar modules. Among the specific requirements for these layers are mechanical stability compatible with bending flexible modules, low electrical resistance allowing for high module performance and a large optical transmission. Further, to allow for low-cost production the layer deposition must be compatible with low-temperature and large-area techniques. The candidate systems that will be investigated include amorphous metal oxides deposited by solution-processing, metal grids and metal nanowires derived from solution. Optical modeling and model-based analysis of electrical losses in the module will provide input for the cell design.

More information on the CONductive traNsparent Electrodes (CONNECT-PV) project is available on <http://www.ccem.ch/connect-pv>.

## Aims of the project

The project aims at the development of highly conductive and transparent contact layers to be used in flexible thin film photovoltaics. These layers are a central requirement for the realization of low production cost, flexible solar modules. Specifically, the contact layers must satisfy the following requirements:

- Mechanical stability, compatible with bending flexible modules
- Low electrical resistance allowing for high module performance
- Large optical transmission
- Good performance in the solar module in terms of power conversion efficiency
- Compatibility with low-temperature and large-area deposition techniques

The following candidate systems will be investigated:

- Amorphous metal oxides deposited by solution-processing instead of thermal evaporation
- Metal grids that combine light scattering with current collection
- Metal nanowires derived from solution compatible for roll-2-roll processing

**ZHAW ICP** provides input for the cell design and layer topographies with optical modeling of the light management and a model-based analysis of the optical and electrical losses in the solar modules. Specifically, we target the following deliverables:

- A numerical model of the light management in the different investigated solar cell technologies that considers texture topography
- A finite element model of the electro-thermal transport in the modules that accounts for the influence of sheet and contact resistances and localized defects on the current-voltage characteristics

## Completed tasks and achieved results

Given that at ZHAW ICP the work in this project effectively started at the beginning of October after approval of funding by SFOE we were not yet able to finish any of the deliverables outlined in the project description. However, we have started collaboration with EPMA-FP on optical modeling of metal grids, as part of Task 2.1 in WP2. Here we present the current status of this work.

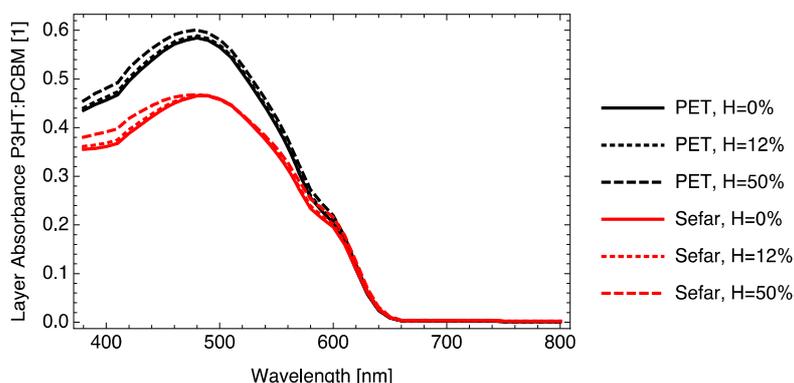
EPMA-FP has manufactured flexible organic solar cells on PET substrates that contain a metal mesh embedded in polymer as the rear electrode. For encapsulation the cell is put in a glass/glass sandwich. Both contacts are semi-transparent and the cell can thus be illuminated from both sides. The metal mesh scatters light in transmission and reflection.

We employ optical modeling with the software setfos [1,2] to understand the measured difference in the EQE for the two illumination modes. Specifically, we want to separate the influence of the illumination direction from that of the scattering. It was hypothesized that the broader EQE shape measured for the mesh illumination results from a more pronounced scattering, as the first scattering occurs before the light traverses the absorber.

In Fig. 1 we show the current status of the optical model. The following steps are taken to represent the cell in the model:

- The optical constants of the metal mesh are not available experimentally. We thus construct the refractive indices in the following way: the real part is chosen as an effective medium approximation between the polymer and the silver of the wires according to the volume fraction of the silver. The imaginary part is calculated to reproduce the measured transmission in the visible range.
- The scattering of the metal mesh is incorporated as a scattering interface that acts as a Lambertian diffuser with the experimentally measured Haze.

Given the generally good agreement between experiment and simulation with this version of the model it appears that the scattering has only a minor influence on the shape of the EQE. To emphasize this we include the simulation results for a greatly exaggerated degree of scattering with 50% Haze. Our preliminary conclusion is that the different shapes of the EQEs can be mainly attributed to *i*) different optical interference patterns induced by the change in illumination direction and *ii*) the larger absorption in the PEDOT layer in the case of mesh illumination.



**Fig 1.:** Simulated external quantum efficiencies (EQE) for both illumination directions and for increasing degrees of scattering in the mesh. Illumination is either through the flexible substrate (PET) or the metal mesh (Sefar).

Present work focuses on refining the model. Whereas the optical model appears to correctly describe the main features of the measured absorption we hope to achieve a more quantitative agreement between simulation and experiment.

## National cooperation

The above described results were achieved in collaboration with Dr. Roland Steim of the Laboratory of Functional Polymers at EMPA.

## International cooperation

There was no international cooperation in this year.

## Evaluation 2014 and Outlook 2015

Besides the optical properties of the metal wire textile substrates the electrical properties will be investigated, too. Interaction with the associated industrial partner Sefar is planned. Many more collaborations with the other consortium partners from the ETH domain will be launched after clarifying the current solar cell development priorities with these partners. In addition to the optical and electro-thermal modeling competence, the ICP laboratory will offer experimental validation techniques (namely characterization of angular light scattering, dynamic electrical cell response and IR imaging of mini modules) to the consortium partners.

## References

- [1] T. Lanz, B. Ruhstaller, C. Battaglia, and C. Ballif, "Extended light scattering model incorporating coherence for thin-film silicon solar cells," *Journal of Applied Physics*, vol. 110, no. 3, p. 033111, 2011
- [2] Simulation software Setfos version 4.0 by Fluxim AG, [www.fluxim.com](http://www.fluxim.com), Switzerland
- [3] <http://www.ccem.ch/connect-pv>



# SUNFLOWER

## SUSTAINABLE NOVEL FLEXIBLE ORGANIC WATTS EFFICIENTLY RELIABLE

### Annual Report 2014

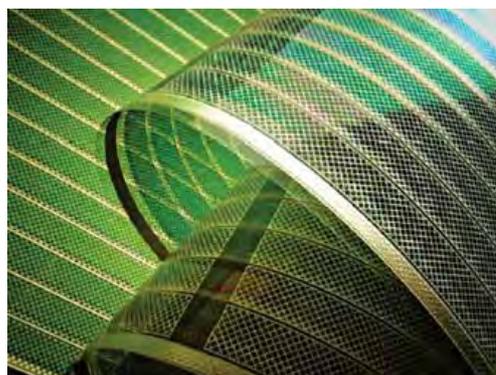
Author and Co-Authors	Giovanni Nisato
Institution / Company	CSEM S.A.
Address	Tramstrasse 99, 4132 Muttenz
Telephone, E-mail, Homepage	T +41 61 690 6030 <a href="mailto:giovanni.nisato@csem.ch">giovanni.nisato@csem.ch</a> , <a href="http://www.csem.ch">www.csem.ch</a>
Project- / Contract Number	SUNFLOWER / FP7-287594
Duration of the Project (from – to)	01.10.2011 to 31.03.2016
Date	2014/12/22

#### ABSTRACT

Organic photovoltaics (OPV) represent the newest generation of solar-to-power conversion technologies. OPV provide a key opportunity for the EU to further establish its innovation base in alternative energies offering the benefits of flexibility, low weight, and freedom of design. OPV can operate under low light conditions and is shadow tolerant. These advantages and the ease of handling in subsequent product-integration processes will enable the development of consumer and portable electronics and building-integrated photovoltaic (BIPV) products.

The 17 project partners have a collective project budget of Euro 14.2 M of which 10.1 M is funded as Collaborative Project within the Seventh Framework Programme.

More information on the Sunflower project is available on <http://www.sunflower-fp7.eu/>.



## Project goals

The Sunflower project encompasses the development of OPV technology from end to end. While working on increasing performance in terms of lifetime, efficiency, cost, and sustainability by means of R&D activities on the cell and module levels, Sunflower also addressed usage scenarios that are suited to OPV, as well as the technology's end-of-life environmental impact. With its 17 partners distributed along the value chain, Sunflower aims at major improvements in three fields: materials, processes, and tools and applications.

## Project description

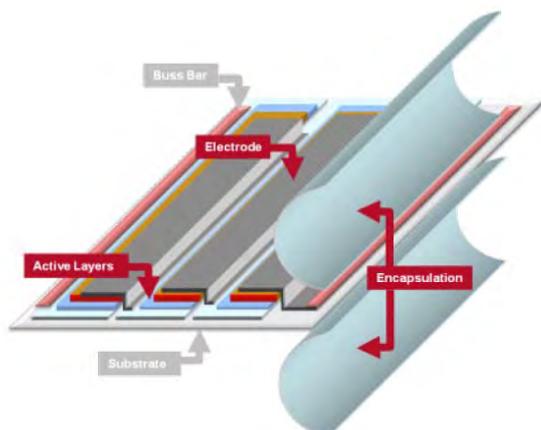
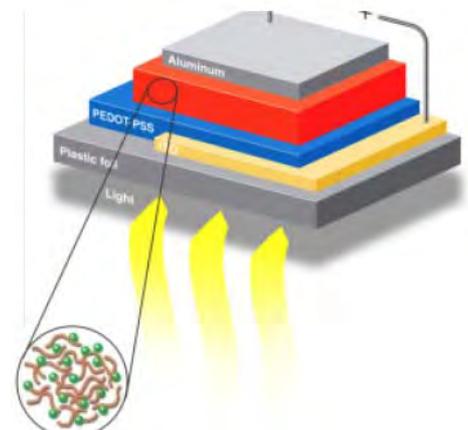
Overall, the photovoltaic industry is still a minor contributor to the global energy needs which are steadily increasing in quantity and variety. On the one hand of the spectrum, there is a post-industrial world with electricity-hungry devices, with sophisticated energy generation and transmission options (grid) available. On the other hand of the spectrum, there are billions of people with little or no access to "grid" electricity, depending on local or even portable generation. More breakthroughs are needed, notably in alternative, cost-effective and scalable photovoltaic energy production methods to address these wide ranges of needs and opportunities.

Organic Photovoltaics (OPV) represent the latest generation of technologies in solar power. In economic terms, the opportunities are new application areas e.g. the integration in facades and windows, the expansion of the innovation base in alternative energies and the development of manufacturing technologies requiring a high level of automation, highly trained personnel, low energy consumption and close proximity to suppliers and markets.

The EU is still very well positioned to drive these breakthroughs and simultaneously to benefit from them, given its competences in photovoltaics R&D, materials and manufacturing infrastructure including photo-absorbing "electronic inks", transparent printable conductors, substrates, encapsulation materials and roll-to-roll precision coating and printing equipment, and a large market for end-users.

The Sunflower consortium combines industrial, institutional and academic support to make a significant impact at European and International level, especially on materials and processes while demonstrating their market relevant implementations.

OPV technology is based on organic semiconductors, made using organic chemistry and tailored to its function. Sunflower uses polymeric semiconductors that are soluble and printable. Several layers of materials are printed on top of one another to create a functional device. Through morphological engineering, a so-called p-n heterojunction is established during the fabrication process. The power-conversion efficiency of the technology is increased by researching new semiconductors and by adding layers that absorb complementary parts of the solar spectrum (tandem cells).



Through processes which are newly developed yet based on proven manufacturing technology, OPV cells can be arranged to form modules. A combination of additive processes, such as coating and printing, and subtractive ones, such as dry-structuring, leads to fully functional modules. Compared to other technologies, the outer and inner form-factors can be tuned quite easily in order to allow for customized properties in terms of voltage, shape, and transparency. The lifetime of OPV modules is increased by using barrier and "weatherable" materials. Light guiding technologies are also used to increase efficiency.

OPV applications can differ significantly from those of traditional photovoltaic. Thanks to the advantages in terms of design and integration potential, completely new products are possible: OPV thus complements the portfolio of current photovoltaic technologies. New designs incorporating the given properties of OPV can be used as aesthetic photovoltaic solutions for building facades and integration into products we use in our daily lives. The Sunflower consortium has chosen three distinct demonstrators to highlight this opportunity.



#### Challenges include:

- 1) Increased efficiency of the panels
- 2) Reduction of the production costs
- 3) Increased lifetime of the panels
- 4) Evaluation and reduction of the environmental footprint (during the whole life cycle)
- 5) Identification of the early adopter markets

The project is structured along the following workpackages:

- 1. Materials:** development of solution processable photoactive polymers, recombination layer materials (electron and hole extraction layer), flexible substrates including water vapour and oxygen diffusion barrier.
- 2. Devices:** investigation of the structure, operational mechanisms and device physics of bulk heterojunction solar cells, and to transfer this knowledge into the fabrication of OPV cells, with novel architectures and including SUNFLOWER materials, able to achieve PCEs beyond the state-of-the-art.
- 3. Tool development:** development of hardware and software for OPV electro-optical characterization, simulation of devices, light management structure simulation and realization; lifetime and permeation testing as well as mechanical testing.
- 4. Lifetime and environmental impact:** studies of the lifetime of critical materials, cells and modules; LCA, ecotoxicity of selected materials, eco-sustainability assessment.
- 5. Upscaling and demonstration:** OPV modules and proof of concept integration in devices.
- 6. Training and dissemination activities:** web site, publications, summer schools, public demo kit.
- 7. Exploitation and economic impact:** end-user relations, consortium IP, consortium partner exploitation plans.
- 8. Project Management.**
- 9. Specifications and requirements:** from end-users and across consortium partners.

#### Summary of key results

The consortium partners work in a concerted way towards up-scalable solution deposition processes such as blade and ultimately slot-die coating that can be up-scaled to production environments. The Sunflower consortium demonstrated OPV tandem cells by solution processing at different partners with comparable results. Effective tools were developed enabling a fast assessment of the potential of a polymer for tandem cell application and over 60 photoactive polymers were tested. Tandem OPV cells with efficiencies above 7.2%, using realistic process conditions (e.g. in air, using blade coating).

Passivation and active barrier (getter) materials were heavily investigated including UV stabilized PET, oxygen and water diffusion barriers, getter materials. This resulted in novel substrates including multi-layer barrier and UV stabilized PET, providing oxygen and water vapour transmission rates lower than industrial reference material which are now being tested by the consortium partners. Photoactive materials including both low and high band-gap photo-absorbing polymers are investigated in the project; the work in this area ranges from computer modelling to lab synthesis taking into account industrial-grade synthetic routes. Over 87 new polymers were synthesised and tested. Printable formulation of

zinc-oxide nanoparticles for the recombination layer were realized, tested and further optimized to enable atmospheric solution-processing of tandem cells. Silver inks for printable ITO-replacement layers as well as hole-injection layers (PEDOT-PSS) were developed ITO-free printed anodes compatible with tandem OPV cell structures were delivered to consortium partners.

Project efforts were devoted to building and asses tools necessary for the analysis and implementation of the technology. These include direct imaging and 3D electron microscopy of critical photoactive blends layers. Further, mechanical reliability as well as accelerated life-cycle methods were developed to screen long-lived packaging of OPV modules. The packaging materials should enable several outdoor applications in realistic conditions for several years (experiments ongoing). Simulation tools for the design of the optical stacks and improve light in-coupling lead to first results, including proof of concept for light management structuring leading to > 15% relative increase in cell efficiency. Electrical characterization of OPV toolkits developed in the project resulted in novel commercially available platform (PAIOS).

The environmental, life cycle and eco-efficiency of OPV is being assessed by the project team as well. Environmental indicators showed the highest impact for ITO and silver electrode, supporting the initial project target (ITO replacement). An eco-efficiency assessment show that the already existing single OPV technology could be a viable option for the building integrated photovoltaic (BIPV). Ecotoxicology experiments (the first results we are aware of in this field) performed with the potentially environmentally relevant single components of OPVs indicate that effects are observed only at environmentally irrelevant concentrations.

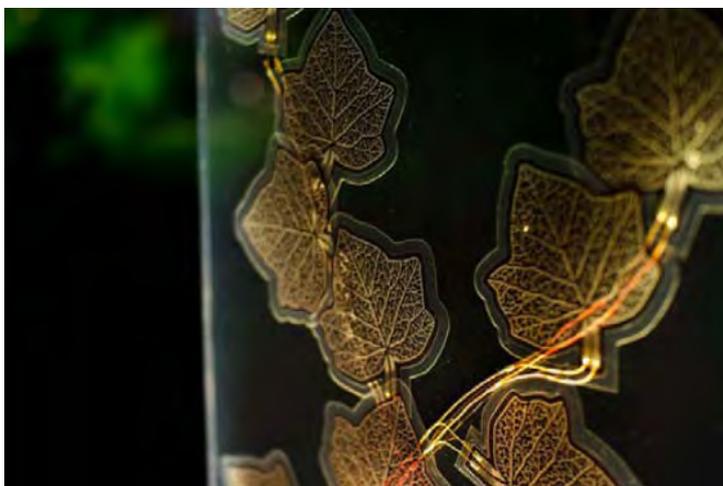
Finally several application cases are being developed, with end-demonstrator demos targeting integration in facades, building interiors and consumer electronics.



*Portable chargers*



*Vertical window blinds*



*OPV-window*

## National and international cooperation

The SUNFLOWER project (Grant number 287594) is supported by the European Commission through the 7th Framework Program on Research and Technological Development under the Information and Communication Technologies (ICT) thematic call: FP7-ICT-2011-7.

The project consortium combines industrial, institutional and academic support to make a significant impact at a European and International level, especially on materials and processes while demonstrating their market relevant implementations. The industrial project partners are all well positioned along the supply chain of future OPV-based products: an important prerequisite for the creation of a significant socio-economic impact.

### Consortium partners

CSEM SA	Switzerland	*
DUPONT TEIJIN FILMS UK LTD	United Kingdom	
AMCOR FLEXIBLES KREUZLINGEN AG	Switzerland	*
AGFA-GEVAERT N.V.	Belgium	
FLUXIM AG	Switzerland	*
SAES GETTERS S.P.A.	Italy	
CONSIGLIO NAZIONALE DELLE RICERCHE	Italy	
FACHHOCHSCHULE NORDWESTSCHWEIZ	Switzerland	*
CHALMERS TEKNISKA HOEGSKOLA AB	Sweden	
FRAUNHOFER-GESELLSCHAFT	Germany	
LINKOPINGS UNIVERSITET	Sweden	
UNIVERSITAT JAUME I DE CASTELLON	Spain	
GENES'INK	France	
CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE SCI.	France	
UNIVERSITEIT ANTWERPEN UA	Belgium	
BELECTRIC OPV GMBH	Germany	
MERCK CHEMICALS LTD	United Kingdom	(* Swiss partners)

## References / project publications

Project website: <http://www.sunflower-fp7.eu/index.php/publications-links>

- [1] Recycling of indium from CIGS photovoltaic cells: Potential of combining acid-resistant nanofiltration with liquid-liquid-extraction, Zimmermann Y. S., Niewersch C., Lenz M., Kül Z., Corvini P. F-X., Schäfer A., and Wintgens T., Environmental Science & Technology, 2014, published
- [2] Structural tuning of quinoxaline-benzodithiophene copolymers via alkyl side chain manipulation: synthesis, characterization and photovoltaic properties, Marta Tessarolo, Desta Gedefaw, Margherita Bolognesi, Fabiola Liscio, Patrik Henriksson, Wenliu Zhuang, Silvia Milita, Michele Muccini, Ergang Wang, Mirko Seri, Mats R. Andersson, J. Mater. Chem. A, 2014
- [3] Conjugated polymers based on benzodithiophene and fluorinated quinoxaline for bulk heterojunction solar cells: thiophene versus thieno[3,2-b]thiophene as p-conjugated spacers, Desta Gedefaw, Marta Tessarolo, Wenliu Zhuang, Renee Kroon, Ergang Wang, Margherita Bolognesi, Mirko Seri, Michele Muccini, Mats R. Andersson, Polym. Chem. 2014
- [4] Trap-Assisted Recombination via Integer Charge Transfer States in Organic Bulk Heterojunction Photovoltaics, Qinye Bao, Oskar Sandberg, Daniel Dagnelund, Simon Sandén, Slawomir Braun, Harri Aarnio, Xianjie Liu, Weimin M. Chen, Ronald Österbacka, and Mats Fahlman, Adv. Func. Mat. , 2014 (DOI: 10.1002/adfm.201401513)
- [5] Effects of ultraviolet soaking on surface electronic structure of solution processed ZnO nanoparticle in polymer solar cell, Qinye Bao, Xianjie Liu, Yuxin Xia, Feng Gao, Louis-Dominique Kauffmann, Olivier Margeat, Jörg Ackermann and Mats Fahlman, J. Mater. Chem. A, 2014 (DOI: 10.1039/C4TA02695K)

- [6] Interplay of optical, morphological and electronic effects of ZnO optical spacers in highly efficient polymer solar cells, S. Ben Dkhil, D. Duché, M. Gaceur, A.K. Thakur, F. Bencheikh Aboura, L. Escoubas, J.-J. Simon, A. Guerrero, J. Bisquert, G. Garcia-Belmonte, Q. Bao, M. Fahlman, C. Videlot-Ackermann, O. Margeat and J. Ackermann, *Adv. En. Mat.*, 2014 (DOI: 10.1002/aenm.201400805)
- [7] Oxygen- and Water-Based Degradation in [6,6]-Phenyl-C 61-Butyric Acid Methyl Ester (PCBM) Films, Qinye Bao, Xianjie Liu, Slawomir Braun, Mats Fahlman, *Adv. Energy Mater.*, 2013
- [8] Influence of Incorporating Different Electron-Rich Thiophene-Based Units on the Photovoltaic Properties of Isoindigo-Based Conjugated Polymers: An Experimental and DFT Study, Wenliu Zhuang, Margherita Bolognesi, Mirko Seri, Patrik Henriksson, Desta Gedefaw, Renee Kroon, Markus Jarvid, Angelica Lundin, Ergang Wang, Michele Muccini, Mats R. Andersson, *Macromolecules* 2013, 46, 8488
- [9] 2D p-conjugated benzo[1,2-b:4,5-b']dithiophene- and quinoxaline-based copolymers for photovoltaic applications, Margherita Bolognesi, Desta Gedefaw, Dongfeng Dang, Patrik Henriksson, Wenliu Zhuang, Marta Tessarolo, Ergang Wang, Michele Muccini, Mirko Serid, Mats R. Andersson, *RSC Adv.*, 2013, 3, 24543
- [10] Comparative effects of zinc oxide nanoparticles and dissolved zinc to zebrafish embryos and eleuthero-embryos, Brun N.R., Lenz M., Wehrli B., Fent K., *Science of The Total Environment*, Vol. 476–477, 2014, Pages 657–666
- [11] Thin-Film Photovoltaic Cells: Long-Term Metal(loid) Leaching at Their End-of-Life, Yannick-Serge Zimmermann, Andreas Schäffer, Philippe F.-X. Corvini, Markus Lenz, *Environ. Sci. Technol.*, 2013
- [12] Computational Modeling of Isoindigo-Based Polymers Used in Organic Solar Cells, Paolo Salvatori, Edoardo Mosconi, Ergang Wang, Mats Andersson, Michele Muccini, and Filippo De Angelis, *J. Phys. Chem. C*, 2013, 117 (35), pp 17940–17954
- [13] Molecular Electronic Coupling Controls Charge Recombination Kinetics in Organic Solar Cells of Low Bandgap Diketopyrrolopyrrol, Carbazole, and Thiophene Polymers, Teresa Ripolles-Sanchis, Sonia R. Raga, Antonio Guerrero, Matthias Welker, Mathieu Turbiez, Juan Bisquert, and Germà Garcia-Belmonte, *J. Phys. Chem. C*, 2013, 117 (17), pp 8719–8726
- [14] Reliable extraction of organic solar cell parameters by combining steady-state and transient techniques, M.T. Neukom, S. Züfle, B. Ruhstaller, *Organic Electronics*, Volume 13, Issue 12, December 2012, Pages 2910–2916
- [15] Organic photovoltaics: Potential fate and effects in the environment, Yannick-Serge Zimmermann, Andreas Schäffer, Christoph Hugi, Karl Fent, Philippe F.-X. Corvini, Markus Lenz, *Environment International*, Volume 49, 15 November 2012, Pages 128–140
- [16] Efficient as-cast bulk-heterojunction solar cells based on a tert-butyl substituted methanofullerene acceptor, Seri M., Rossi E., Carofiglio T., Antonello S., Ruani G., Maggini M., and Muccini M., *J. Mater. Chem.*, 2011,21, 18308-18316



## Module und Gebäudeintegration

---

B. Strahm, M. Despeisse	123
<b>Swiss Inno HJT: Pilot Production and Demonstration of Innovative High Performance Silicon Heterojunction PV Cells, Modules and Systems</b> - SI/500966 – SI/500966-01	
S. Buecheler, P. Reinhard, A.N. Tiwari, D. Ehrensperger, M.R. Kälin	129
<b>CIGS Multi-Stage In-line Pilot Machine Demonstration</b> – SI/500694 / SI/500694-01	
G. Friesen, M. Pravettoni, A. Virtuani, S. Dittmann	140
<b>Optimization of Thin Film Module Testing and PV Module Energy Rating at SUPSI</b> - SI/500691 / SI/500691-01	
G. Corbellini	148
<b>PERFORMANCE PLUS - Tools for Enhanced Photovoltaic System Performance</b> – PERFORMANCE PLUS / 308991	
F. Frontini	152
<b>CONSTRUCT PV - Constructing Buildings with Customizable Size PV Modules Integrated in the Opaque Part of the Building Skin</b> – CONSTRUCT-PV / 295981	
A. Kunzmann, A. Devaux, L. Sägesser, D. Brühwiler, P. Belser, P. Cao, G. Calzaferri	158
<b>Gewinnung elektrischer Energie aus Tönungen für Fensterscheiben und Fassadenelemente</b> – SI/500995 / SI/500995-01	
J.-F. Affolter, Ph. Morey	165
<b>Caractérisation des modules photovoltaïques à colorant de l'entreprise g2e</b> - SI/500794 / SI500794-01	
E. Langenskiöld, M. Stoll	171
<b>Photovoltaik im Verbund mit Dämmstoff Foamglas</b> - SI/500582 / SI/500582-01	
A. Baggenstos	178
<b>Potentialevaluation der Kombination Solar und Wärmepumpe und Betriebsoptimierung mittels Monitoring einer Grossanlage solar regenerierter Erdsondenfelder</b> - SI/501010 – SI/501010-01	
A. Baggenstos, M. Rommel	184
<b>Produktentwicklung PV/T Kollektor mit Installationssystem</b> – KTI12606.2	





## SWISS INNO HJT

# PILOT PRODUCTION AND DEMONSTRATION OF INNOVATIVE HIGH PERFORMANCE SILICON HETEROJUNCTION PV CELLS, MODULES AND SYSTEMS

## Annual Report 2014

Author and Co-Authors	<sup>1</sup> Benjamin Strahm, <sup>2</sup> Matthieu Despeisse
Institution / Company	<sup>1</sup> Meyer Burger Research AG, <sup>2</sup> CSEM SA
Address	Innoparc, Rouges-Terres 61, 2068 Hauterive (NE)
Telephone, E-mail, Homepage	032 566 15 20, <a href="mailto:benjamin.strahm@meyerburger.com">benjamin.strahm@meyerburger.com</a> , <a href="http://www.meyerburger.com">www.meyerburger.com</a>
Project- / Contract Number	SI/500966 / SI/500966-01
Duration of the Project (from – to)	01/10/2013 to 30/09/2016
Date	19/11/2014

### ABSTRACT

The goal of the *Swiss Inno HJT* project is the demonstration at the pilot scale of the performance and manufacturability of silicon solar cells, module and systems based on the silicon heterojunction technology. The project started in October 2013 and the first phase of the project consisting in setting-up a pilot line for silicon solar cell manufacturing has been achieved successfully. New infrastructures consisting in a 750 m<sup>2</sup> cleanroom with all the necessary media for solar cell processing has been built in Hauterive (NE) at Meyer Burger Research AG. Small R&D as well as mass production sized reactors have been moved in and installed successfully and are ready for operation. Additionally, a pilot metallization line using galvanic deposition method has been ordered and will be installed at CSEM, Neuchâtel, in the coming months.

In parallel to these installations, advanced manufacturing processes have been further developed at the R&D scale by CSEM and Meyer Burger in order to increase the solar cells and module performance at a reduced cost. A solar cell efficiency of 23.1% has been demonstrated on commercial monocrystalline silicon wafers (239 cm<sup>2</sup>) using a busbar less silver screen printed front metallization. This new metallization design enables to decrease dramatically the silver consumption and reduce by 80% the metallization costs compared to standard metallization design. To further reduce the metallization costs and increase the solar cell efficiency, CSEM has developed a low cost approach to manufacture a silver free metallization using copper electroplating. Metallization line width as narrow as 12 µm has been achieved boosting by 1% the photo-generated current. Finally, busbar less cells have been integrated in 60 cells module using the Smart Wire interconnection technology. Recent developments of the interconnection scheme resulted in a significant output power gain that achieved 327 W under AM1.5 illumination. Outdoor testing of these type of modules resulted in a +12% kWh generation per m<sup>2</sup> when compared to best in class commercially available n type crystalline solar modules and more than 50% when compared to CIGS modules.

## Goal of the project

The goal of the *Swiss Inno-HJT* project is to demonstrate the superiority of photovoltaic systems based on the silicon heterojunction technology. This fully integrated R&D project deals with all processing steps including the monocrystalline wafer sawing using diamond wire technology, high efficiency silicon heterojunction solar cell processing, advanced cell metallization to reduce silver consumption, advanced module integration using Smart Wire Technology and finally outdoor testing. Furthermore, all these steps are made with mass production relevant processes and tools to demonstrate the commercial viability of these technologies. This will support the world-wide dissemination of the silicon heterojunction technology using Swiss made equipments and technologies.

The project duration is 3 years. The first year (2014) is mostly dedicated to the set-up of the pilot production facilities and equipments for silicon heterojunction solar cells processing at Meyer Burger Research AG in Hauterive (NE). In parallel, R&D activities using laboratory equipments is conducted to enhance the solar cell performance (Meyer Burger Research AG), the metallization technology (CSEM SA) and the module technology (Meyer Burger AG).

## Brief description of the project

The project is a large fully integrated project (see Figure 1) combining all the latest technologies from the wafer sawing down to the module assembly. The monocrystalline silicon ingots are first sliced using diamond wire technology instead of the slurry based cutting. The use of diamond wires to cut silicon allows increasing considerably the cutting speed and therefore reducing the production costs. Moreover, this technique allows reducing the wafer thickness from the conventional 180  $\mu\text{m}$  down to less than 100  $\mu\text{m}$  in the future, making possible further savings in production costs. Impacts of sawing parameters as well as wafer thickness on the solar cell performance and are investigated in the *Swiss Inno-HJT project*. Both are optimized together in order to get the highest efficiency at the lowest production cost.

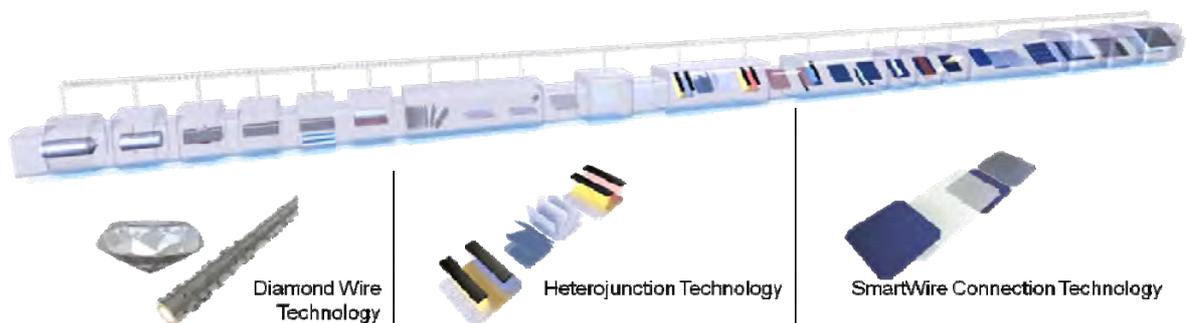


Figure 1: fully integrated silicon heterojunction process from wafer slicing, solar cell manufacturing and module assembly.

The silicon wafers are then transformed into a photovoltaic device using the heterojunction technology. The benefits of silicon heterojunction (Si-HJT) upon other technologies are numerous. First, the efficiency can be as high as 24% despite the very simple cell structure (see Figure 2) that requires

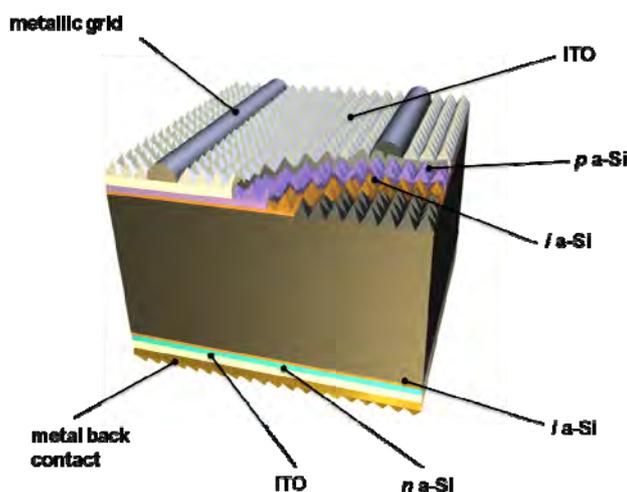


Figure 2: silicon heterojunction solar cell structure.

only 5 processing steps, all at low temperatures ( $< 250^\circ\text{C}$ ). The junction is formed by applying very thin ( $< 10\text{ nm}$ ) amorphous silicon layers on both side of the wafers using plasma deposition techniques as opposite to standard homojunction technologies that use diffusion process at very high temperatures ( $> 700^\circ\text{C}$ ). This results in a much lower temperature coefficient ( $- 0.20\%/K$ ) than for diffused solar cells ( $- 0.45\%/K$ ) enhancing considerably the generated  $\text{kWh}/W_p$  in real outdoor conditions where the module temperature ( $> 50^\circ\text{C}$ ) is much higher than in standard tests conditions ( $25^\circ\text{C}$ ).

Finally the solar cells are integrated into modules using the Smart Wire Connection Technology (SWCT). This technology is also offering multiple benefits. The most important one is the increased flexibility in solar cell metallization design allowing new approaches to reduce the silver consumption. First, the standard busbars are entirely removed and only fingers are applied onto the solar cells. The busbars are directly replaced by the cell interconnection that is made via wires that are directly contacting the fingers of the solar cells (see Fig. 3). Furthermore, the large quantity of interconnection wires ( $> 18$ ) when compared to the number of busbars of conventional technologies (3 to 5) allows to apply much narrower metal fingers without suffering from electrical series resistance losses. Overall, the silver consumption can be reduced by at least a factor of 5 by using SWCT. Another possibility is also to replace the silver screen printed fingers by very narrow ( $< 20 \mu\text{m}$ ) electro plated copper lines to further reduce the metallization costs. All these possibilities offered by the use of SWCT are investigated and improved within the *Swiss Inno-HJT* project. Special care is taken improve both the metallization and module design together to achieve the highest module performance at the lowest production cost.



Figure 3: solar cell interconnection using SmartWire Connection Technology.

In the frame of the *Swiss Inno-HJT* project, 3 generations of cells and modules will be developed. Starting from current technology and integrating progressively new developments such as bifacial cells and electroplated metallization. These modules will be then produced in small series in a pilot production line that will be installed at Meyer Burger Research AG, Huterive (NE), during the first year of the project. These modules will be finally installed outdoor. The kWh generated per  $\text{m}^2$  will be monitored and benchmarked against other technologies.

## Conducted work and achievements

The set-up of infrastructure and the installation of the pilot production equipments have been realized in time during the first year of the project. A  $750 \text{ m}^2$  class 100'000 clean room has been built in Huterive (NE) with all the required media (Di water, process gases, extraction cooling water etc.) for the production of Si-HJT solar cells. Mass production sized reactors have been installed to increase the nominal production capacity to about  $600 \text{ kW}_p$  per year. In particular, a large sputtering tool has been installed to deposit the transparent conductive oxide layers in real mass production conditions (see Figure 4) with rotary sputter magnetrons.



Figure 4: loading of a large sputtering system to deposit the TCO layers.

In parallel to the installation of the pilot line, R&D activities have been carried out in small laboratory scaled equipments. In particular, the inter-relations between the different sections of the production of Si-HJT systems have been studied:

- the silicon sawing parameters using diamond wire high speed cutting and solar cell manufacturing;
- the combination of advanced metallization and module interconnection designs;

Figure 5 shows the impact of the use of diamond wire cutting instead of the conventional slurry cutting. The wafer surface (Figure 5 right) observed by SEM shows that the use of diamond wire (top) changes considerably the morphology of the surface compared to slurry cut surface (bottom). This impact positively the depth of the damages and therefore the chemical removal of the damages can be reduced from more than 10  $\mu\text{m}$  of silicon removal per side down to 5  $\mu\text{m}$  as shown on the left side of Figure 5. Moreover, with optimized diamond wire cutting process, the achievable surface passivation by amorphous silicon is increased and this despite the lower amount of removed silicon. This result demonstrates that the combination of optimized cutting process and solar cell process is leading to higher performance at lower processing costs.

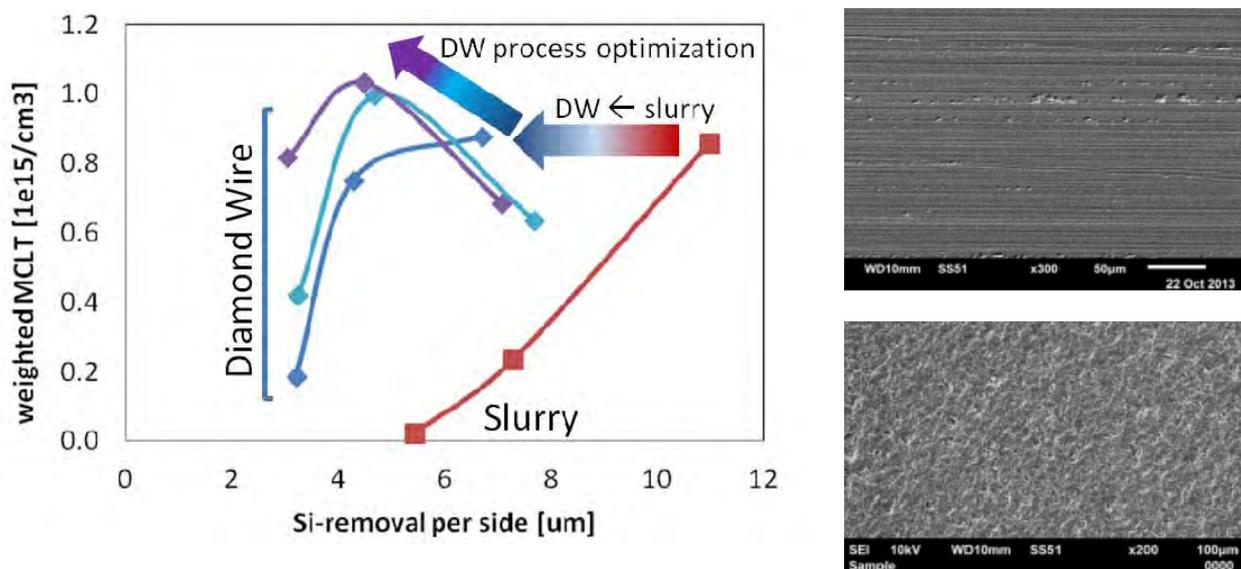


Figure 5: impact of sawing technology and parameters on wafer surface damages.

Using this combination, screen printed solar cells has been manufactured on 156 mm pseudo square (239  $\text{cm}^2$ ) commercial CZ wafers using a busbar-less front grid design. The resulting efficiency has been demonstrated to be as high as 23.1%<sup>GT</sup> (see Figure 6) with impressively high open circuit voltage (736.7 mV) and fill factor (81.3%). This result has been achieved using a busbar less design and has required the development of a new contacting system to be able to measure precisely the IV characteristics of such cells. The Grid<sup>TOUCH</sup> contacting unit developed by PASAN SA is the first product that has been partially developed within the framework of the Swiss Inno-HJT project. Further work will be done to develop a Grid<sup>TOUCH</sup> unit to contact bifacial busbar less cells.

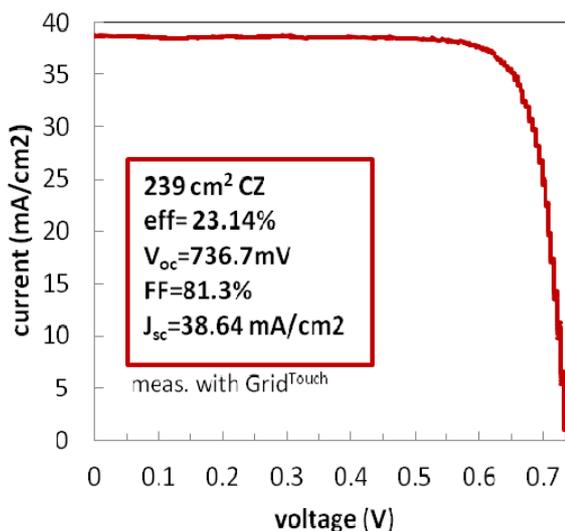


Figure 6: IV curve and parameters of record Si-HJT cell with a screen printed busbar less front grid measured with the Grid<sup>TOUCH</sup> contacting.

Further development in metallization opens the road to even higher efficiencies. Indeed, the use of SmartWire Contacting technology enables to push the screen printing to its limits by reducing the printed line width below 40  $\mu\text{m}$  as shown in Figure 7. This extremely narrow lines demonstrated by CSEM combined with the absence of busbar reduce the silver paste consumption to below 40 mg per wafer ( $239\text{ cm}^2$ ) side that is 80% less than with a 5 busbar design. This dramatic reduction in silver consumption reduces the overall cell processing costs to 0.11 CHF/W<sub>p</sub>. Further development of the screen printed method is expecting to bring the silver consumption below 20 mg per solar cell. However, the screen printing methods will not deliver line width far below the 40  $\mu\text{m}$  achieved in this project. This means that to reduce further the front side metallization shadowing another method has to be used. Electroplating using negative masking is one of the preferred candidates since the deposited material (copper) is cheap and highly conductive and that the line width is only limited by the used masking method. Figure 8 shows a cross-section view of a 30  $\mu\text{m}$  electroplated copper line on top of a Si-HJT solar cell. This resulted in a 1.3% relative gain in photo-generated current without observing any fill factor (FF) or open circuit voltage ( $V_{oc}$ ) losses demonstrating the usability of such kind of advanced metallization process for Si-HJT technology. Further work will be conducted at the pilot scale at CSEM to establish a low cost process flow for the application of electro plated copper lines compatible with mass production.

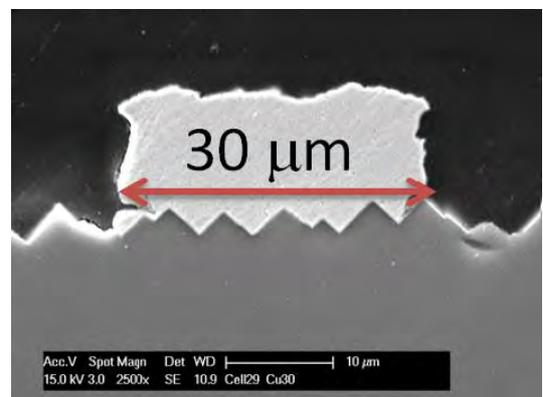
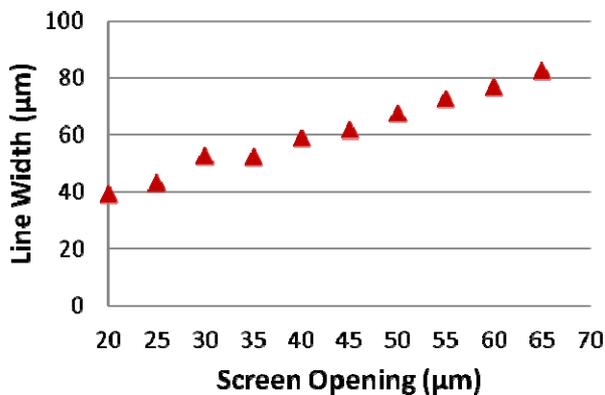


Figure 7: silver screen printed line width as a function of screen opening.

Figure 8: 30  $\mu\text{m}$  width electroplated copper line on a Si-HJT solar cell.

The first 60 cells modules have been manufactured and a power output of 307 W has been certified by SUPSI. These modules have been installed for outdoor monitoring to evaluate the data acquisition system and have first data of energy yield. After one month (October 2014) of acquisition, first data can be exploited and show (Figure 9) already the superiority of the developed Si-HJT modules. Indeed, the installed modules have generated 12% more kWh/m<sup>2</sup> than commercially available module based on N type monocrystalline diffused technology. When compared to CIGS thin film technology, the benefits reach even 54%! Moreover, the temperature coefficient of -0.2%/K on the power output has been confirmed from the outdoor data (not shown here).



Figure 9: energy yield of different module types as monitored over October 2014 in Neuchâtel.

## National collaborations

The *Swiss Inno-HJT* project is based on a large consortium of competence centers. The Meyer Burger group is participating actively in R&D as well as production activities within the project. Meyer Burger AG (Thun) is working in the field of high speed crystal cutting using diamond wire technology as well as in module assembly by using the newly developed SmartWire Contacting Technology. Si-HJT solar cells are developed and produced by Meyer Burger Research (Hauterive, NE) and the efficiency measurement methods for cells and modules are achieved by PASAN SA (Neuchâtel). CSEM (Neuchâtel) is also active in the solar cell process by implementing at the pilot scale the electro plating of copper to replace the screen printed silver. CSEM is also in charge of the outdoor installation and monitoring of the produced modules within the project.

## 2014 evaluation and perspectives for 2015

During 2014, many tasks have been accomplished. R&D activities in small laboratory equipments have been conducted successfully at CSEM as well as at Meyer Burger to demonstrate the feasibility of the production of Si-HJT solar cells with efficiencies above 23% using low cost approach for the metallization. Screen printing has been pushed close to its limit by reducing by 80% the silver consumption. On the other hand, the replacement of silver by inexpensive electro plated copper has shown its potential with a relative efficiency increase of more than 1%. First modules have been assembled and tested in outdoor conditions. These have shown a 12% higher kWh/m<sup>2</sup> production when compared to commercial available high efficiency n type monocrystalline modules.

Beside the R&D activities, the construction of new facilities and the installation of pilot production line for Si-HJT solar cells have been achieved within the planned schedule. This done, it will allow a much higher R&D capacity for 2015 and beyond. This increased capacity will be used to develop further the cell efficiency and reduce the production costs at all steps. Special care will be taken to understand and optimize the interfaces between all steps of the fully integrated production of PV systems from the crystal sawing to the outdoor installation in order to get the highest kWh/m<sup>2</sup> production at the lowest cost. This will be demonstrated by the outdoor installation and monitoring of larger amount of modules based on Gen 1 (monofacial) and Gen 2 (bifacial) cells.



# CIGS MULTISTAGE IN-LINE PILOT MACHINE DEMONSTRATION

## Annual Report 2014

Author and Co-Authors	Stephan Buecheler <sup>1</sup> , Patrick Reinhard <sup>1</sup> , Ayodhya N. Tiwari <sup>1</sup> , Damian Ehrensperger <sup>2</sup> , Marc R. Kälin <sup>2</sup>
Institution / Company	<sup>1</sup> Empa, Laboratory for Thin Films and Photovoltaics <sup>2</sup> Flisom AG
Address	Überlandstr. 129, 8600 Dübendorf
Telephone, E-mail, Homepage	044 823 6107, <a href="mailto:stephan.buecheler@empa.ch">stephan.buecheler@empa.ch</a> , <a href="http://www.empa.ch">www.empa.ch</a>
Project- / Contract Number	SI/500694 / SI/500694-01
Duration of the Project (from – to)	01.01.2012 – 30.06.2014
Date	30.09.2014

### ABSTRACT

In the Laboratory for Thin Films and Photovoltaics at Empa a novel process for fabrication of highly efficient CIGS solar cells on plastic films was developed by using innovative concepts. Light-weight and flexible solar cells with efficiency above 20% were fabricated on laboratory scale. On the way contributing to a renewable energy supply it is essential to demonstrate the feasibility of transferring this still static process to industrial relevant deposition equipment.

The goal of this P&D project was to demonstrate a roll-to-roll (R2R) CIGS deposition system where the innovative multi-stage co-evaporation process developed in the Laboratory for Thin Films and Photovoltaics at Empa for small area substrates can be scaled up for coating on in-line moving large area substrates. Demonstration of such a pilot scale deposition system plays a pivotal role in industrialization of CIGS deposition technology for affordable, high efficiency solar cells and modules in future.

## Initial position

CIGS is recognized as an important thin film PV technology for cost effective manufacturing because of high efficiency potentials shown by the solar cells developed in the research laboratory at Empa and the possibility to benefit from roll-to-roll (R2R) processing. However, there is a lack of R2R CIGS production equipment supplies with proven process for high efficiency solar cell manufacturing on industrial scale.

There is no company providing CIGS evaporation systems with a process of multi-stage evaporation known to provide high efficiency devices. This is severely hindering the growth of CIGS PV industries since new companies with interest in CIGS production do not have possibilities of acquiring such systems. The proposed demonstration system would prove the industrial capability of the process and help in industrialisation of the technology and strengthen the position of Switzerland internationally in the field of photovoltaics.

## Goal of the project

The goal of the pilot project is to develop and demonstrate a R2R CIGS deposition system in which the innovative processes developed in the laboratory for very high solar cell efficiencies (above 20%) can be scaled up towards industrial applications. Demonstration of such a system plays a pivotal role in industrialisation of highly efficient PV technology for large volume production.

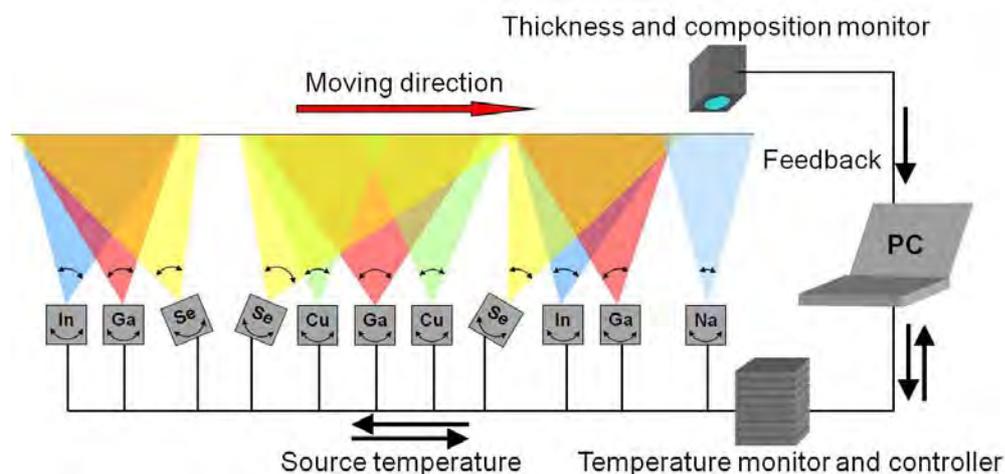
**The overall objectives of the pilot project are therefore:**

- to develop an in-line R2R vacuum deposition system for the demonstration that the multi-stage CIGS co-evaporation technology can be scaled up for large size moving substrates
- to demonstrate a pilot level deposition system proof of concept based on a proprietary design and process know-how
- to attract industries as potential end users for subsequent scale-up for production

## Procedure

Innovative multi-stage evaporation processes for the CIGS absorber layer were developed at Empa for obtaining an optimum chemical composition grading which proved to be highly reliable and reproducible and therefore suitable for industrial scale up. The developed processes are, however, stationary, i.e. the substrate is not moving relative to the evaporation sources. In this P&D project Empa wants to demonstrate that the multistage co-evaporation process can be transferred to industrially relevant in-line equipment.

Key issue of the development of the demonstration machine is the design of appropriate vacuum deposition system with evaporation sources having appropriate sequences and vapor flux profiles which allow the same composition grading of the CIGS for a moving substrate. A schematic of such source sequence is shown in Figure 1.



*Figure 1: Simplified schematic of the pilot system for multistage evaporation of CIGS based on the Empa process which yields world record efficiencies flexible solar cells on polymer and metal foils. The processes are applicable also for high efficiency cells on glass.*



what we estimated initially at the planning stage of the proposal. The difficulty was that equipment manufacturers have not made this type of equipment and some of the manufacturers have very close link with other CIGS companies.

For the purpose of the BFE supported project, "CIGS multi-stage in-line pilot machine demonstration", Empa, Laboratory for Thin Films and Photovoltaics has requested Flisom AG Company to provide financial support and high level of technical guidance for delivering and installing a roll-to-roll (R2R) tool for continuous inline coating of CIGS layers on flexible substrates. The aim of the project was the transfer of high efficiency deposition processes from static to a dynamic coating process.

Flisom is one of the few companies worldwide that has developed and is continuously running a roll-to-roll tool for flexible polyimide substrates. It gained valuable experience in roll-to-roll substrate handling at high temperatures as necessary for CIGS deposition. Flisom has also developed proprietary linear evaporation sources for evaporation of constituent elements (Cu, In, Ga, Se) and NaF compound in a cost-efficient way.

Flisom has developed various IP on hardware components, process control and tool design and is providing this know how to this project under certain conditions in order to allow the project to be carried out within the available restricted budget, short time frame and highest possibility of success.

### Design of the roll-to-roll CIGS deposition equipment

Within a pre-study of various possible chamber geometries, the rectangular shape showed most advantages as the long, preferably horizontal, deposition zone could best be accommodated. Several of the side plates can be considered as modular to allow testing of various concepts within the same frame. Figure 3 shows the schematic design with a large modular side and bottom plate. The side plate is used to fix the winding and substrate heating hardware, whereas the bottom plate mainly contains the evaporation sources and controls.



Figure 3: Preliminary concept (left) and final chamber design (right)

The suitability of the vacuum chamber for the specified base and working pressures was confirmed by an external engineering company in the first instance. For further optimization Flisom used a construction and simulation software to simulate the stiffness and torsion of the vacuum chamber by finite element analysis.

The detailed drawings with optimized stiffness were released to the manufacture of the vacuum chamber after evaluation of three different vacuum chamber manufacturers in Europe. After pre-acceptance test at manufacturer's site the vacuum chamber was delivered.

The chamber layout separates winding/outgassing and coating zones with functionalities as described in Table 1.

Outgassing of incorporated water and gases in the large amount of polyimide material in the vacuum chamber is a crucial step to allow good deposition conditions. The system allows outgassing and layer deposition at the same time by providing sufficient pumping capacity and gas separation between the process chamber and the winding units.

Table 1: Processing units within the vacuum chamber

Unwinding/Preheating Unit	CIGS coating Unit	Rewinding Unit
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Unwinder</li> <li>• Independent heating zones</li> <li>• Web tension controller</li> <li>• Web spreading</li> <li>• Cryo pumping</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Webguiding</li> <li>• Independent heating zones</li> <li>• Multiple evaporation sources</li> <li>• Selenium overpressure</li> <li>• Insitu composition monitoring</li> <li>• Condensation protected pumping</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rewinder</li> <li>• Independent heating zones</li> <li>• Selenium degassing</li> <li>• Web position and tension controller</li> </ul>

A special focus is set on integrating maximum process and tool diagnostics. Due to the flexible and modular concept it is easily possible to do upgrades or amendments:

- By placing additional flange for later buffer layer coatings that can be directly integrated without breaking the vacuum process.
- Adjustable number of heater circuits and position
- Fully adjustable crucible type, number, position
- Additional flanges for feedthroughs for supplies, measurements etc.

The uniqueness of this pre-industrial pilot machine is the high level of degrees of freedom in the evaporation geometry which will allow the transfer of the sophisticated multistage co-evaporation process developed at Empa.

In order to allow high degree of freedom for the pre-industrial coating equipment a fully modular concept was adapted. The vacuum chamber is equipped with large number of spare flanges with only three flange sizes to ensure reuse of component on different locations of the machine. The evaporation sources are installed to facilitate simple and quick readjustment of evaporation sequences and profiles.

### Lab space preparation

Due to the large dimensions of the R2R coater new lab space was required. Therefore, a storage room had to be converted into a laboratory space. A clean room has been installed in order to guarantee the required working environment. Figure 4 shows the 3D simulation of the clean room facility. Separate cooling water supply for the cooling the machine is installed. A mechanical crane is included into the room concept. Different crane concepts were evaluated and the most appropriate one was selected. Foundation for the deposition machine enforced and track lines are installed in the floor for moving the door of the deposition machine.

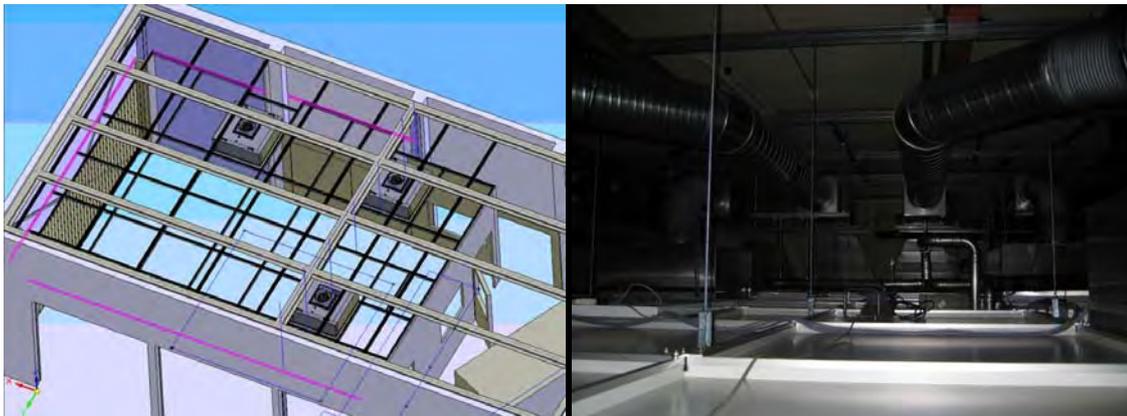


Figure 4: Plan of the clean room facility for the CIGS pilot machine (left) and installed ventilation and cooling water system on top of the roof of the clean room facility (right).

## Chamber assembly and components installation

After reception and placement of the chamber, the assembly work of the components and preassembled tools was started.

The two stage pumping system is defined with pre-vacuum pump, external exhaust filter system and turbo pumps which is equipped to the vacuum chamber. In order to reach the required pressure in the deposition chamber dedicated processing zones were separated from each other so that outgassing processes and coating processes can happen simultaneously.

Process monitoring is required in order to guarantee a reliable and reproducible process. Therefore, X-ray fluorescence (XRF) is used to measure chemical composition and thickness of the coatings.

## Control System

The control system architecture has been specified based on Beckhoff hardware. The PLC, Motors and drives have been assembled and mounted to the chamber outside the vacuum. The electrical cabinets were specified and ordered from a local supplier. Figure 5 shows arrangement of the electrical components in the cabinet. The order was placed after four different manufacturers for the electrical cabinet were evaluated.

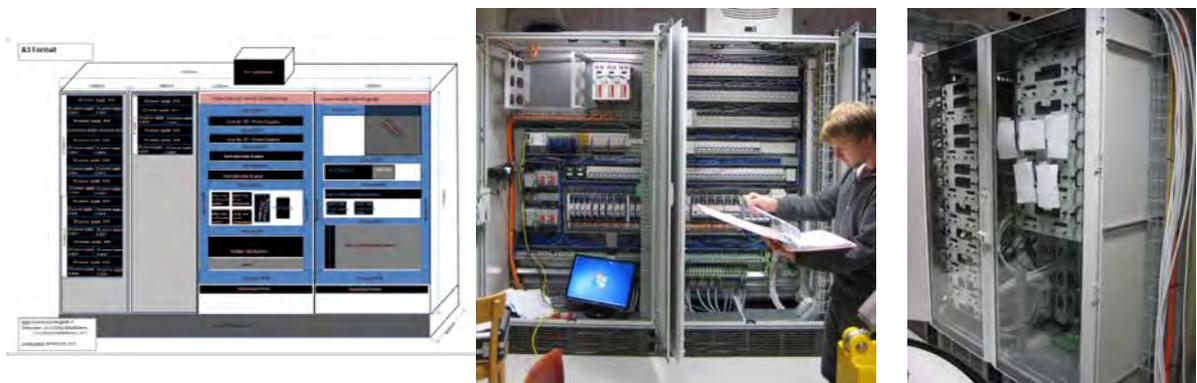


Figure 5: left: Schematic of the arrangement of the components in the electrical cabinets; middle: photograph of the installed cabinet containing the control units for winding and substrate heating; right: cabinet containing the power supplies and control units for the evaporation sources

The software to control the process has been provided. Nevertheless the automatic evaluation of the process diagnostics still has to be implemented and tested in conjunction with the establishment of the baseline process.

## Functional tests

After assembly of the chamber and leak elimination, several tests had to be conducted before doing first coating experiments:

- I/O tests for all electrical components
- Vacuum pump down tests (leak testing with helium, leak rate evaluation)
- Winding tests (webguiding, telescoping)

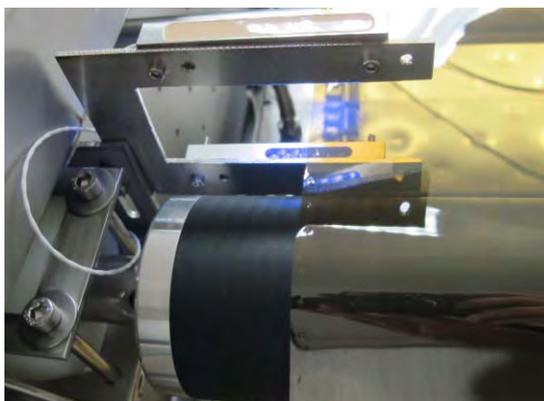


Figure 6: Band edge detection with optical sensors are required to control the web guiding system in the unwinding and rewinding area to prevent that telescoped rolls will cause coating issues in the deposition zone.

Keeping the web flat and in minimal stress conditions is the key task of the winding system in this application (Figure 6).

A challenge is to allow natural expansion and contraction of the polymer substrate during heating and cooling without creation of wrinkles or creases during the coating process. Spreading functions of the web and active repositioning of the coils have been implemented to control the web winding throughout the process path in the chamber.

- Substrate heating tests with running web

The CIGS deposition process involves substrate temperatures up to 500°C. As massive heat radiation is also emitted from evaporation sources, good control of the temperature with fine granularity over the web surface is required.

- Single source evaporation experiments



Figure 7: rewinding zone with copper coated web after a copper deposition test.

Before coating various elements simultaneously, basic checks with single evaporators were conducted. The picture above is showing copper coated substrate foil in the rewinding section of the chamber. Temperature measurements at various locations in the chamber were made to test the correct working of the cooling circuits. Figure 7 shows a copper coated polyimide web after single element experiment of the Cu sources.

- Data logging and safety procedures

A sophisticated server infrastructure with data logging function has been established and implemented. Automatic logging of data and powerful data display functions are very helpful in long term process development.

## Coatings

After reaching a satisfactory state of all the tested elements, coating experiments with selenium vapor were started.

From the beginning onwards it is important to evaluate the maintenance possibilities of the system. Long evaporation cycles will require cleaning of the exposed shielding areas after each run. Therefore ergonomic mounting and dismounting of the components will have a major impact on the output of a production system. Especially the deposition zone has been designed for easy maintenance by hand

mountable and replaceable shielding. They consist of thin replaceable metal foils that can be easily mounted and replaced.

Further, the profiles of the evaporators have to be checked and calibrated for layer homogeneity across the web width. Using ex situ XRF, the coated layers were analyzed.

As process development has only started recently, optimization of the coating profiles is still ongoing. Nevertheless reasonable starting homogeneities could be achieved after a few initial source reconfigurations.

As a multistage inline coating tool requires a large substate area in the process zone, a major concern at the beginning of the project was to assure a good web quality of the coated areas. Significant amount of time has been spent to design the right winding and webtransport system that can handle the large temperature differences in the heating and cooling zones as well as to make sure, all the used components can support the required process temperatures. After assembly and initial testing of the winding system, the real tests had to be done with all the evaporators running and coating at deposition speed. The optimization phase resulted in very important learnings and finally a system that has yielded very good web quality at the desired coating speed. The next steps will be to finalize the baseline process development and generate solar modules from the coated layers to verify any influence of the winding system on the electronic parameters and further fine-tuning of the mechanical setup.

### **Development of CIGS multistage co-evaporation process and process transfer**

In parallel to the design and ramp-up of the roll-to-roll CIGS deposition equipment, Empa is further developing its multistage co-evaporation process in a stationary deposition chamber. The main goal is the identification of critical process parameter and a better understanding of the process window of CIGS growth for high efficiency solar cells, in order to facilitate the transfer from the stationary lab-scale CIGS deposition process onto the inline coating tool. Additionally, innovative process steps are developed in order to push the record efficiency of the CIGS technology even further.

This resulted in additional input and required modifications to the equipment specifications.

Due to the high flexibility of the initial design of the R2R deposition equipment most of the additional required specifications discovered during this parallel process development were already realized during construction and assembly phase of the machine.

#### Process reproducibility – average composition

The stationary multi-stage co-evaporation process was developed in order to carefully control the nanoscale compositional grading that forms during growth. It was found that this process is highly reproducible and can yield solar cells with high open circuit voltage ( $V_{oc}$ ) of about 700 mV for at least 20 consecutive depositions. Moreover, it was found that the average Ga content of the layer (which determines the average band gap of the material) and the final Cu content can be varied to some extent without severe detrimental effects on the final cell efficiency.

#### Ga grading

The shape of the Ga grading is key for high efficiency solar cells. Typically, a double-Ga grading is naturally formed during growth, with a higher Ga content at the front and at the back of the layer, and with a lower Ga content region (notch) in the middle. It was shown that a too pronounced notch leads to enhanced recombination in the solar cell and the multi-stage co-evaporation was developed in order to allow control over the notch shape and position. There is still no consensus in the research community about an optimum shape of the Ga grading, but we could show that there exist several different shapes and widths of the notch that are not detrimental to the cell efficiency.

#### Se pressure

The growth of the CIGS layers is based on the co-evaporation of the metals (Cu, In, Ga) along with a high Se overpressure to ensure good material quality. Control of the optimal Se flux is important in order to ensure highest efficiency. However, it remains challenging to precisely measure and control the Se flux. Several experiments were made with a new Se source setup that allows monitoring the relative amount of evaporated Se, and a better control of the Se overpressure.

### Deposition rate and absorber thickness

From an industrial production perspective, high production throughput is required. Higher deposition rate and reduced absorber thickness are two aspects that can be pursued in order to reduce the overall deposition time and material cost in a roll-to-roll deposition chamber. However, they usually come along with a reduction in the cell efficiency due either to a lower material quality of the layers grown at higher rate or to insufficient light absorption in thinner absorbers.

Empa was able to reduce the absorber thickness from the standard thickness of 2-3  $\mu\text{m}$  for highest efficiency devices to about 1  $\mu\text{m}$ . Efficiency above 16 % was obtained with a 1.2  $\mu\text{m}$  absorber thickness, by adapting the low-temperature multistage process for absorbers with such a thickness.

### Alkali post-deposition treatment

Alkali doping of the CIGS layers is required in all high efficiency devices. Na has long been known to be beneficial, either diffusing from the soda-lime glass substrate during growth at high temperature, or added extrinsically after growth for CIGS layers grown at low temperature. Empa has developed a NaF post-deposition treatment, where NaF is evaporated onto the heated CIGS layer at the end of the multistage deposition process. Recently, Empa has also developed and introduced an additional post-deposition treatment with KF, which led to a new world record efficiency of 20.4% on flexible substrate. The addition of KF greatly modifies the surface of the CIGS layer and allows the formation of better junction with the buffer layer and to reduce optical losses by reducing its thickness. The implementation of the KF PDT by other research groups and companies in the world has led to a wave of new record efficiency announcements for the CIGS technology, bringing it now to the current 21.7% efficiency level. This new process step does not need major changes in the planning of the inline deposition chamber, as it only necessitates an additional source in a similar manner as already planned for NaF.

### Module

Based on the knowledge described above, mini-modules were processed to show homogeneity and scale-up potential of the technology developed at Empa. After process optimization, a 16.9% efficiency mini-module was obtained, which represents the world record efficiency for a flexible mini-module.

### Process transfer

The novel processes (KF-PDT) and process parameters (compositional grading, Se flux) discovered in this parallel study were directly implemented in the ongoing design of the R2R deposition system. Furthermore, all necessary baseline data were acquired for highly efficient CIGS solar cells including compositional depth profiles, thicknesses and compositional & thickness tolerances as reference for the in-situ XRF measurements and ex-situ materials and device characterization in order to allow a fast process transfer on the R2R tool.

## **Discussion and appraisal of the results**

We encountered severe challenges related to the non-availability of suitable vendors to construct a customized R2R pilot system to our specifications within the approved budget and the desired timeframe. The response of companies indicated difficulties for reliable and economical procurement of some crucial components needed for the customized development of the pilot system. Long delivery time of the equipment by some companies was another problem. Therefore, we reconsidered the execution plan of the project and more involvement of the project partner company Flisom in terms of their contribution. It was decided to acquire the system from Flisom since the company has already demonstrated a system for CIGS coating on rolls albeit with lower efficiency than we want to achieve.

This jointly developed equipment by Empa and Flisom under a close collaboration, furthermore allowed proper protection of the proprietary knowledge of Empa and Flisom and provide a competitive edge over other partnerships of competitors in other countries.

The targeted timing of the project proved to be very ambitious and not realistic within in the limited resources available but at the end of the project the assembly of the R2R CIGS deposition equipment was finalized. The following table summarizes the status of the tasks in the different project phases (refer to Gantt chart in Figure 2):

Design phase I (2 months):

Task	Status compared to original planning /Remark
overall and detailed concept is elaborated	achieved
mechanical details are defined	achieved
plans of the vacuum chamber ready	achieved with delay
electrical supplies are finalized	achieved
orders for core components are placed	achieved

Design phase II (3 months):

Task	Status/Remark
Construction of vacuum chamber	achieved with delay
component designs are finalized and ordered	achieved with delay
electrical racks are prepared	achieved
programming of the system is started	achieved

Construction and Assembly phase (4 months):

Task	Status/Remark
Chamber and components are assembled and connected to the control system	achieved with delay
Various testing procedures and debugging is started	achieved with delay
First layers will be coated and evaluated	achieved with delay

Debugging and ramp up phase (4 months):

Task	Status/Remark
Debugging winding system	achieved with delay, longtime learning in progress
Debugging substrate heaters	achieved with delay
Debugging evaporation sources	achieved with delay, continuous improvements ongoing
Metal and CIGS coating runs	Achieved with delay

#### Joint testing and observation phase (6 months):

Task	Status/Remark
Process development runs	started
Reproducibility of process parameters	Observation ongoing
Implementation of automated feedback loops	To be started after XRF calibration and

Currently Flisom has finished the debugging and ramp up phase and is in the joint testing and observation phase (although long term learnings and debugging is still ongoing) where the CIGS specialists are implementing baseline processes and conduct material analysis of the coated substrate and layers. In the beginning of June the pre-acceptance tests was achieved. Fine tuning and feedback loop implementation is ongoing.

### **International cooperation**

Part of the presented work is co-financed by a FP7 project "R2R-CIGS". The European consortium consists of 4 research institutes (TNO, Netherlands; Empa, Switzerland; ZSW, Germany; CPI, UK) and 6 companies (Manz CIGS GmbH, Germany; Flisom, Switzerland; Isovoltaic, Austria; Beneq, Finland; Solaytec, Netherlands; Mondragon Assembly; Spain).

### **Conclusion and next steps after closure of the project**

The CIGS multistage in-line pilot machine was successfully developed within the project despite the big difficulties encountered in the first year (2012) to identify suitable equipment suppliers and the huge technical challenges in equipment design and construction. Also important reference data of highly efficient CIGS solar cells for in-situ XRF monitoring and ex-situ depth profile measurements were collected within the project period.

At the end of the project the pilot machine is ready to demonstrate the transferability of the multistage low-temperature CIGS deposition process from small scale, static laboratory equipment to medium scale, in-line equipment with industrial relevance.

After the closure of the project the partners Empa and Flisom will start with continuous operation and process transfer. In order to demonstrate final success of the process transfer the partners will continue to achieve the cell and module efficiency targets.



# OPTIMIZATION OF THIN FILM MODULE TESTING AND PV MODULE ENERGY RATING AT SUPSI

## Annual Report 2014

Author and Co-Authors	G. Friesen, M. Pravettoni, A. Virtuani, S. Dittmann
Institution / Company	ISAAC-DACD-SUPSI
Address	Via Trevano, CH-6952 Canobbio (TI)
Telephone, E-mail, Homepage	058 666 63 57, <a href="mailto:gabi.friesen@supsi.ch">gabi.friesen@supsi.ch</a>
Project- / Contract Number	SI/500691 / SI/500691-01
Duration of the Project (from – to)	01.10.2011 – 31.12.2014
Date	24.12.2014

### ABSTRACT

The project aimed to improve the measurement accuracy for thin film technologies through the definition of new test procedures and the upgrade of the test equipment. The focus was on the characterisation of multi-junction devices and the pre-conditioning of thin film modules, which needs to be improved to guarantee a higher comparability and repeatability of power measurements. The results, in combination with long term outdoor data monitoring and modelling activities, will be used to increase the understanding of the performance of thin film modules in comparison to the one of crystalline silicon technologies.

The following results have been achieved in 2014:

- improvements in equipment and spectral mismatch correction procedure decreased the uncertainty on  $P_{\max}$  of all single-junction thin film modules from  $\pm 3.4\%$  down to  $\pm 1.9\%$ .
- a new test procedure for the characterisation of multi-junction modules was implemented at SUPSI with a uncertainty close to the one of single-junction thin film modules.
- a new pre-conditioning approach for CIS and CdTe, consisting in dark current soaking, was investigated with the following outcome: a possible stabilisation at higher power levels cannot be excluded until now and further investigations has to be performed especially to better understand short-term effects in the range of milliseconds, seconds and minutes.
- a 4-year outdoor measurement campaign has been concluded successfully demonstrating differences in annual energy production of up to  $\pm 10\%$ .
- The introduction of a loss parameter model allowed us to distinguish between single contributions and to better understand the measured differences in outdoor performance.
- A new approach for the modelling of the Staebler-Wronsky effect in amorphous silicon and different climates was developed and validated for Lugano.

## Work carried out and results achieved in 2014

### Test procedures for the characterization of multi-junction modules

#### Spectral responsivity measurement system with LED bias lights

The activities on spectral responsivity were completed with the optimization of the previously validated prototype. The equipment developed in the first part of the project was modified and transferred on a Pasan IIIa solar simulator, which resulted in a better spatial uniformity for spectral responsivity measurements. The performance was further improved by introducing new filters with a lower bandwidth and the wavelength resolution was increased via extending the number of filters to 27 wavelength values, with respect to the 18 values available in the previous setup.

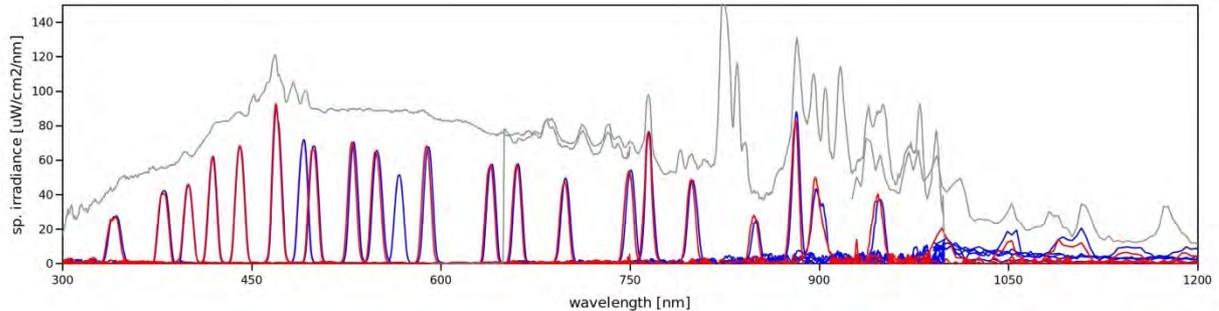


Fig. 1: Spectra of new spectral responsivity system (27 filters) compared to the Pasan IIIa spectrum.

The new configuration results in a lower uncertainty ( $k=2$ ) in spectral responsivity measurements, as shown in the following table as a function of wavelengths:

Wavelength [nm]	341	380	399	418	440	470	491	499	530	549	570	589	639	661	698	749	765	799
Pasan IIIb	-	5.5%	-	3.6%	3.2%	-	-	3.1%	-	2.9%	-	3.1%	-	3.0%	2.9%	3.9%	-	4.3%
Pasan IIIa	2.5%	2.4%	2.3%	2.2%	2.2%	2.2%	2.2%	2.2%	2.2%	2.2%	2.2%	2.2%	2.2%	2.2%	2.2%	2.2%	2.2%	2.2%
Wavelength [nm]	849	881	899	947	999	1049	1098	1145	1198									
Pasan IIIb	3.7%	-	3.4%	3.0%	3.2%	2.5%	2.6%	3.0%	6.3%									
Pasan IIIa	2.2%	2.1%	2.2%	2.2%	2.2%	2.3%	2.3%	2.6%	5.6%									

Table 1: Spectral response measurement uncertainty [ $k=2$ ] for each wavelength.

Furthermore, new LED floodlight bias lights have been purchased, thus fulfilling the need of any 2-junction (a-Si/a-Si, a-Si/ $\mu$ c-Si) and 3-junction (a-Si/a-Si/a-Si) large area module characterization. The following LED equipment is now available:

- set of 4 blue (470 nm) LEDs (3600 lm each), for top a-Si junctions;
- set of 4 red (630 nm) LEDs (4200 lm each), for middle a-Si in 3-junction modules and bottom a-Si in 2-junction modules;
- set of 4 NIR (870 nm) LEDs, for bottom  $\mu$ c-Si junctions.

#### Current-voltage (IV) characterization: new procedure for "spectro-metric" characterization

The same LED floodlight system was also used to upgrade the Pasan IIIb solar simulator for spectral tuning and to enhance its spectral match to AM1.5g. Based on this, a new test procedure for "spectro-metric" current-voltage characterization of multi-junction large-area modules was developed. The procedure can be summarized in the following steps:

- 1) Spectral responsivity measurement of the multi-junction testing module (on Pasan IIIa);
- 2) Calculation of the spectral mismatch MMF of each junction;
- 3) Determination of the current-limiting junction (on Pasan IIIb);
- 4) Selection of the most appropriate reference cell;
- 5) Current-voltage characterization on Pasan IIIb with the selected reference cell and with all available additional LEDs (spectral tuning);

- 6) Selection of the most appropriate Pasan IIIb + LED combination (best match to AM1.5g of the current-limiting junction);
- 7) Application of the spectral mismatch correction to the best matched  $I_{sc}$  and  $P_{max}$ ;
- 8) Calculation of the additional uncertainty on the fill factor and open-circuit voltage;
- 9) Report of STC corrected I-V curve and uncertainties on  $P_{max}$ ,  $I_{sc}$ ,  $V_{oc}$  and FF.

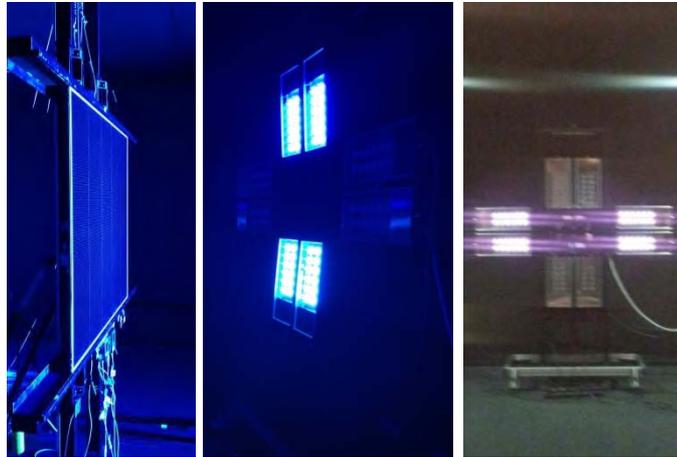


Fig. 2: Experimental set-up with bias light illumination.

Figure 3 shows an example of spectral tuning for spectrometric characterization. The measured electrical parameters ( $I_{sc}$ ,  $V_{oc}$ ,  $P_{max}$  and FF) are plotted as a function of the  $I_{sc}(top)/I_{sc}(top,AM1.5g)$  ratio, where  $I_{sc}(top)$  is the theoretically calculated photogenerated current of the top junction (the current-limiting junction in the example) and  $I_{sc}(top,AM1.5g)$  is the calculated photogenerated current from the top junction at AM1.5g.

The blue dots are measurement results; the blue dashed line is the linear interpolation; the dashed red line is the best match limit ( $I_{sc}(top) = I_{sc}(top,AM1.5g)$ ); the red cross shows the measurement result with spectral mismatch correction, but no spectral tuning; finally the red dots show the measurement results with spectral mismatch correction and spectral tuning, which is the final result to be reported.

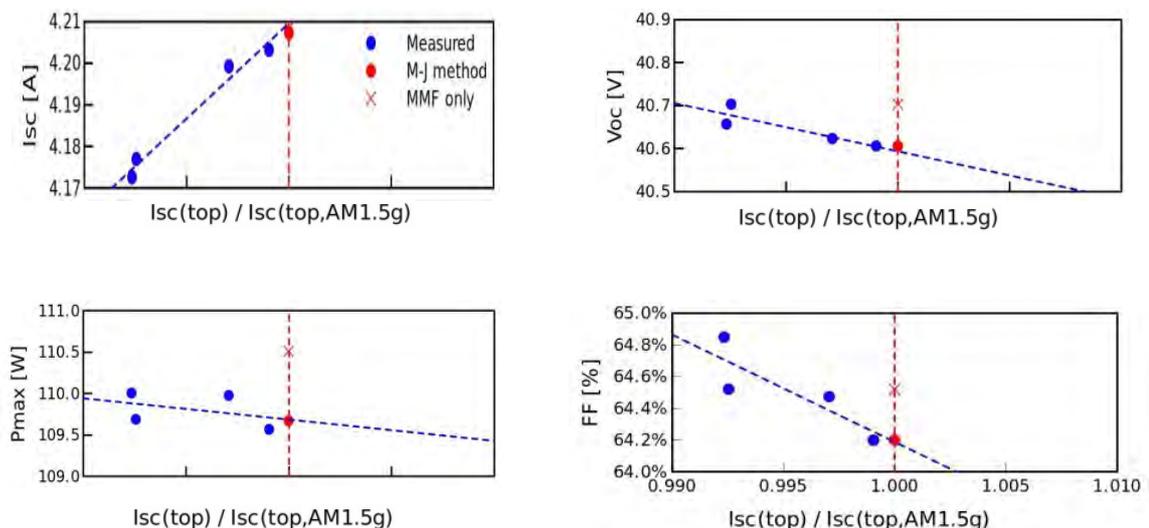


Fig. 3: Comparison of measured (in blue dots), spectral mismatch corrected (MMF only, red cross) and by spectral tuning (M-j method, red dots) obtained I-V parameters ( $I_{sc}$ ,  $V_{oc}$ ,  $P_{max}$  and FF).

## Uncertainty calculation for multi-junction current-voltage measurements

The current-voltage measurement of multi-junction modules has an additional uncertainty contribution to the FF and to  $V_{oc}$ , arising from the spectral mismatch, as shown in a previous paper (see M. Pravettoni et al., *Proc. 39th IEEE PVSC*, 2013). These contributions are not taken into account with the standard spectral mismatch correction procedure for single-junction devices and may be estimated as the standard uncertainty of the linear regression of FF and  $V_{oc}$  measurement data.

The additional contribution is computed for each testing module and is generally of order  $\pm 0.5\%$  (rectangular distribution) for FF and  $\pm 0.1\%$  (rectangular) for  $V_{oc}$ . These values are added to the uncertainty calculation of the electrical characterization of single-junction thin-film modules with spectral mismatch correction, to give a final  $k = 2$  uncertainty budget for the measurement of  $P_{max}$  of multi-junction modules at  $\pm 1.9\%$ . The final value for the uncertainty on  $P_{max}$  is well below the target value set on the project proposal ( $\pm 3-4\%$ ). This is also partly due to the improved uncertainty of data acquisition with the new Highlight data acquisition system developed by Pasan in collaboration with SUPSI (CTI project 9626.1), but majorly by the introduction of the spectral mismatch correction: in fact, within this project also the uncertainty on  $P_{max}$  of single-junction thin film modules have been improved from  $\pm 3.4\%$  down to  $\pm 1.86\%$ .

## Stabilization procedures for thin film modules

### Pre-conditioning procedures for CIS and CdTe modules

Polycrystalline thin-film modules such as CIS and CdTe are known to exhibit metastabilities and performance changes whether they are light-exposed or stored in the dark. The behaviour of CIS and CdTe modules from different manufactures was investigated in terms of light soaking (either indoor or outdoor), dark storage and short preconditioning with current-soaking (CS). The aim was to find a preconditioning procedure which reduces measurement uncertainty for polycrystalline thin-film modules.

The main effort was put into the dark current-soaking (CS) approach which is proposed as a potential pre-conditioning method for CIS modules within the next revision of IEC61646. The advantages of this alternative are the independence from light sources, lower facility and energy costs, a better control of the module temperature during the test, and generally a faster process. However, further research is still required to really conclude if this procedure can substitute indoor or outdoor light soaking or if a combination of both can result in more reliable results. Two issues were identified: (1) the level of stabilisation (sometimes higher then the initial value) and (2) very short-term effects in the range of ms, s or min, defined also as transient effects or short-term effects.

The picture below shows an example of typical current soaking test.

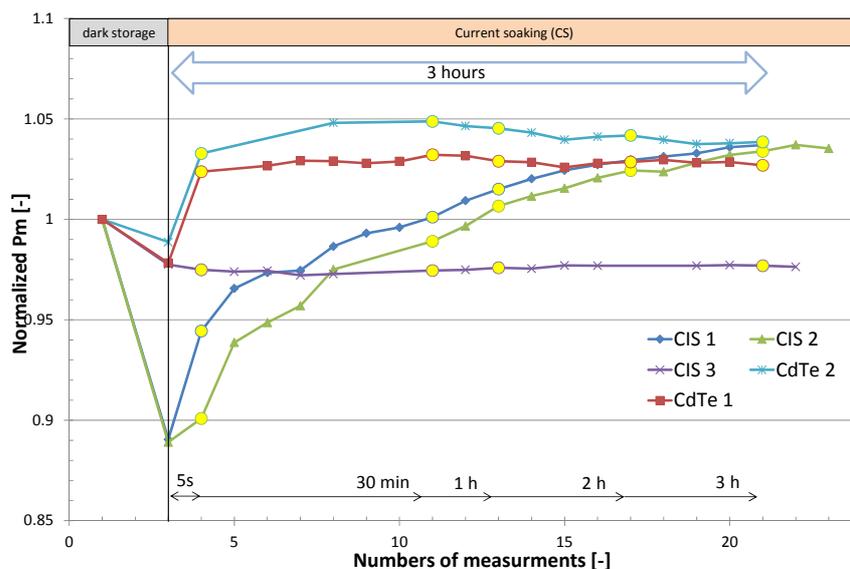


Fig. 4: Results of current-soaking over three hours: Measurements are carried out continuously with steps of 15min. The yellow dots indicate measurements at 5s, 30min, 1h, 2h and 3h.

The power is normalized to the initial indoor measurement after outdoor exposure. After this the modules have been maintained in the dark until Pmax stabilisation within  $\pm 0.5\%$ . A 3-hour CS was then applied to each module. The yellow dots indicate measurement after 5s, 30 min, 1h, 2h and the last measurement after 3 hours. It was found that the power could be recovered for some modules by applying CS in dark. The time to achieve the maximum power depends strongly on the module technology. For CdTe the maximum was achieved after 30min while for CIS it was after 3 hours. However, the maximum power is about 3 to 4% higher than the initial measurement after outdoor exposure. This could indicate that the degradation in the first seconds or minutes is much higher and that meta-stabilities occur already within the short time of transportation from outdoor into the laboratory.

Another investigated approach (i.e. to stabilize the power in dark by applying a short CS treatment of 5s before the I-V measurement) could be achieved for only one module. The power could be maintained within  $\pm 0.7\%$  over one hour, whereas the other modules under test showed the same fast degradation in the first five minutes.

Detailed results can be found in the paper presented at the 40<sup>th</sup> IEEE conference [8] and in the final report.

## Outdoor performance of thin film modules

### Technology benchmarking (energy yield inter-comparison)

A selection of 11 different thin film modules covering most of the technologies available to date (a-Si, a-Si/a-Si, a-Si/ $\mu$ c-Si, CdTe, CIS, CIGS, CIGSS) was monitored for 4 years at the outdoor test facility of SUPSI, together with some crystalline silicon (c-Si) reference modules. The following picture shows the measured daily performance ratio (PR= $E \cdot 1000 / H \cdot P_{ref}$ , where E is the daily energy produced, H the daily insolation, and Pref the power of the device under test at STC) of the modules, grouped by technologies - (1) CIS, (2) CdTe (here together with CIS), (3) a-Si/ $\mu$ c-Si and (4) a-Si single and multi-junction - together with the PR of the c-Si reference module, here represented by a black line plot. Modules of the same class demonstrate similar trends (seasonal fluctuations), except for the module CIS1, which is affected by a severe degradation. In the following all Yield and PR values are always referred to the real indoor measured STC power (Pref).

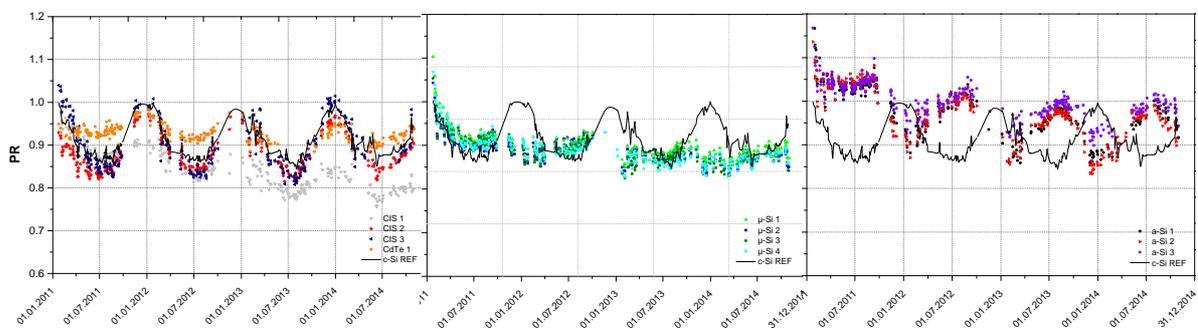


Fig. 5: Daily clear sky performance ratio (PR) in comparison to the PR of the c-Si reference module.

Figure 6 shows the difference between the energy yield produced in 3 years (2012-2014) by the thin film modules and the c-Si reference module. Differences of up to  $\pm 10\%$  were observed from one module to the other. The first year was not considered to allow all amorphous silicon based technologies to stabilise. As reported already after the first year of operation (see annual report 2012) CIS and a-Si/ $\mu$ c-Si modules slightly underperform compared to c-Si, whereas CdTe and a-Si tend to over perform.

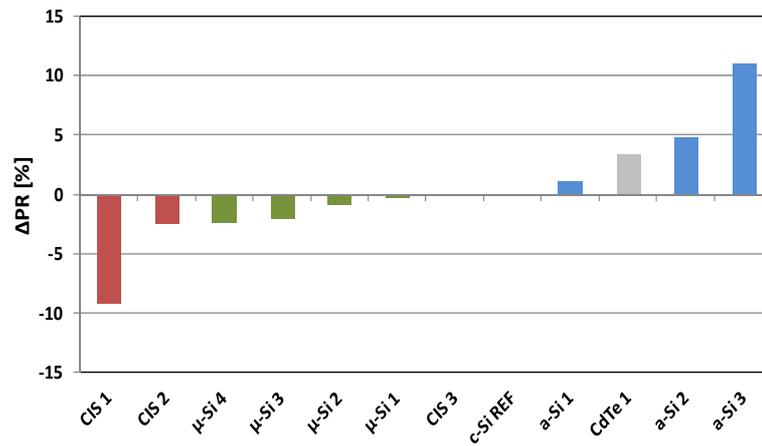


Fig. 6: Module Ranking for the period 2012-2014 expressed as  $\Delta PR = (PR - PR_{c-Si}) / PR_{c-Si}$  for 11 different thin film modules (CIS in red, CdTe in grey,  $\mu$ -Si in green and a-Si in blue) compared to the c-Si module.

### Module characterization (indoor parameters)

Before being exposed outdoors, all modules were characterized indoors with a class A+ solar simulator according to the most accurate testing standards (IV@STC measurement, IV(G) irradiance dependency, IV(T) temperature coefficients and SR spectral response). Some of the measurements were repeated more times over the 4 years of outdoor exposure to detect any changes (degradation rates and/or meta-stabilities). The table below gives a summary of the module parameters measured in the laboratory, which mostly influence the outdoor performance. These parameters are the input for a later loss analysis. Almost all modules seem to be affected by degradation. A precise determination of how much this indoor measured degradation rate is affected by short-term meta-stabilities and how much due to a real degradation of the device is still difficult to establish due to an only partial implementation of stabilization procedures. A detailed loss analysis gives additional insight into this issue.

	$\gamma$ loss %/°C	$\eta_{loss,200}$ %	spec. loss %/AM	degrad. %	$\Delta PR$ %
<b>c-Si REF</b>	-0.43	-2.60	2.10	0.57	0.00
CIS 1	-0.37	-15.30	-1.50	-9.29	-9.10
CIS 2	-0.36	-7.20	1.95	-0.05	-2.40
CIS 3	-0.39	-1.30	3.23	-1.00	0.00
CdTe 1	-0.27	5.70	-0.48	-2.66	3.40
a-Si 1	-0.18	-4.10	-7.80	-5.44	1.10
a-Si 2	-0.11	-1.10	-6.10	-3.97	4.80
a-Si 3	-0.15	-0.60	-3.00	-0.51	11.00
$\mu$ -Si 1	-0.30	-7.80	-2.10	-3.48	-0.20
$\mu$ -Si 2	-0.29	-7.10	-2.40	-4.06	-0.80
$\mu$ -Si 3	-0.23	-6.70	-1.60	-4.32	-1.90
$\mu$ -Si 4	-0.31	-14.80	-3.50	-2.00	-2.30

Table 2: Single module parameters (temperature coefficient [ $\gamma$ ], efficiency loss at  $200W/m^2$  [ $\eta_{loss,200}$ ], spectral loss coefficient and module degradation) together with outdoor measured  $\Delta PR$ .

### Link indoor to outdoor performance (loss analysis)

The loss analysis approach presented in former publications was further developed. Four loss mechanisms are considered for the analysis of the outdoor data: (1) temperature, (2) irradiance (3) spectrum and (3) reflection. The same angle of incidence dependency was assumed for all modules. The instantaneous losses are calculated according to the equations described in [9,10] and a daily loss factor is calculated for each day of the year. Figure 7a shows an example of daily loss factors for one of the a-Si/ $\mu$ -Si module ( $\mu$ -Si4). By reversely applying the losses to the measured outdoor power values, one should theoretically obtain the STC power ( $P_{stc}$ ) of the module and its evolution over time. If no degradation occurs, the corrected STC power should stay close to 1. Figure 7b shows the normalized daily average  $P_{stc}$  values of the a-Si/ $\mu$ -Si4 module together with its indoor measured STC power (red dots). The graph shows a clear negative trend (degradation) in combination with a seasonal variation due to the Staebler-Wronsky effect.

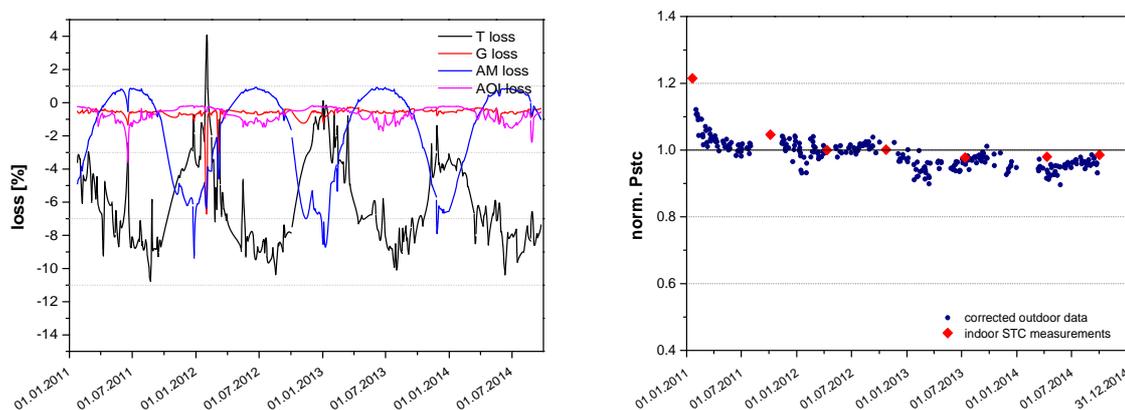


Fig. 7: (a) Seasonal variation of the performance losses: temperature, irradiance, angle of incidence and spectrum (b) Indoor and outdoor determined STC power over time for an a-Si module.

For the test site of Lugano, the loss analysis for all modules can be summarised as follows: spectral effects are crucial for all thin film technologies, with the highest influence for a-Si based technologies and the lower for a-Si/ $\mu$ c-Si. For a-Si/ $\mu$ c-Si the spectral gains in summer are partly compensated by higher thermal losses and lower thermal annealing (flatter PR trend). CIS and CdTe have a similar PR trend as c-Si (PR max in winter at low temperatures a min in summer at high temperatures), but with different contributions from spectrum and temperature. The losses at low irradiance play a minor role, but with increasing significance during cloudy days (sum up of spectrum and low irradiance). Degradation and/or meta-stability seem to be one of the main issues in energy predictions and have to be investigated further.

#### Simplified performance model with extension for amorphous silicon modules

Compared to the more conventional approach, the model proposed here, rather than focusing on the instantaneous power, concentrates on the large picture and directly attempts to provide a description of the daily performance ratio ( $PR_d$ ) of the device allowing to introduce a number of simplifications and to work with much smaller data sets (*crunching big data*). Input for the simulations are daily aggregate meteorological and solar data weighted on the irradiance profile.

The proposed model aims at describing the energy performance of solar photovoltaic modules under real operating conditions, including the peculiar counter-cyclical seasonal oscillations of technologies such as amorphous (a-Si) and crystalline (c-Si) silicon. The model focuses on clear-sky conditions and adds the Staebler-Wronsky effect (SWE). In a first approach the SWE is modeled using inputs from former works (valid for Lugano or similar geographical locations).

Details about the approach and weighting of the meteo and solar parameters are given in the annual report 2013 as well as in Ref. [10]. The model was further validated against three full years of data collected from our outdoor test field and good agreement was achieved for the two up to now investigated modules (a-Si single junction and c-Si module). For the a-Si device slight discrepancies on the long term are attributed to an intrinsic degradation of the module's energy performance which is not observed for c-Si.

#### Extension of amorphous silicon model to other geographical locations

For the a-Si technology, a paper aiming at extending the model for geographical locations in Europe other than Lugano was presented at the 29<sup>th</sup> EUPVSEC Conference [11]. In this work the previously proposed simplified model was further elaborated, including a new contribution for the well-known SWE.

So far, the limit of the model is its focus on sunny days only. The extensions of the model to cover other geographical locations in Europe, using as solar and meteorological input parameters time series provided by GeoModel, shows that the model can be used to describe, clearly distinguishing between the impact of the different contributions (i.e. reflection, spectral, temperature, irradiance), the very peculiar seasonal pattern of a-Si.

It was further demonstrated that it is possible to decouple spectral and SWE for different locations. The regeneration of the module related to the SWE becomes more significant for warmer climates (Sevilla, Lugano), whereas the impact of spectral losses becomes very significant at high latitudes (Tallin, Lübeck) in winter time. The study confirmed also that the a-Si technologies are more suited to

warmer climates (SWE) and to latitudes (in the northern hemisphere) between 0 and 45-50°, due to the massive spectral losses for this technology in winter time at high latitudes (on sunny days). The following graph shows the outcome of a full simulation of the daily  $PR_d$  for different sites in Europe.

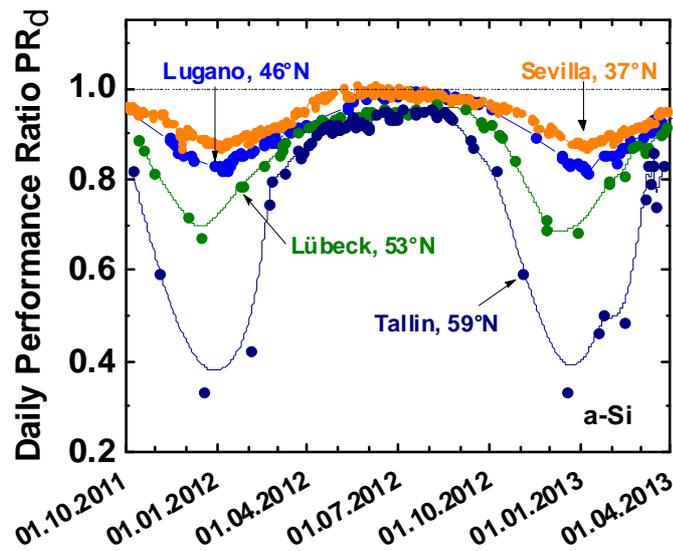


Fig. 8: Combination of the different contributions (losses/gains respect to STC) for the different geographical locations aiming at modeling the daily performance ratio  $PR_d$  of an amorphous silicon module.

## International collaboration within the project

In 2014 following international collaborations have been continued:

- Participation at the definition of a new IEC standard for the characterisation of multi-junction technologies (IEC 60904-1.1, IEC 60904-8.1).
- Collaboration within IEA Task 13 for the preparation of technical reports, the analysis of outdoor data and the preparation of a new pre-conditioning procedure for CIS and CdTe modules.
- Participation at the 4th international spectral irradiance inter-comparison campaign held in Madrid.
- Joint collaboration with GeoModel Solar (Bratislava, Slovakia).

## List of publications 2014

- [1] M. Pravettoni, "Characterization of the electrical performance of photovoltaic cells and modules: a review", in *Compendium of Energy Science and Technology*, Vol. 9, to be published
- [2] M. Pravettoni et al., "Light Emitting Diodes in the Experimental Practice for the Characterization of Novel Photovoltaics", 2015 MRS Spring Meeting, submitted
- [3] R. Galleano, D. Pavanello and M. Pravettoni, "Comparison of spectral characterization measurements on pulsed solar simulators and impact on the calibration of a multi-junction thin-film module", 29<sup>th</sup> EU PVSEC, Amsterdam, 2014
- [4] V. Paraskeva et al., "The effect of shunt resistance on external quantum efficiency measurements at high light bias conditions", 40<sup>th</sup> IEEE PVSC, Denver, 2014
- [5] G. Belluardo et al., "Solar spectral characterization of three different locations at alpine latitudes using average photon energy", Eurosun 2014 ISES Conference Proceedings
- [6] M. Pravettoni et al., "Results of the fourth international spectral measurement inter-comparison of a steady-state AM0 solar simulator", 6<sup>th</sup> WCPEC, Kyoto 2014
- [7] V. Paraskeva et al., "Luminescent emission of multi-junction InGaP/InGaAs/Ge PV cells under high intensity irradiation", *Solar Energy Materials & Solar Cells* 134 (2015) 175-184
- [8] S. Dittmann et al., "Current-Soaking and Dark Storage Effects of Polycrystalline Thin Film Solar Modules", 40<sup>th</sup> IEEE PVSC, Denver, 2014
- [9] G. Friesen et al., "A 4 year energy yield inter-comparison of thin-film modules: linking indoor to outdoor performance data", 6<sup>th</sup> WCPEC, Kyoto 2014.
- [10] A. Virtuani et al., "A simple approach to model the performance of solar PV modules in operation", submitted to *Progress in Photovoltaics* (August 2014).
- [11] A. Virtuani et al., "Modelling The Performance Of Amorphous Silicon Photovoltaic Modules In Different Geographical Locations In Europe", 29<sup>th</sup> EUPVSEC, Amsterdam 2014.



# PERFORMANCE PLUS

## TOOLS FOR ENHANCED PHOTOVOLTAIC SYSTEM PERFORMANCE

Annual Report 2014

Author and Co-Authors	Gianluca Corbellini (formerly substituting Domenico Chianese as SUPSI project leader)
Institution / Company	SUPSI – DACD – ISAAC
Address	Campus Trevano, Canobbio
Telephone, E-mail, Homepage	+41 (0)58 666 62 34, <a href="mailto:gianluca.corbellini@supsi.ch">gianluca.corbellini@supsi.ch</a> , <a href="http://www.isaac.supsi.ch">www.isaac.supsi.ch</a>
Project- / Contract Number	PERFORMANCE PLUS / 308991
Duration of the Project (from – to)	November 2012 - November 2015
Date	December 23rd 2014

### ABSTRACT

For a continued decrease of levelised costs of electricity from photovoltaics (PV), the prices of modules, inverters and balance of system (BOS) components have to be further decreased while performance, functionality, reliability and lifetime on the component and system level need to be increased. The PV industry has made large technological progress with PV cells, modules and inverters in terms of costs and reliability. However, in an integrated view, PV system performance emerges from, but is not limited to the performance of the components. Consequently, Performance Plus explicitly focuses on the PV system rather than on the component level. Modules and inverters are studied with focus on their functioning within a system. The main idea of the project is to optimise the system as a whole rather than the separate components only.

## Goals

The consortium aims at developing and demonstrating models and tools, beyond the state of the art, for monitoring, control and testing of PV systems, thus serving to optimize and enhance the performance, reliability and lifetime of commercial PV systems. Means for a better integration of PV-generated electricity into the power system shall be provided by methods for short-term forecasting, integrated energy management and storage control, PV system monitoring and control. The goal is to improve the competitiveness of PV on the system level. This will be achieved by optimizing the system as a whole rather than the separate components only.

The resulting collection of tools (toolbox) will be applicable to the decisive phases in the life cycle of a PV plant, namely, design, operation and maintenance. All R&D results and models will be validated with empirical data. The resulting tools will be demonstrated.

The specific scientific and technical objectives of Performance Plus are:

- Robust system design modelling for diligent design and bankability,
- Robust operational modelling for optimizing the system output,
- Integrated energy management and storage control,
- Real time monitoring and control: sensors communication and feedback,
- Hardware and software tools for testing,
- Validation, demonstration and target control.

## Brief description of the project

For a continued decrease of levelised costs of electricity from photovoltaics (PV), the prices of modules, inverters and balance of system (BOS) components have to be further decreased while performance, functionality, reliability and lifetime on the component and system level need to be increased. The PV industry has made large technological progress with PV cells, modules and inverters in terms of costs and reliability. However, in an integrated view, PV system performance emerges from, but is not limited to the performance of the components. Consequently, Performance Plus explicitly focuses on the PV system rather than on the component level. Modules and inverters are studied with focus on their functioning within a system. The main idea of the project is to optimise the system as a whole rather than the separate components only.

## Activities performed and achieved results

The main activities performed by SUPSI are related to two of the nine work packages, WP3 and WP5.

During 2014 and 2015 a big effort will be accounted also the WP7, related to define future possible commercial possibilities (software and tools) from the experience and the knowledge achieved.

WP	Work package title	Leader
WP1	PV system design modelling	IMEC
WP2	Operational PV system	UOL
<b>WP3</b>	<b>Integrated energy management and storage control</b>	KUL
WP4	Tools for monitoring and control	3E
<b>WP5</b>	<b>Procedures and tools for laboratory and field testing</b>	SUPSI
WP6	Demonstration and validation of overall tools	AIT
<b>WP7</b>	<b>Valorisation</b>	SUPSI
WP8	Dissemination and networking activities	3E
WP9	Project management	3E

Inside WP3 the SUPSI role is to develop and test a simplified model for energy storage with batteries inside the Modelica framework, to achieve this objective is under testing a model that includes calendar aging and cycling aging.

## **International cooperation**

Performance Plus is the result of unique international collaboration between the market, the industry and high level research. The 8 partners in Performance Plus consortium represent expertise from system operators, PV component manufacturers, renewable energy experts and researchers.

The main interactions for SUPSI are with:

### **3E sa**

Established in 1999, 3E is an independent consultancy & software services company. 3E provides guidance as well as solutions to improve renewable energy system performance, to optimize energy consumption and facilitate grid and market interaction. 3E pursues innovation to provide leading energy intelligence and practical solutions to our customers. 3E is certified ISO 9001:2008 since early 2010. 3E has worked on projects in more than 30 countries and operates with an international team of around 100 experts from its headquarters in Brussels and offices in Toulouse, Beijing, Istanbul and Cape Town.

### **Katholieke Universiteit Leuven**

KU Leuven boasts a rich tradition of education and research, which dates back six centuries. KU Leuven is the largest university in Belgium in terms of research expenditure, which exceeded EUR 347 million in 2010, and research output, e.g. 5200 international peer-reviewed publications and 626 PhD degrees in 2010. KU Leuven participates in over 370 highly competitive European research projects (FP7, 2007 up to 2011), including 33 of the prestigious European Research Council grants and 85 Marie Curie Actions, which places KU Leuven fifth in the European HES ranking (4th FP7 monitoring report, Aug. 2011). KU Leuven is core partner in InnoEnergy and delivers the European institute of Innovation and Technology (EIT) PhD degree label. 38% of KU Leuven's PhD students and 36% of its postdoctoral researchers are international scholars.

KU Leuven's contribution to Performance Plus will come from the research group Thermal Systems (TS) within the Division Applied Mechanics and Energy Conversion (TME). The research focus of the Thermal Systems group is on thermal systems, for which it has been shown that significant energy savings can be reached by using model based predictive control (MPC) strategies.

### **AIT Austrian Institute of Technology GmbH**

AIT Austrian Institute of Technology GmbH is Austria's largest non-university research organisation with more than 900 employees. In the field of electricity networks and distributed energy resources AIT's main expertise is in low and high voltage technology, power quality, safety and reliability analysis. AIT has long term experience in active integration of distributed generation in distribution networks and related applications.

Furthermore, AIT is represented in several technology platforms and is involved in the European Electricity Grid Initiative (EEGI), the EERA Joint Programmes on Smart Grids and PV and several Implementing Agreements of the International Energy Agency (ISGAN, IEA-PVPS).

## **Evaluation of year 2014 and perspectives for 2015**

During 2013 the SUPSI activities focused on WP3 where our researchers developed a simplified model for Modelica of a standard battery and WP5 where we are leading the activities regarding the PV testing.

The model for the electric batteries developed inside WP3 is taking in account the main phenomenon that affects performances:

- Relationship between state of charge and open circuit voltage
- Lifetime and depth of discharge
- Calendar aging
- Self-discharge

The purpose of this submodel is to be implemented inside a more complex system that includes also photovoltaic arrays, inverters and loads; inside this system Catholic University of Leuven will test their own algorithm to optimise the overall performances. The goal of this optimisation can be set to achieve different goals, namely maximum self-consumption, maximum lifetime, reliability, or a combination of these.

Regarding the Work Package 5, the revision of existing procedure for indoor and outdoor testing has been performed inside the deliverable D5.1, while also has been deployed the structure of the tool that is under development to improve on site testing and evaluating single effects that cause under performance in real plants. This will reflect in better understanding of PV plant behaviour and will help installer and maintenance activities to optimize the energy output.

An important topic to separate the causes of under performance is the determination of statistical distribution of module performances over system lifetime, mismatches in array, degradation variability, interaction between these effects and on inverter maximum power point tracking.

During 2014 we've been performing many measurements regarding the degradation effects on our PV plant TISO 10 (installed in 1982) that shows all kind of issues that can occur on real operation.

These activities included testing in laboratory and measurement on site (outdoor); an innovative method to estimate parasitic resistance has been developed, using dark I-V measurement during nights, to avoid every kind of optical effect.

In particular has been studied:

- Potential Induced Degradation (also known as PID)
- Thermography
- Improvement on the uncertainty determination
- Extrapolation of STC or other conditions
- Evolution over time of Fill Factor
- Low irradiance performances

Moreover during 2015 we will conclude the project providing new procedures and tools to improve the testing activities on PV plant, using proper software with innovative modelling that include the work of other institutions developed inside other WPs.

Every tool and procedure developed will be tested and validated on our TISO 10 plant and on PV plant (MW size) offered by the user groups, in different location, from Denmark to Italy.

## References

<http://www.perfplus.eu/> Website of the project including also the publications related to dissemination activities.



## CONSTRUCT PV

# CONSTRUCTING BUILDINGS WITH CUSTOMIZABLE SIZE PV MODULES INTE- GRATED IN THE OPAQUE PART OF THE BUILDING SKIN

Annual Report 2014

Author and Co-Authors	Francesco Frontini
Institution / Company	ISAAC-DACD-SUPSI
Address	Via Trevano, CH-6952 Canobbio (TI)
Telephone, E-mail, Homepage	058 666 63 20, <a href="mailto:francesco.frontini@supsi.ch">francesco.frontini@supsi.ch</a> , <a href="http://www.supsi.ch/isaac">www.supsi.ch/isaac</a>
Project- / Contract Number	295981
Duration of the Project (from – to)	01.02.2013 – 31.01.2017
Date	03.12.2014

### ABSTRACT

The project is financed by the EU-FP7 program under the Grant agreement number: 295981.

**Construct-PV** will develop and demonstrate customizable, efficient and low cost BIPV elements for opaque surfaces of buildings. Opaque surfaces were selected because they represent massive wide-area spaces of untapped harvesting potential across Europe. The multifunctionality of Construct-PV solution makes them an attractive solution for the market. Opaque surfaces are ideal for retrofit building envelopes that harvest also energy at the same time. To do this, the Construct-PV consortium involves selected partners, leaders in the industry and research sector and more in particular in the fields of PV technology and building construction. Construct-PV defines an integrated approach that streamlines the value chain by introducing BIM and CAD/CAM tools that enable customizable mass production by providing all the actors in the value chain access to the same information. Thus, Construct-PV will be attractive for the majority of SMEs in the building value chain. Demonstration activities will cover all aspects of the value chain. Two large scale demonstration sites will allow architects to have the liberty of designing solutions integrated in large districts. So, by choosing beautiful designed PV cell and module technology and by being customizable, Construct-PV is architect friendly. SUPSI-ISAAC contributed in WP1 and 2 with the identification of possible design solution for new BIPV customizable modules and system together with the definition of new standard procedures to tests BIPV system according to the Building roles. Task 5.1 is leaded by SUPSI and a new BIM tool is under development together with Zublin in order to offer the main stakeholder an innovative tool for the design of different BIPV envelope. Finally SUPSI is also responsible for the dissemination activities and the distribution of the project achievements. The website [www.constructpv.eu](http://www.constructpv.eu) presents the main achievement of the project.

The project started in February 2013 and will run for 4 years.

## Introduction/Aims of the project

The final goal of Construct-PV is to obtain BIPV modules that are targeting the expected performances described in SEII<sup>1</sup> with respect to the module efficiency range and applicable to at least 80% of the buildings in a urban environment.

The targeted markets for Construct-PV solutions are:

1. New buildings that, being designed from scratch, will be designed in order to meet optimal requirements for effective BIPV installation (i.e. building orientation, shading, building placement, road access, roof and façade dimensions)
2. Existing buildings undergoing deep retrofitting:
  - a. if modifications of the façade appearance are allowed, it will be possible to install BIPV systems following Construct-PV integrated approach that includes: identification of optimal position for BIPV systems, aesthetic design for architects, technical requirements for builders and BIPV manufacturers and finally guidelines for installers;
  - b. if modifications of the façade appearance are not allowed or only partially allowed in line with building codes, it will be possible to install BIPV on roof top of building; moreover other alternative solutions will be possibly identified by architects to allow smaller intervention to improve energy efficiency of the building.

## Detailed description of the project

The project, whose duration is estimated to be **48 months**, has been broken down into **8 Work Packages (WPs)** to achieve the S&T Objectives and expected impact (e.g. the development and demonstration of a radical evolution of BIPV). The first two years of the project are mainly devoted to research and development activities, laboratory testing, market analysis and all tests necessary to set the conditions for the success of the demonstration activities. In particular, the focus will be given to the involvement of all the partners in the analysis of building requirements from the point of view of architects, PV producers and construction companies. A task will be also dedicated to understand in which way the market is most quickly reachable for opaque BIPV solutions. This will help the identification of essential requirements, which will be then translated into technical specifications during the conceptual design of Construct-PV solutions.

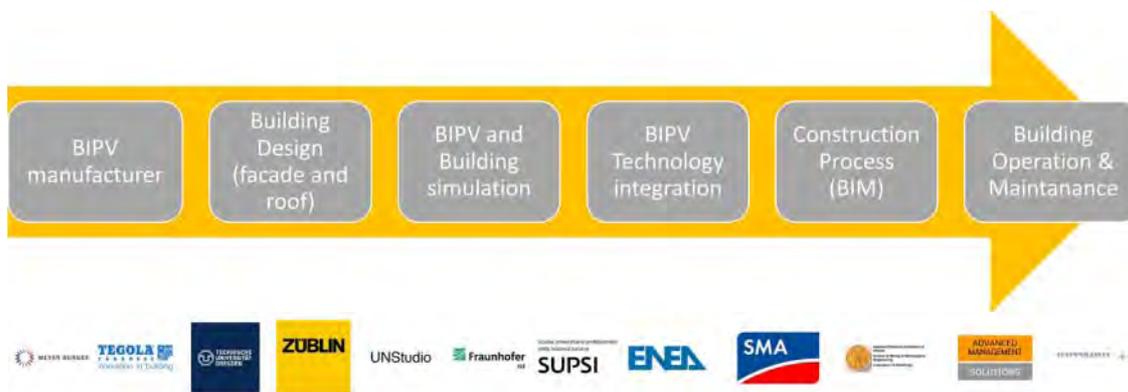


Fig. 1: Project flow and partners involved in the project. The whole BIPV design value chain is covered.

## Work carried out and results achieved

The project officially started in February 2013 and will be finished in January 2017. All WPs started and are running properly.

The main activities of **WP1** were dedicated to the definition of the requirements of BIPV opaque solutions such as façade cladding elements and roof tiles. Moreover the identification of existing technical requirement was completed. The idea of the project is to treat the BIPV system as a conventional building construction.

<sup>1</sup> "Implementation plan 2010-2012" of the Solar Europe Industry Initiative (SEII), EPIA 2010.

All possible design solutions, available today for BIPV systems on roof and façades, have been collected and present in Deliverable D1.2. Special focus has been given to ventilated facades and roofs. Promising solution for Construct PV have been also described and correlated to a market analysis performed by Dappolonia (ITA) and SUPSI, together with the contribution of other partners.

Construct-PV has developed a **layered approach** that provides possibilities for design adaptations throughout Europe:

- Cell and material desing level
- PV module design level
- Façade design level
- Building desing level
- Environment desing level

With a range of colors, patterns and glazing finishes the appearance of the PV cells can be enhanced and enriched without losing efficiency in producing electricity. This product is being developed for the European Market and is intended to become available in a range of catalogue options, and if request-ed bespoke solutions.

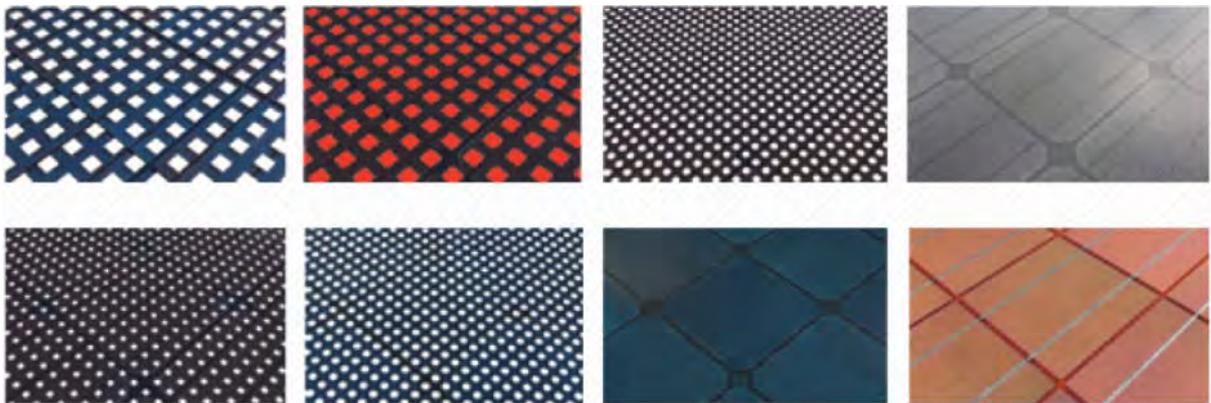


Fig. 2: Frit Printed glass panes to be used as front cover fro PV modules.

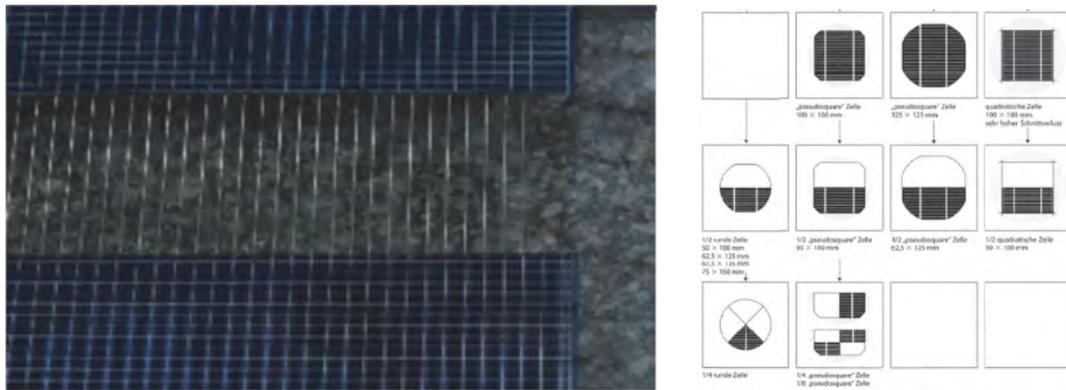


Fig. 3: Multiwire connectors (MWT) are only visible when standing close to the façade and guarantee higher flexibility than conventional connection.

To imitate patterns of other building materials, solar cells and PV module could be configured to reproduce the qualities of other construction materials. By modifying the space of solar cell for example and shifting them it is possible to create regular patterns that reproduce the appearance of a brick wall (as example). The same effect can be reproduced at module level.

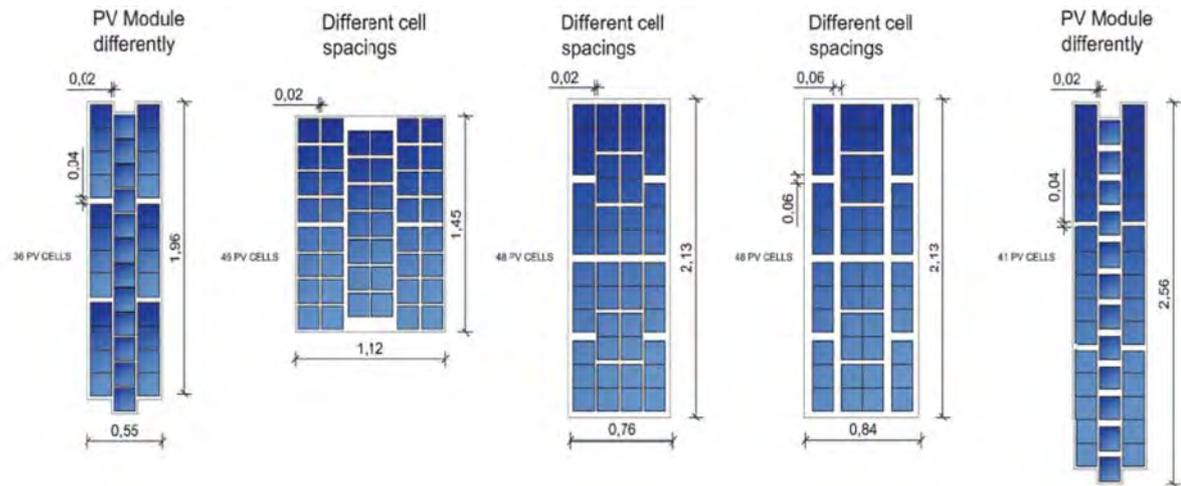


Fig. 4: By changing the cell spacing or the module distance it is possible to reproduce the rhythm of a brick façade.

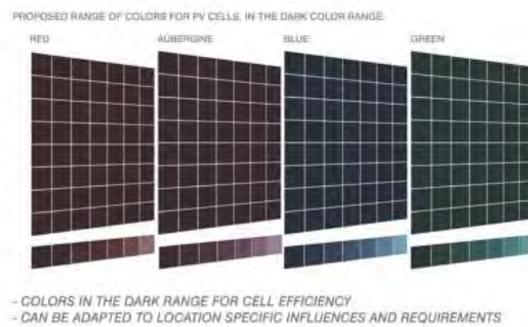
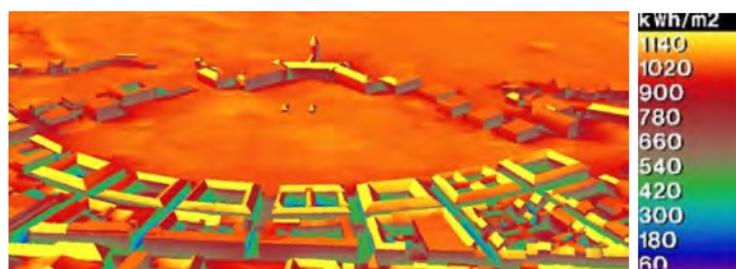


Fig. 5: Four colours have been identified by UN Studio as more attractive for architects.

Following the same approach, in parallel to WP1, **WP2 (Standardization and Testing)** investigated the standards and testing procedures required to certify Construct-PV products (with an important aspect being a contribution to standardization for the loosely regulated BIPV sector). The results of such activities will be further discussed in the framework of CENELEC working group, which is preparing the new standard for Photovoltaic in building prEN 50583. SUPSI is part of this group and will transfer the achievement of the project to CENELEC.

The Content of this WP is not only about the European legal situation of the building code, but also on those of some national countries. In addition to France, Greece, Switzerland, Italy, Spain, the Netherlands and Austria, the German standard situation and its legal process will be mainly discussed. The German situation has been identified as the more strict and difficult market for BIPV, especially for façades.

Furthermore in WP2 since so far for buildings' façades no detailed solar irradiation potential maps are available, a statistical cluster analysis and simulation has been performed. In the following figure an exemplary solar irradiation map including the façades for the city of Karlsruhe, Germany is shown. It has been created based on an existing 3D model of the city of Karlsruhe employing solar irradiation analysis based on ray-tracing algorithms used in research projects of ConstructPV.



**WP4** and **WP6** are running since July 2014 and preliminary results have been discussed only internally. As planned the demo sites will be located in different places.

In **WP5**, Task 5.1 aims at developing a software tool for comprehensive assessment and evaluation of BIPV in connection with the BIM software in the design phase for the planner and in the offer phase of the construction company. The goal is the assessment of costs. The physical characteristics of a PV product (mono- and multicrystalline, thin film, opaque surface, partially transparent) such as color (cells, background, frame), shape (cells and modules), typology of the electrical contacts (standard, back contact), transparency and reflection, may be analyzed. Each of these factors correspond to GDL (Geometric Description Language) information which carries 2D and 3D geometry, product logic and behaviours, parameters, material definitions and a specific user interface. These features allow an effortless customization of the CAD object to the requirements of every user, reproducing most of the products currently on the market using CAD and CAD compatible software.

The activities for **WP7 (Overcoming non technological barriers)**, where SUPSI is WP leader, will ensure a widespread and effective dissemination of project results to the relevant target groups. Also the website of the project, developed by SUPSI, is now on-line (<http://www.constructpv.eu/>) and will contain the most relevant project information. The Web page will be updated as the project will be developed. This channel intended to be a good strategy for communicating that influence policymakers and other stakeholders about the benefits and the value-chain on BIPV systems and especially the photovoltaic solutions developed in the project.

## National and international cooperation

Within the project the following partners, together with SUPSI, are included:

- Ed. Zueblin Ag (Coordinator) (Germany)
- Alkion Anonimi Techniki Kai Emporiki Etairia (Grece)
- D'appolonia Spa (Italy)
- ENEA (Italy)
- Fraunhofer ISE (Germany)
- Meyer Burger AG (Swiss company, that is providing solar cell and PV modules) (Switzerland)
- NTUA (Grece)
- SMA (Germany)
- Technische Universitaet Dresden (Germany)
- Tegola Canadese Spa (Italy)
- Van Berkel & Bos U.N. Studio B.V. (Neatherland)

## Evaluation and future prospects

The project is running properly.

To cover the last mile before market uptake, Construct-PV will demonstrate its results across all aspects of the value chain. In specific:

A Small Scale demonstration of manufacturing line for BIPV will be prepared by Meyer Burger in Thun to demonstrate the high replication potential of the developed results: in particular the focus will be on the optimization of the manufacturing line in order to allow for a more flexible production.

A special test stand will be built at SUPSI campus to show the roof system and a second small façade mockup will be constructed from Züblin to show the façade possibilities

Furthermore two large scale demonstrations will be performed on two different demo-sites available for Construct-PV (see Fig. 6)

- the first is an existing building located in National Technical University Zografos Campus of Athens (NTUA) where roof application of developed BIPV will be mainly pursued, since panels in horizontal orientation offer better performances at this latitude. This building is one of the many

buildings in the same campus that could be retrofitted after project closure, representing an initial market replication potential for the proposed approach.

- the second is a new building of Züblin in the district of Möhringen (Stuttgart). Roof and façade application are foreseen here.



*Fig. 6: The left photo shows the Züblin building in Stuttgart and the right picture the building located in Athens.*

## References

- [1] F. Frontini, T. Friesen, Building Integrated Photovoltaics: challenges for manufacturers and designers, Pro-ceeding of Energy Forum, Brixen, 2012
- [2] CPR (EU) no 305/2011 laying down harmonised conditions for the marketing of construction products and repealing Council Directive 89/106/EEC
- [3] SOPHIA RI, <http://www.sophia-ri.eu/>
- [4] CENELEC project: prEN 50583:2012 Photovoltaic in building
- [5] F. Frontini et al., From BIPV to building component, Proceedings of Eupvsec, Paris



# GEWINNUNG ELEKTRISCHER ENERGIE AUS TÖNUNGEN FÜR FENSTERSCHEIBEN UND FASSADENELEMENTE

## LANGZEITSTABILITÄT VON EINGEBETTETEN ZEOFRET® KOMPOSITA

Annual Report 2014

Author and Co-Authors	Andreas Kunzmann <sup>1</sup> , André Devaux <sup>2</sup> , Lucie Sägesser <sup>3</sup> , Dominik Brühwiler <sup>3</sup> , Peter Belser <sup>2</sup> , Pengpeng Cao <sup>2</sup> , Gion Calzaferri <sup>1</sup>
Institution / Company	<sup>1</sup> Optical Additives GmbH, <sup>2</sup> Universität Fribourg, <sup>3</sup> ZHAW Wädenswil
Address	<sup>1</sup> Optical Additives GmbH, Flurweg 5, 3073 Gümligen
Telephone, E-mail, Homepage	+41 79 335 06 80, <a href="mailto:andreas.kunzmann@optical-additives.com">andreas.kunzmann@optical-additives.com</a> , <a href="http://www.optical-additives.com">www.optical-additives.com</a>
Project- / Contract Number	SI/500995 / SI/500995-01
Duration of the Project (from – to)	15.11.2013 – 28.2.2015
Date	14.12.2014

### ABSTRACT

The aim of this project is to extend the use of tinted windows or glass building fronts to the generation of electricity. Most of such surfaces cannot be exploited in a meaningful way for photovoltaic energy generation with current technology. Using light-stable luminescent solar concentrators in an economical, ecological, and aesthetically pleasing way leads to novel architectural building elements that can also generate electricity from direct and diffuse illumination. The major project goal lies in the development of light-stable dye-zeolite composites (ZeoFRET®) that can be used in the production of luminescent solar concentrators. Since ZeoFRET® composites for indoor applications do exist, they now need to be tested and adapted for large-scale outdoor use.

Long-term stability is a key aspect in order to prepare luminescent solar concentrators which keep 80% of their initial efficiency after 25 years of operation. ZeoFRET® composites are non-toxic and do not contain any rare or hazardous materials. They are highly biocompatible.

During the first year of this project a major step was to investigate and find solutions to prevent ZeoFRET® agglomeration, allowing proper dispersion of ZeoFRET® in polymer material. New surface coating methods were developed. Compounding of ZeoFRET® in different polymers was investigated and first successful mold injection experiments were carried out.

Additional dye types were added to the system allowing for a broader absorption spectrum.

Photostability tests in different set-ups have been performed and compared with industry-standard long-term stable luminescent dyes. The lifetime of the dyes is extended in the ZeoFRET®-system compared to pure dyes in the same polymer matrix.

## Einleitung / Projektziele

Die Tönung von Fenster und Glas-Hausfassaden soll um die Zusatzfunktion der Elektrizitätsgewinnung erweitert werden. Flächen, die mit bestehenden Technologien nicht oder nur unbefriedigend genutzt werden können, sollen durch Verwendung von lichtstabilen Lumineszenzkonzentratoren (luminescent solar concentrator, LSC) in ökonomisch, ökologisch und ästhetisch sinnvoller Weise für die photovoltaische Energiegewinnung erschlossen werden.

Das vorliegende Projekt hat zum Ziel, in eine Polymermatrix eingebettete ZeoFRET®-Komposita für Anwendungen im Freien hinter Glas, das heisst unter Berücksichtigung klimatischer Belastungen sowie direkter Sonneneinstrahlung, auf ihre Stabilität zu prüfen und zu optimieren. ZeoFRET® ist ein Gast-Wirt Komposit bei dem eine Kombination von zwei bis drei lumineszierenden Farbstoffen, Donoren und Akzeptoren, geordnet in Röhren von etwa 1 nm Durchmesser eingebaut ist. Als Wirt dienen Zeolith L (ZL) Kristalle im Grössenbereich von wenigen hundert nm. Förster Resonanz Energie Transfer (FRET) von den in hoher Konzentration vorliegenden Donoren auf wenige Akzeptoren führt zu einer Farbänderung, welche die Emission in einen Bereich verschiebt, in welchem das Material nahezu kein Licht absorbiert. Im Fokus steht der Einsatz von ZeoFRET® in LSC-Modulen mit einem Systemwirkungsgrad von zunächst mindestens 5%, bei direkter Sonnenbestrahlung und einem guten Wirkungsgrad bei diffusem Licht.

Das wissenschaftlich-technische Ziel des Projekts ist die Langzeitstabilität von ZeoFRET®. Die optische Effizienz des ZeoFRET®-LSC soll nach 25 Jahren noch mindestens 80 % der Anfangseffizienz betragen.

ZeoFRET® Komposita sind nicht-toxisch und enthalten insbesondere keine giftigen oder schwer gewinnbaren Elemente. Sie sind daher in hohem Masse biokompatibel.

Im ersten Jahr dieses Projektes wurden folgende Ziele gesetzt:

- Optimierte und reproduzierbare Beschichtungsverfahren, die zu Lumineszenzkonzentratoren mit einer Effizienz von mehr als 50% führen (relativ zum absorbierten Licht; mit ZeoFRET® Komposita, die eine Lumineszenzquantenausbeute von mehr als 90% aufweisen).
- Langzeit-Stabilisierung und Upscaling des Verschlussverfahrens für ZeoFRET®-Komposita vom Labormassstab (<1 g / Batch) auf 100 g / Batch.
- Erste Versuche zur Einbettung der ZeoFRET® Komposita in Polymermatrizen insbesondere PMMA. Ziel ist eine Dispergierungsmethode zu entwickeln, welche ZeoFRET®-Agglomerate verhindert.
- Validierung der Methode zur Ausrichtung von ZeoFRET® zur Effizienzsteigerung des Gesamtsystems durch Einsatz verschiedener Kristallformen und deren Anwendung bei der Oberflächen-Beschichtung.

## Kurzbeschreibung des Projekts / der Anlage

Essentiell für die Bestimmung der Quantenausbeute und das Erreichen der 50% LSC-Effizienz ist, die Lichtstreuung im LSC zu minimieren. Dafür muss ZeoFRET® im Trägermaterial vollständig benetzt und homogen in Form von Primärteilchen ohne Aggregate dispergiert werden. Um eine optimale Dispergierbarkeit der ZeoFRET®-Kristalle in organischen Lösungsmitteln oder PMMA-Schichten zu erzielen und damit die Streueffekte durch ZeoFRET®-Aggregate zu vermeiden, muss die Oberfläche der Kristalle so modifiziert werden, dass ihre chemische Beschaffenheit möglichst ähnlich zu der PMMA-Matrix ist.

Für die Aufskalierung des Verschlussverfahrens musste der Lösemittelverbrauch gegenüber dem Laborverfahren um Faktor 6 reduziert werden. Weiterhin kritische Punkte des Prozesses sind der Wassergehalt des Lösemittels und die Durchmischung der Suspension.

Für die industrielle Applikation der Methode sollen verschiedene Ansätze für Beschichtung und Spritzguss verfolgt werden. Konkrete Versuche dieser Ansätze mit Überprüfung der Agglomeratsbildung wurden durchgeführt.

Durch kovalente Anbindung von „Disk-shaped“ ZeoFRET®-Kristallen an die Oberfläche einer Quarzplatte können Monoschichten hergestellt werden, wodurch die Emission des ZeoFRET® in der Ebene der Quarzplatte ausgerichtet wird. Diese Ausrichtung erhöht die optische Effizienz eines entsprechenden LSC und vermindert Streuverluste. Aus einer Vielzahl von möglichen Methoden zum Anbringen von ZeoFRET®-Kristallen auf einer Trägeroberfläche, wurden zwei Strategien verfolgt.

## Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse

### Optimierte und reproduzierbare Herstellung von ZeoFRET® Waveguides

Das Dünnschichtkonzept konnte so weiterentwickelt werden, dass nun Waveguides reproduzierbar und gleichmässig mit einer ZeoFRET®/PMMA Dispersion beschichtet werden (Fig. 1). Die angestrebte Effizienz von über 50% wurde bisher aufgrund von Streueffekten noch nicht erreicht. Die Entwicklung einer besseren Dispergierungsmethode von ZeoFRET® in einer Polymer-Matrix wurde angegangen.

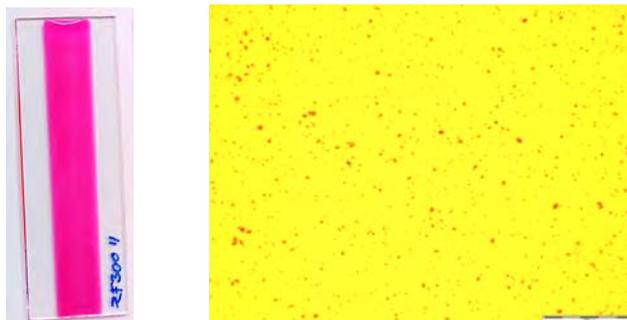


Fig. 1: Links: Mit 300 µm PMMA/ZeoFRET® beschichteter Waveguide (15 mg/mL). Rechts: Mikroskopieaufnahme der Beschichtung (Skala = 500 µm). Die roten Punkte sind ZeoFRET® Agglomerate.

### Erweiterung des Beladungskonzepts von ZeoFRET®

Das Syntheseverfahren für die ZeoFRET®-Komposita wurde durch den Einbau eines zweiten Donorfarbstoffes erweitert. Dadurch zeigt das System ein wesentlich grösseres Absorptionsfenster als ZeoFRET®, das mit nur einem Donorfarbstoff beladen ist (Fig. 2). Der zusätzliche Farbstoff ermöglicht es nun auch Photonen im UV Bereich (ab 360 nm) für den FRET Prozess zu nutzen und somit die Lichtsammelleffizienz der LSC zu verbessern. Die Strukturformeln der eingesetzten Farbstoffe sind in Schema 1 zusammengefasst.

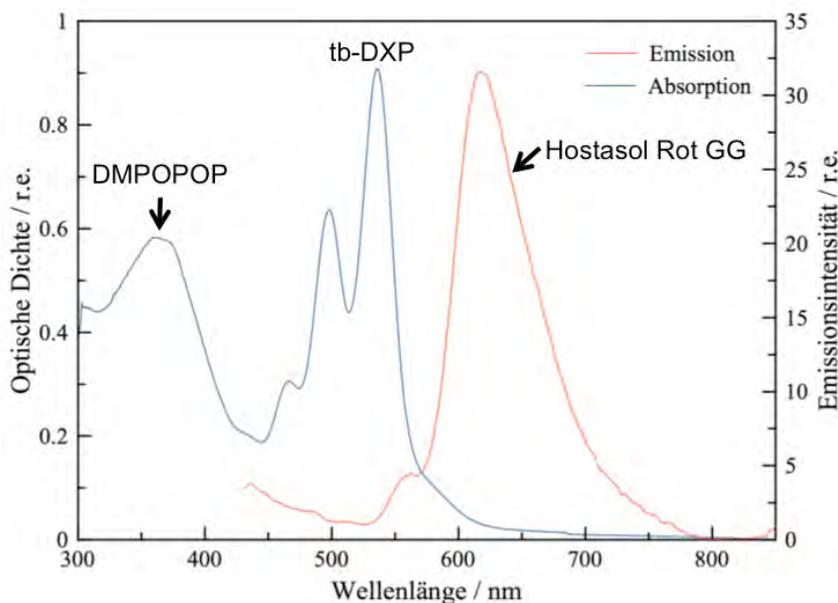
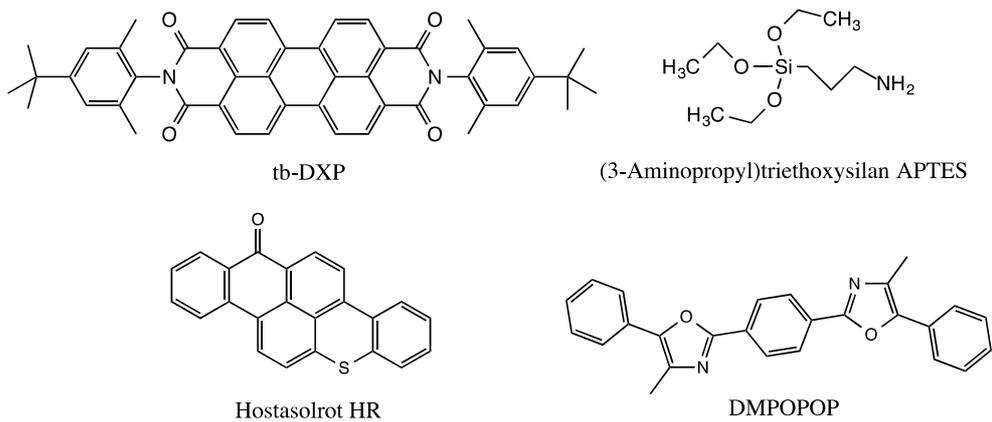


Fig. 2: Absorptions- und Emissionsspektrum von Breitband-ZeoFRET®. Absorptionsspektrum (blau); Emissionsspektrum mit einer Anregungswellenlänge von 360 nm (rot).



Schema 1: Abbildung der in diesem Bericht beschriebenen Strukturen.

### Optimierung des Verschlussverfahrens für ZeoFRET® und dessen Dispergierbarkeit in PMMA

Ein verbessertes Verschlussverfahren mit APTES (Molekularstruktur siehe Schema 1) wurde entwickelt, welches auch in grossen Mengen durchgeführt werden kann. Die verschlossenen Komposita zeigen auch nach längerer Lagerung bei Raumbedingung keinerlei Farbstoffverluste.

Um eine optimale Dispergierbarkeit der ZeoFRET®-Kristalle in organischen Lösungsmitteln oder PMMA-Schichten zu erzielen und somit Streueffekte durch ZeoFRET®-Aggregate zu vermeiden, muss die Oberfläche der Kristalle so modifiziert werden, dass ihre chemische Beschaffenheit möglichst ähnlich der PMMA-Matrix ist. Eine solche Strategie wurde von uns bereits für die Verbesserung der Dispergierbarkeit von Zeolith L in anderen Polymeren erfolgreich angewandt.<sup>[1]</sup> Das Anbringen von langkettigen Alkanen (mit 18 C Atomen) an der Kristalloberfläche führte zu einer signifikanten Verbesserung der Dispergierbarkeit in PMMA Lösungen.

Diese Oberflächenmodifikationen haben keinen Einfluss auf die Form der Absorptions- und Emissionsbanden der ZeoFRET®-Materialien. D.h. das optische Verhalten von ZeoFRET® wurde durch diese Stabilisierungs- und Dispergierungsoptimierung nicht verändert.

Der eigens für die Herstellung von ZeoFRET® entwickelte Interkalator (Fig. 3) wurde auf seine Funktionalität getestet und für flexiblere Verwendung angepasst. Pro Batch können nun 20 - 200 g ZeoFRET® hergestellt werden. Das Verschlussverfahren von ZeoFRET® wurde auch erfolgreich vom Labormassstab (<1 g) aufskaliert. Die grösste Herausforderung war die Reduktion des Lösungsmittelmengenbedarfs um Faktor 6 gegenüber dem Laborverfahren. Ein aufskalierter Herstellungsprozess für verschlossene ZeoFRET® Komposita liegt nun vor. Es konnten bereits über 100 g ZeoFRET® für die Verwendung in Spritzgussversuchen hergestellt werden.



Fig. 3: Interkalator für die Herstellung von 100 Gramm-Mengen an ZeoFRET®. Drei Produkte von Testsynthesen (100 g Massstab) sind im Vordergrund gezeigt.

Um eine möglichst lange Beleuchtungszeit für die Stabilitätsmessungen zu erhalten, wurden die Proben für die Stabilitätsmessungen nach der bereits oben beschriebenen Verschlussmethode und dem oben beschriebenen Beschichtungsverfahren hergestellt. Da diese Proben noch einen hohen Streulichtanteil aufweisen, konnten damit bisher zwar Stabilitätsmessungen aber keine aussagekräftigen Effizienzmessungen gemacht werden. Daher wurde parallel zu den Messungen der Beleuchtungsstabilität die Einbettung von ZeoFRET® in Polymermatrizen mittels Schmelzextrusion und Spritzguss entwickelt. Diese Methode hat gegenüber der Beschichtung von Waveguides den Vorteil, dass die bei der Beschichtung auftretenden Einflüsse von Lösemittel, Filmtrocknung und Filmschrumpfung wegfallen. Beim Spritzgießen werden jedoch im Gegensatz zur Beschichtung grössere Mengen an Material verbraucht, was die Anzahl an Versuchen mit ZeoFRET® begrenzt. Bisher wurden daher die Dispersionsversuche mit einer ZeoFRET®-Vorstufe (Farbstoff-Zeolith) und mit oder ohne Verschluss durchgeführt. Diese Farbstoff-Zeolith Produkte weisen zwar keinen FRET-Effekt auf und können damit auch nicht für die Überprüfung der Effizienz benutzt werden, zeigen aber gleiche Oberflächeneigenschaften und ein analoges thermisches Verhalten wie ZeoFRET®.

Die Evaluation der für die Spritzgussversuche zur Verfügung stehenden Matrixmaterialien erfolgte in Bezug auf ihr Temperaturverhalten und die Übereinstimmung der Brechungsindices mit jenem von ZeoFRET®. Damit konnten bereits die erforderliche Materialmenge ermittelt und bereitgestellt, die Vortrocknung des ZeoFRET® und des Polymergranulats optimiert und der Ablauf des Spritzgussprozesses festgelegt werden. (Fig. 4 und 5). Durch eine Erhöhung der Scherbelastung wurde eine ausgezeichnete Dispergierung in PMMA erreicht (Fig. 5, unten).



Fig. 4: Links: PMMA-Stufenprofil mit unverschlossenem Farbstoff-Zeolith. Rechts: PMMA-Stufenprofil mit verschlossenem Farbstoff-Zeolith. Beide Produkte wurden getrocknet und direkt dem Granulat beigemischt (Zeolithkonzentration 0.3%).

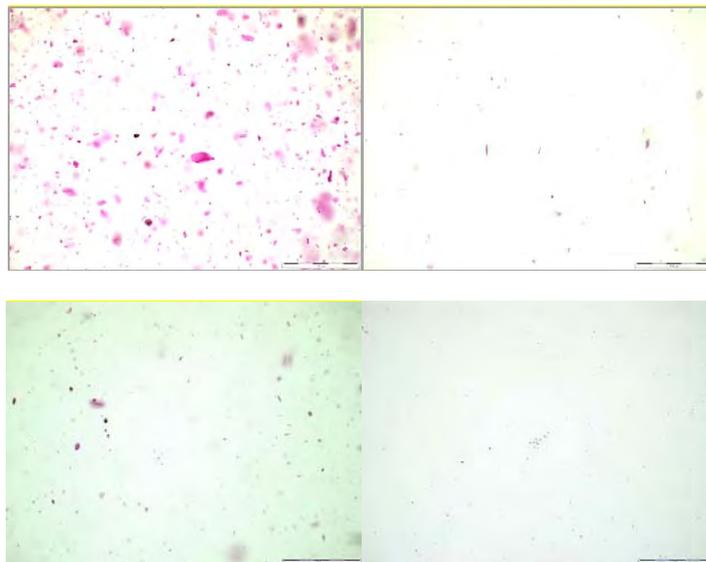


Fig. 5: Oben: Mikroskopieaufnahmen der Stufenprofile (Skala = 500 µm) aus Fig. 4. Links: Unverschlossener Farbstoff-Zeolith; Rechts: mit APTES verschlossener Farbstoff-Zeolith. Der Verschlussprozess führt zu einer besseren Dispergierbarkeit des Materials in der Polymermatrix. Unten: Mikroskopieaufnahmen von in PMMA eingebetteten Farbstoff-Zeolithen (Skala = 500 µm) mit geringer (links) und hoher (rechts) Scherbelastung hergestellt.

## Überprüfung der Lichtstabilität unter Labor- und Realbedingungen

Um die Stabilität von ZeoFRET® für die Anwendung in Fassadenelementen zu eruieren, wurden sowohl ZeoFRET® Proben, als auch die im ZeoFRET® vorhandenen Donor- und Akzeptorfarbstoffe einzeln im Wirtsmaterial (Zeolith L) interkaliert und getestet. Als Vergleich wurden die beiden Farbstoffe auch direkt (ohne Einbau in Zeolith L) in PMMA gelöst und getestet.

Bei beiden Beleuchtungsarten konnte keine Verschiebung der Absorptionsspektren der Farbstoffe festgestellt werden. Während der Beleuchtung nahm die Absorbanz über das Spektrum gleichmässig ab (Fig. 6).

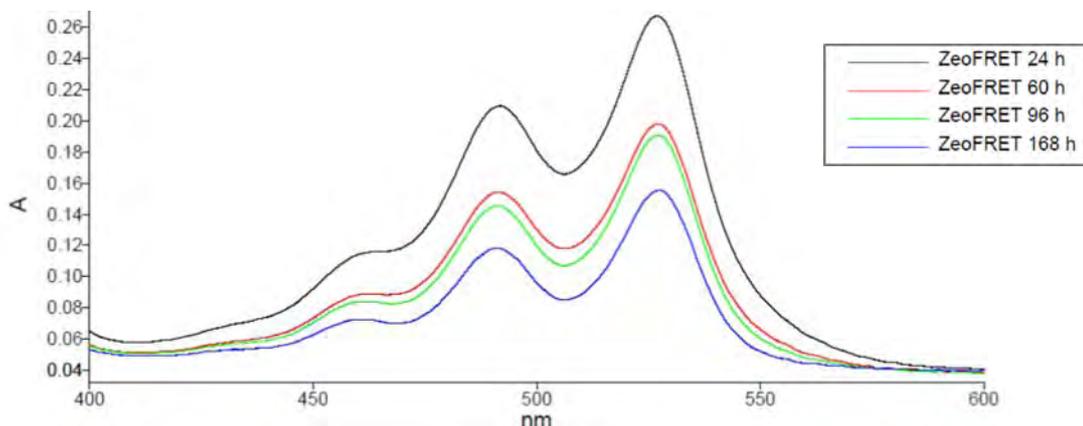


Fig. 6: Absorptionsspektren von ZeoFRET® nach der Beleuchtung mit Tageslicht.

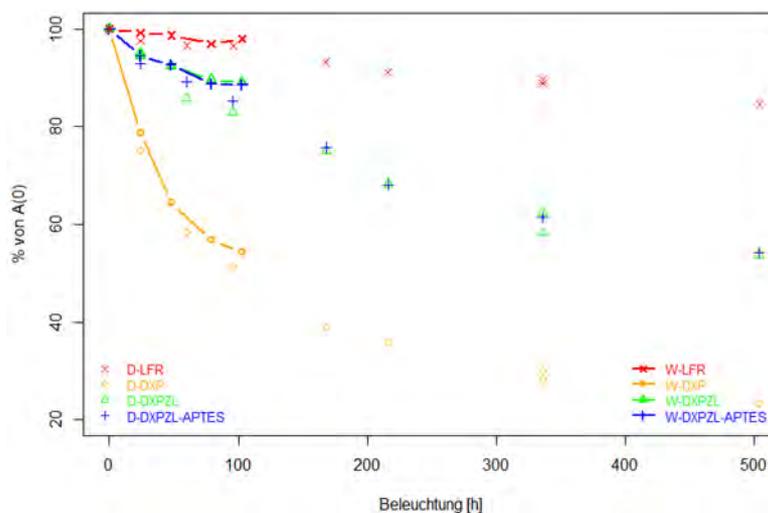


Fig. 7: Beleuchtungsstabilität der interkalierten Proben bei Tageslicht (D-) und hinter Konservierungsglas (W-). Erklärung der Legende: LFR=Lumogen F Rot, DXP=tb-DXP, DXPZL=tb-DXP-ZL, DXPZL-APTES=tb-DXP-ZL verschlossen mit APTES.

Die anfänglich rasche Abnahme (0 - ca. 80 h Beleuchtung; siehe Fig. 7) bei den unverschlossenen und den verschlossenen Proben ist darauf zurückzuführen, dass der verwendete Zeolith einen Anteil an amorphem/halbamorphem Material enthält. Der in diesem Anteil adsorbierte Farbstoff ist nicht stabilisiert und degradiert deshalb relativ rasch. Um diese Problematik in Zukunft zu vermeiden, wurde ein einfaches Verfahren für die Abtrennung dieses unerwünschten Amorphanteils ausgearbeitet.

## Herstellung von ausgerichteten ZeoFRET® Monoschichten

Durch kovalente Anbindung von „Disk-shaped“ ZeoFRET®-Kristallen an die Oberfläche einer Quarzplatte konnten Monoschichten hergestellt werden. Diese Monoschichten haben den Vorteil, dass die Emission der eingebauten Farbstoffe in der Ebene der Quarzplatte ausgerichtet wird. Diese Ausrichtung erhöht die optische Effizienz eines entsprechenden LSC-Moduls und vermindert Streuverluste sowie Verluste durch unerwünschte Lichtauskopplung an Polymer/Luft Grenzflächen (escape cone).

losses). Aus der Vielzahl von möglichen Methoden zum Anbringen von ZL-Kristallen auf einer Trägeroberfläche haben wir zwei Strategien ausgewählt:

- Da die „Disk-shaped“ Zeolith-Kristalle mit den Kanalöffnungen auf der Glasoberfläche liegen, benutzen wir nach dem Verschlussprozess nicht reagierte Gruppen an den Kanaleingängen, um die ZeoFRET®-Kristalle kovalent an die OH-Gruppen der Quarzglasoberfläche zu binden.
- Die zweite Methode bedient sich der sogenannten „Click-Chemie“. Dabei werden die ZeoFRET®-Kristalle und die Quarzglasoberfläche kovalent aneinander gebunden.<sup>[2]</sup>

## Nationale / internationale Zusammenarbeit

Die Compoundierung und die Spritzgüsse wurden in enger Zusammenarbeit mit der Firma Riwisa AG, Hägglingen durchgeführt.

## Bewertung 2014 und Ausblick 2015

- Während die Lumineszenzquantenausbeute von über 90% erreicht wurde, konnte die Effizienz aufgrund der Dispergierungsschwierigkeiten noch nicht quantitativ gemessen werden.<sup>[3]</sup> Mit der Einbettung von ZeoFRET® in eine PMMA-Matrix mittels Spritzguss haben wir aber ein Verfahren entwickelt, mit welchem für quantitative Messungen geeignete Module hergestellt werden können.
- Erste Langzeit-Lichtstabilität Messungen wurden durchgeführt und positive Effekte konnten gemessen werden. Dies stimmt für die zukünftige Weiterentwicklung positiv.
- Das Upscaling vom Labor- zum Kleinmengenmassstab zeigt grossen Erfolg. Von den ursprünglichen Batches von weniger als 1 g konnte die Rezeptur auf 100 g pro Batch hochgefahren werden.
- Die Einbettung der ZeoFRET® Komposita in Polymermatrizen insbesondere PMMA zeigt erste Erfolge. Nach anfänglichen Dispergierungsschwierigkeiten, bei denen Agglomerate zur unerwünschten Lichtstreuung führten, ist uns mit der Verfeinerung des Compoundierens ein erster Fortschritt hin zu praktisch agglomeratfreien ZeoFRET®-PMMA Materialien gelungen.
- Zwei Methoden zum Ausrichtung von ZeoFRET® auf Oberflächen zur Effizienzsteigerung des Gesamtsystems wurden gefunden und verfeinert.

## Referenzen

- [1] S. Suárez, A. Devaux, J. Bañuelos, O. Bossart, A. Kunzmann, G. Calzaferri, „Transparent Zeolite- Polymer Hybrid Materials with Adaptable Properties“, *Adv. Funct. Mater.* 2007, 17, 2298-2306.
- [2] V. Rostovtsev, L. G. Green, V. V. Fokin, K. B. Sharpless, „A Stepwise Huisgen Cycloaddition Process: Copper(I)-Catalyzed Regioselective „Ligation“ of Azides and Terminal Alkynes“, *Angew. Chem. Int. Ed.* 2002, 41, 2596-2599.
- [3] A. Devaux, G. Calzaferri, P. Belsler, P. Cao, D. Brühwiler, A. Kunzmann, „Efficient and Robust Host-Guest Antenna Composite for Light Harvesting“, *Chem. Mater.*, 2014, 26, 6878-6885.



# CARACTERISATION DES MODULES PHOTOVOLTAÏQUES A COLORANT DE L'ENTREPRISE G2E

## Annual Report 2014

Author and Co-Authors	J.-F. Affolter, Ph. Morey
Institution / Company	HES-SO / HEIG-VD / IESE (institut d'énergie & systèmes élec-triques)
Address	CP, 1401 Yverdon
Telephone, E-mail, Homepage	+24 55 76 306, <a href="mailto:jean-francois.affolter@heig-vd.ch">jean-francois.affolter@heig-vd.ch</a> , <a href="http://iese.heig-vd.ch/">http://iese.heig-vd.ch/</a>
Project- / Contract Number	SI/500794 / SI/500794-01
Duration of the Project (from – to)	2012 – 2015
Date	18.12.2014

### ABSTRACT

The company "Glass To Energy" (g2e) in Yverdon, is industrializing dye solar panels on the basis of DSC "Grätzel" technology, developed at EPFL.

The panels will be integrated on walls and other building elements.

A solar simulator for measuring the performance of such electrical panels, including an IV measurement tool, is going to be realized.

Then the panels will be installed in real conditions and monitored over a complete year, in order to characterize and have the necessary perspective on this technology.

The project started in October 2012. Since, various electronic loads have been developed for 10x10cm and 60x100cm panels. The schedule is retarded for the measurement structure on the roof.

## Résumé

L'entreprise Glass To Energy (g2e), à Yverdon, industrialise la fabrication de panneaux solaires à colorant sur la base de la technologie DSC « Grätzel » développée à l'EPFL. Les panneaux sont développés pour être intégrés dans des façades et autres éléments construits.

Dans un premier temps il s'agit de mettre en place un simulateur solaire pour la mesure des performances électriques des panneaux, dit outil de mesure IV, I courant, V tension. Cet outil sera dédié à cette technologie et adapté aux tailles de panneaux réalisés par g2e.

Ensuite il est prévu d'installer des panneaux en condition réelle et de les suivre sur une année complète, afin d'avoir le recul nécessaire sur cette technologie et d'en établir les caractéristiques.

Le projet a démarré en octobre 2012. Depuis, deux charges électroniques ont été développées, spécifiques aux panneaux de taille 10x10cm et aux panneaux de taille 60x100cm. Un support climatisé pour le test des cellules 10x10cm a été réalisé. La partie test en conditions réelles est retardée ; les développements côté charges et mesures sont développés mais l'entreprise g2e a subi du retard dans la fabrication des panneaux. L'installation sera montée et les mesures réalisées dès que ceux-ci nous seront parvenus.

## But du projet

L'objectif de l'entreprise g2e est de favoriser l'utilisation de la technologie DSC et de développer un produit industriel de grande taille à intégrer dans les façades. Le produit est développé en fonction des besoins du marché en partenariat avec de grands industriels façadiers. La perspective est pragmatique et délibérément orientée vers des applications concrètes. L'atout principal de cette technologie est sa transparence, sa flexibilité dans le design et le choix des couleurs.

Les panneaux DSC de type industriel issus de la fabrication g2e ne sont pas encore connus, les cellules doivent donc être caractérisées de manière à établir leurs performances.

Dans un premier temps il s'agit de mettre en place un simulateur solaire pour la mesure des performances électriques des panneaux, dit outil de mesure IV, I courant, V tension. Cet outil sera dédié à cette technologie et à cette taille de panneaux.

Ensuite il est prévu d'installer des panneaux en condition réelle et de les suivre sur une année complète, afin d'avoir le recul nécessaire sur cette technologie.

A partir de ces campagnes de données, il sera possible de faire des modèles afin de les rendre exploitables par les logiciels de simulation photovoltaïque classiques de type PVSyst.

Puisque la technique est orientée vers l'intégration aux bâtiments, il s'agira ensuite de créer un logiciel de simulation dédié, pour les acteurs du domaine tels les architectes, les énergéticiens mais aussi des services techniques des administrations ou des entreprises. Le rôle de la HEIG VD sera ici de constituer la base de donnée nécessaire au futur développement d'un tel logiciel.

## Travaux effectués et résultats acquis

Les travaux effectués peuvent être résumés de manière suivante:

- 9.10.12 démarrage du projet (kick-off meeting avec l'entreprise g2e le 8.11.12)
- Octobre à décembre 2012: réalisation des charges électroniques passives et de l'acquisition
- Année 2013: conception et réalisation d'une électronique passive permettant la mise en charge et la mesure/acquisition de 25 panneaux solaires « g2e » de manière simultanée. Conception d'un plateau climatisé (-10 à +90°C) et d'une charge électronique active permettant des tests étendus des cellules 10x10 cm. Etude pour la réalisation d'une charge active pour les panneaux 60x100cm.
- Année 2014: Construction de la structure permettant d'accueillir 17 panneaux g2e et 7 panneaux de référence. Réalisation du plateau thermique/charge active pour les panneaux 10x10 cm. Achat et programmation d'une charge active permettant de caractériser les panneaux 60x100 cm.

## Structure "Dôme"

La structure illustrée à la *figure 1* a été conçue et montée sur le toit de la HEIG-VD. L'électronique précédemment développée ainsi qu'un système d'acquisition ont été placés dans un coffret au centre de la structure. Le système contrôle le point de fonctionnement de tous les panneaux, soit en parcourant leurs courbes IV ou en cherchant le point de fonctionnement maximum (MPPT).



Figure 1 : Structure "Dôme" permettant d'accueillir 17 panneaux g2e

Lors d'une mesure, la tension, le courant, la température de chaque panneau sont relevés ainsi que le rayonnement direct et diffus. Le système a été programmé de façon à ce qu'il fonctionne tout le temps en MPPT et relever périodiquement les courbes IV. Le point de fonctionnement maximum est relevé toutes les 10 secondes et la courbe IV est relevée toutes les 20 minutes. Toutes les données sont automatiquement enregistrées sur une base de données MySQL sur un serveur de la HEIG-VD.

Quatre panneaux ont été fournis par g2e au début de l'année, mais ils ont rapidement montré des signes de faiblesse. La première faiblesse constatée fut la caractéristique IV relevée (figure). La deuxième faiblesse est que des problèmes d'étanchéité ont été constatés. En effet, des bulles d'air se sont infiltrées dans les cellules, ce qui a encore dégradé leurs performances.

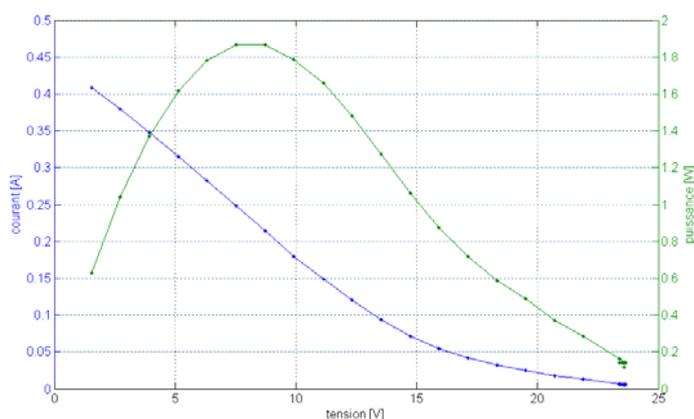


Figure 2 : Caractéristique typique relevée et illustration des infiltrations d'air

La figure ci-dessus montre une allure typique de caractéristique relevée. Dans le cas présent, les mesures ont été faites le 20 mars 2014, à 11h34 et l'irradiation globale était de  $640 \text{ W/m}^2$ . Cette caractéristique ressemble à celle d'une source de tension avec une résistance en série.

Les panneaux ont depuis été repris par g2e. Aucun autre panneau n'a été livré.

## Charge électronique active avec contrôle de la température

Afin de caractériser les cellules de développement de 10x10 cm, un plateau thermique ainsi qu'une charge active ont été développés. La plage de fonctionnement de la charge active est de  $\pm 10$  V et  $\pm 0.5$  A. Ceci permet de caractériser entièrement les cellules, éclairée ou non. La plage de fonctionnement du plateau thermique, initialement été fixé de  $-10$  à  $90^{\circ}\text{C}$ , a dû être légèrement revue à la baisse ( $5$  à  $90^{\circ}\text{C}$ ) à cause du désir de g2e de ne pas avoir un système avec un refroidissement liquide. Cependant, la plage initialement prévue a facilement été atteinte sur un prototype créé et refroidi à l'eau.

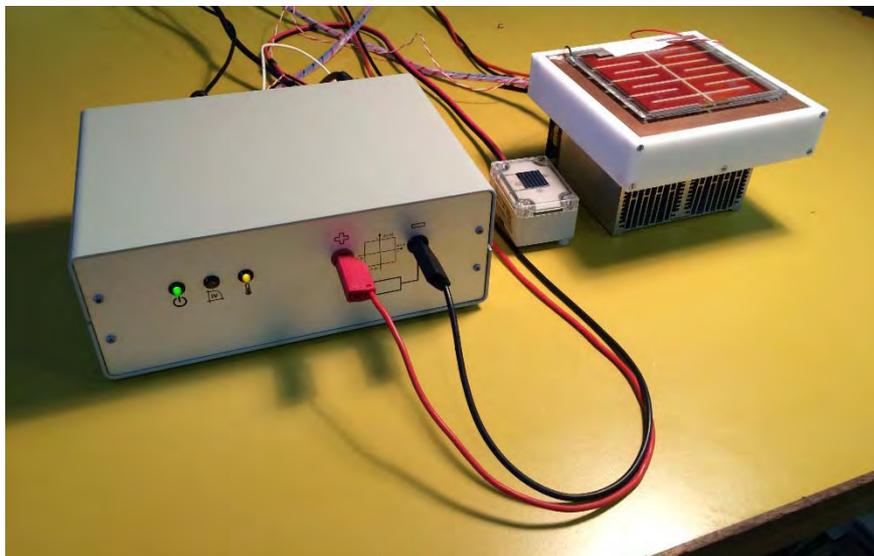


Figure 3 Illustration de la charge active et du plateau thermique

La charge ainsi que le plateau thermique sont contrôlés à l'aide d'une interface LabVIEW, illustrée à la figure 4.

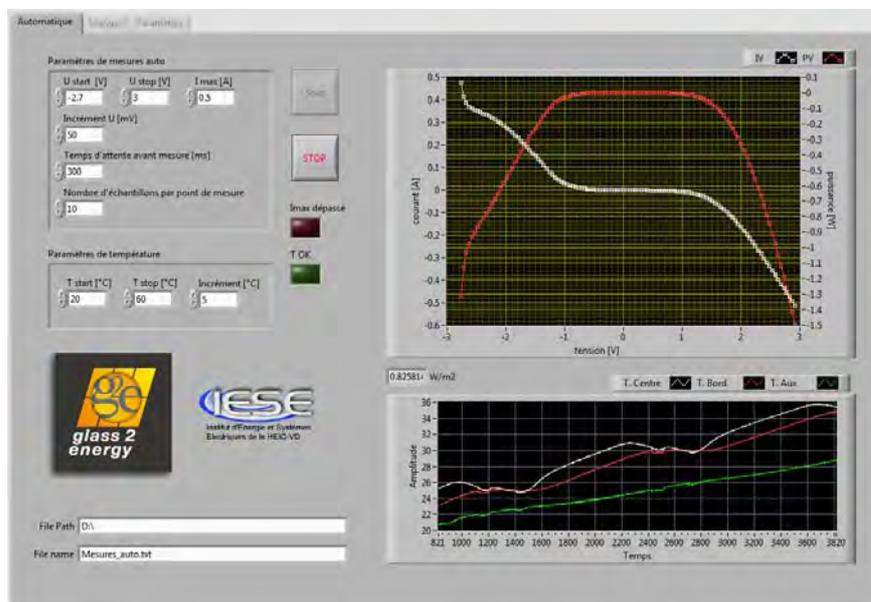


Figure 4 Interface LabVIEW pour contrôler la charge active et le plateau thermique

Deux modes ont été intégrés dans l'interface : Un mode manuel, où le plateau thermique et la charge sont contrôlés pleinement par l'opérateur, laissant la totale liberté à celui-ci. Un mode automatique, où tous les paramètres sont fixés à l'avance, se charge de faire la série de mesures, déchargeant l'opérateur de cette tâche. La figure 5 illustre des résultats de mesures de la caractérisation en température, dans l'obscurité, de la cellule visible sur la figure 3.

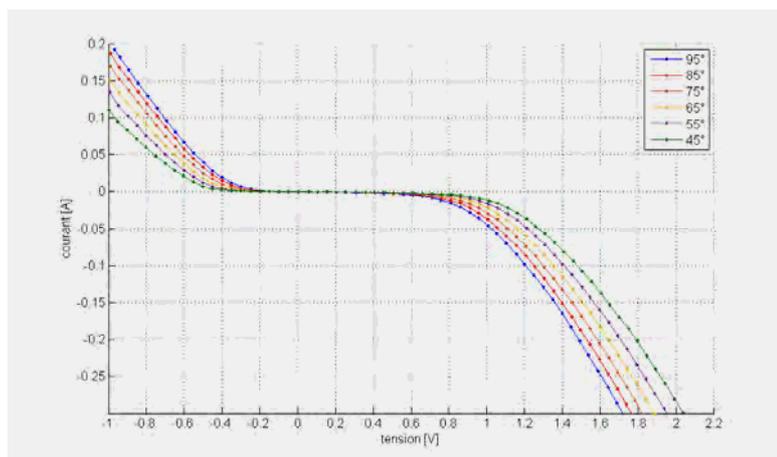


Figure 5 Caractérisation en température d'une cellule dans l'obscurité

### Charge électronique active pour des panneaux 100x60 cm

Une charge électronique pouvant fournir  $\pm 60$  V et  $\pm 10$  A a été étudiée. Il a été déterminé, que malgré les faibles options offertes par le marché, une alimentation quatre cadrans BP4610 de chez NF Corporation devrait pouvoir accomplir la tâche demandée. Celle-ci fut donc achetée. Le contrôle de l'alimentation se fait à l'aide d'une interface LabVIEW, laquelle a dû être spécifiquement développée pour caractériser les modules photovoltaïques.

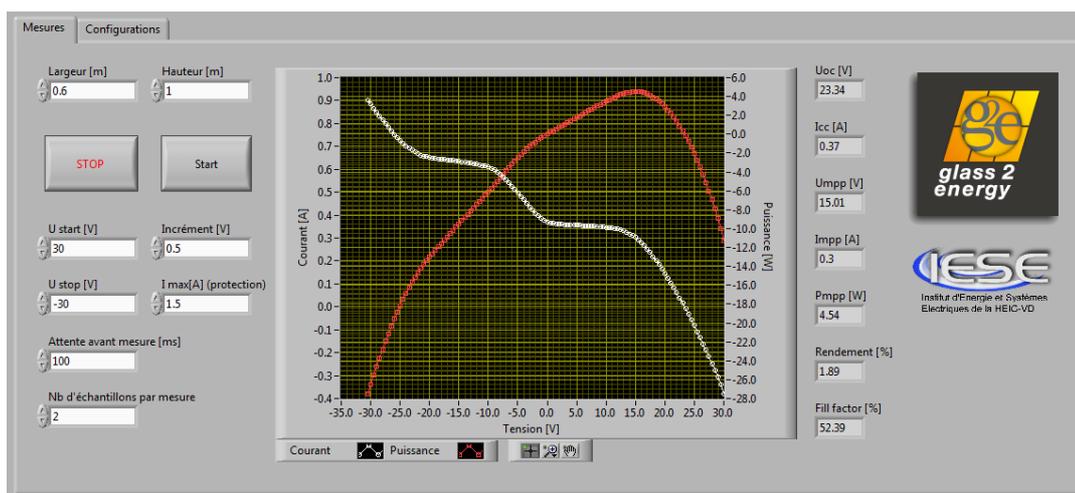


Figure 6 Interface LabVIEW pour contrôler l'alimentation quatre cadrans

La résolution de mesure de l'alimentation quatre cadrans s'est montrée trop imprécise pour les mesures effectuées sur les panneaux photovoltaïques (0.1V et 0.01A). Un boîtier externe avec un système d'acquisition à haute résolution, réalisé spécialement, a donc été ajouté afin de permettre une mesure à 0.001V et 0.0001A. Par la même occasion, une mesure de température du module a été ajoutée.



Figure 7 Illustration du banc de test de panneaux avec l'alimentation quatre cadrans

### **Collaboration nationale**

Cette collaboration ainsi que les éléments développés sont régulièrement présentés par l'entreprise g2e aux investisseurs et partenaires de l'entreprise.

### **Collaboration internationale**

Aucune collaboration internationale n'a été établie pour le moment dans le cadre de ce projet spécifique.

### **Évaluation de l'année 2014 et perspectives pour 2015**

Les charges électroniques pour deux types de panneaux ont pu être développées fin 2012, ainsi que le logiciel d'acquisition des courbes IV. Celles-ci fonctionnent à satisfaction, et ont déjà permis à l'entreprise g2e d'effectuer des contrôles de base.

L'année 2013 a vu la conception et la réalisation d'une électronique passive permettant la mise en charge et la mesure/acquisition de 25 panneaux solaires « g2e » de manière simultanée. Toutefois, le montage des panneaux g2e sur le toit et leur branchement à ce système a dû être retardé, faute de panneaux disponibles. L'entreprise souhaite attendre et tester un meilleur lot, fabriquée avec de nouveaux produits, présentant de meilleures caractéristiques. D'entente avec g2e, il fut convenu d'installer/mesurer le plus vite possible déjà 5 panneaux, à placer dans les positions principales E, S, O, N et horizontalement. Les 12 autres prévus (sur 17) auraient dû être placés au printemps 2014 ; nous sommes encore en attente des panneaux.

L'intégration du contrôle de température (-10 à +90°C) et de la charge électronique active permettant des tests étendus ont été réalisés pour les cellules 10x10 cm. La réalisation d'une charge active pour les panneaux 60x100 cm est terminée.

La priorité pour l'année 2015 est l'installation des panneaux dans l'installation de test «outdoor» en conditions réelles, les mesures et leur analyse. Nous espérons dégager des résultats en 2015. La prolongation du projet jusqu'à avril 2015 s'est avérée nécessaire.



# PHOTOVOLTAIK IM VERBUND MIT DÄMM- STOFF FOAMGLAS

## Annual Report 2014

Author and Co-Authors	Eric Langenskiöld, Michael Stoll
Institution / Company	Pittsburgh Corning (Schweiz) AG
Address	Schöngrund 26, 6343 Rotkreuz
Telephone, E-mail, Homepage	+41 44 387 13 86, <a href="mailto:eric.langenskiold@baslerhofmann.ch">eric.langenskiold@baslerhofmann.ch</a>
Project- / Contract Number	SI/500582 / SI/500582-01
Duration of the Project (from – to)	Dezember 2010 – Dezember 2013
Date	15. Dezember 2014

### ABSTRACT

As a pure electrical power producer, the photovoltaic technologies are established. The development of "In-roof-systems" has proved to be effective. Besides the electrical power production, in-roof-systems serve also as roof panels and water protection. Unknown are systems, where the photovoltaic in addition to the power production and the water protection has the function of thermal insulation. The scope of this project is the development and realisation of building integrated photovoltaic (BIPV) including the feature of thermal insulation. A pilot plant with modules combined of photovoltaic modules and Foamglas insulation has been built.

The project "Photovoltaic with Foamglas insulation" was initiated in spring 2010 and was started officially in December 2010. In 2011 the market requirements and main concepts have been elaborated. In 2012 and 2013 the concepts have been detailed and proved in various tests such as, climate test (TC200) mechanical tests and efficiency test indoor and outdoor. Furthermore, a pilot project has been realized in 2014.

Following results were achieved in 2014:

#### Pilot Project

- A pilot project at Oerlikon AG was agreed. But Oerlikon sold its solar division to Tokyo Electron Limited (TEL) and one year later TEL decided to close the solar division.
- Another pilot project has been evaluated and built in Beromünster in Nov. 2014. The whole logistic and pre-manufacturing chain has been established. The potential of a competitive cost structure could be verified. Valuable learnings regarding practical details have been collected.

Targets for 2015:

- It is planned to start with the measuring of the performance of the pilot plant in January 2015 and collect the data till December 2015

## Pilotanlage

Es konnte in Beromünster auf dem Areal des ehemaligen Landessenders eine Pilotanlage mit 50 m<sup>2</sup> gebaut werden. Das Areal wird für Kunstausstellungen und Events genutzt. Der Bauherr ist die Firma BE Netz AG, einer der marktführenden Schweizer PV-Installateure.



Bild 1: Ansicht der fertigen Anlage

## Anlagedaten

DC Leistung	3,3 kW
Ausrichtung	40° westliche Südabweichung
Module	30 Stk. 1.1 x 1.3 m Bosch $\mu$ -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 <sup>2</sup>
Datenerfassung	SE1000-CCG

Tabelle 1: Anlagedaten

## 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.

## Montage auf der Baustelle

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



Bild 2 und 3: links: Auftragen des Klebers auf der Rückseite des PV-Foamglasmoduls; rechts: Auftragen der seitlichen Abdichtung mit Karausche. Zwei einfache Blechanker 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 gemacht werden.

Am Ende werden die Fugen abgedichtet.

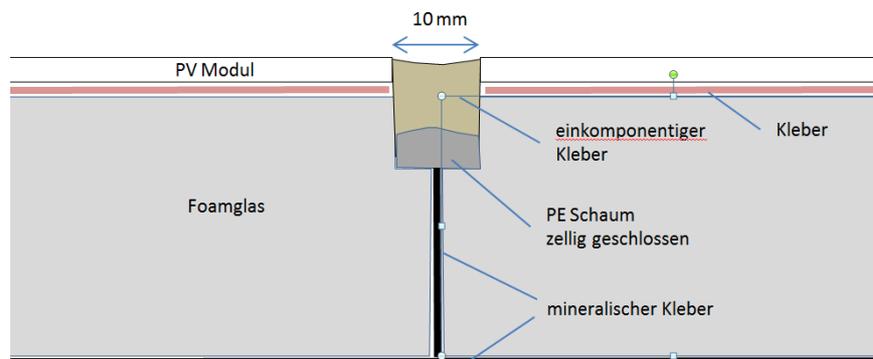


Bild 4: Schnitt eines Stosses von zwei PV-Foamglasblöcken

## Beurteilung

### Beurteilung der Anlage

-	Fugenkreuze	Diese wurden im Pilot unschön. Grund: einige Module hatten sich durch falsche Lagerung bei Aushärten verschoben. Weiter war die Wand nicht eben.
--	Ebene	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 Undichtigkeiten 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 bei Bruch erwartet. Durch die mechanische 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 bei Hinterlüftung nicht mehr Energieertrag auf.
++	Kältebrücken	Vorgehängte Fassaden weisen oft Kältebrücken auf, welche die Dämmwerte erheblich vermindern. Dies ist bei der vorgestellten Foamglas-PV-Fassade nicht der Fall.

### Beurteilung des Prozesses

+/-	Planung	Der Planungsprozess ist vergleichbar mit dem einer anderen PV-Fassade
- (+)	Foamglas vorbereiten	<p>Industrielle Werkzeuge wurden eingesetzt für</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Foamglasblöcke auf Grösse zuschneiden</li> <li>- Seitennut</li> <li>- Aussparung für Modulanschlussdose, Modulkabel, Stecker</li> </ul> <p>Grosses Vereinfachungspotential ohne grosse Investitionen ist möglich (siehe Verbesserungsvorschläge)</p>
(+)	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 sehr 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, so muss die Dämmung unter dem Modul zerstört und ausgekratzt werden. Ein neues PV-Foamglasmodul muss eingepasst und eingeklebt werden.

### Beurteilung Kostenstruktur

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

	Dicke mm	Material		Verbrauch /m <sup>2</sup>	EUR Mat.	Arbeit		Total	
		EUR / Einheit				Min.	EUR h	EUR / m <sup>2</sup>	%
Fläche: ca.536 m <sup>2</sup>									
Foamglas Kleber	3,0	2,38	4,00	kg	9,52	5,0	6,67	16,19	4%
Dämmstoff , dampfdicht	180,0	86,00	1,00	m <sup>2</sup>	86,00	30,0	40,00	126,00	29%
Dämmstoff , dampfdicht	100,0	47,00	1,00	m <sup>2</sup>	47,00		-	47,00	11%
Kleber für PV Modul und Foamglas	3,0	10,00	3,00	kg	30,00		-	30,00	7%
PV Modul 110 x 130 cm	8,0	120,00	0,00	m <sup>2</sup>	-	60,0	80,00	80,00	18%
mechanische Befestigung		2,00	4,00	St	8,00	8,0	10,67	18,67	4%
Modul an die Fassade kleben					-	60,0	80,00	80,00	18%
Verfugung		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/m<sup>2</sup>**

Die obige Tabelle zeigt die Kostenstruktur eines Aufbaus mit einer 28 cm dicken 2-lagigen Foamglasdämmung auf einer eher unebenen Wand. Das Kostentotal liegt bei 525 CHF/m<sup>2</sup>. Die Kosten der PV-Module sind im obigen Kostenvergleich nicht eingerechnet.

Ein einlagiger Aufbau mit z.B. 10 cm Dämmung wäre um 30 % günstiger und läge bei 370 CHF/m<sup>2</sup>.

Nimmt man z.B. die Modulpreise von micromorphen Silizium Glas-Glas-Modulen z.B. der Firma Next-Power so kämen noch 100 CHF/m<sup>2</sup> für 120 Wp/m<sup>2</sup> dazu. Vergleich zu anderen vorgehängten Fassaden:

Typ	Beispiele	m <sup>2</sup> Kosten schlüsselfertig OHNE Dämmung
Vorhängefassade ohne PV		
Holz	Sägerohe offene Holzriemen 21mm, Breite 5-8cm, horizontal verlegt, Roggenmehl-Holzlasier, schwarzes Winddichtpapier	CHF 150.00
Verputzte Trägerplatten	System H6 Sarna-Granol, fugenlos verputzt	CHF 150.00 bis 175.00
Blech	2mm abgekantete 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

Quelle Basler & Hofmann AG

In der obigen Tabelle sind die Kosten der Dämmung nicht eingerechnet. Sie werden auf 70 -100 CHF/m<sup>2</sup> 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 innenseitig vergrössert werden. Und drittens, dass die Langlebigkeit von Foamglas in der Fassade bedeutend höher ist als bei anderen Dämmungen.

### Leistungsbeurteilung

Die Anlagenleistung des ersten Betriebsjahres wird innerhalb dieses Projektes gegen Ende 2015 ausgewertet. Aufgrund des durchgeführten Deskresearch und einer einjährigen Outdoor Vergleichsmessung ist eine Überraschung in Form von temperaturbedingten Leistungseinbussen eher unwahrscheinlich.

### Verbesserungsvorschläge

Kleinere Module z.B. CIS Module 60 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 Foaglasblöcke 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. Dieser Ansatz bedingt einen 2 lagigen Foamglasaufbau.

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 2. Komponentenklebers (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 ausebnen. Es ist abzuwägen, ob sich das Arbeiten mit zwei dünneren Foamglasschichten lohnt.

## Schlussfolgerungen

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 sehr 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.

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 Moduluswechseln etwas entschärfen. Qualitativ ist die PV-Foamglasfassade gegenüber anderen PV-Fassaden aufgrund der hochwertigen Dämmung überlegen.



# POTENTIALEVALUATION DER KOMBINATION SOLAR & WÄRMEPUMPE UND BETRIEBSOPTIMIERUNG MITTELS MONITORING EINER GROSSANLAGE SOLAR REGENERIERTER ERDSONDENFELDER

## EINBINDUNG VON PV/T KOLLEKTOREN IN ERDSONDENGEGEKOPPELTE WÄRMEPUMPEN-SYSTEME

Annual Report 2014

Author and Co-Authors	Aleksis Baggenstos
Institution / Company	Institut für Solartechnik SPF
Address	Oberseestrasse 10, 6840 Rapperswil
Telephone, E-mail, Homepage	0552224821, <a href="mailto:aleksis.baggenstos@spf.ch">aleksis.baggenstos@spf.ch</a> , <a href="http://www.spf.ch">www.spf.ch</a>
Project- / Contract Number	SI/501010-01
Duration of the Project (from – to)	29.1.2014 - 31.6.2019
Date	10.12.2014

### ABSTRACT

In this project the building heating system: ground source heat-pump is coupled with a PVT low-temperature solar plant and equipped with a measurement and monitoring system. The data analysis helps to optimize the system integration of PVT plants for buildings and obtain long-term experience of ground source regeneration with solar thermal fields and optimize the control of this technology.

## Einleitung / Projektziele

### Allgemein

Die nachhaltige Siedlung Oberfeld [1] in Ostermundigen ist ein Bauprojekt nach Minergie-P Standard. In diesem Bauprojekt wurde eine zukunftsgerichtete Lösung der Wärmeversorgung mittels Kombination von Solar und Wärmepumpe realisiert. Jedes der drei Gebäude A, B und C besitzt sein separates Heizungssystem bestehend aus Wärmepumpe, Erdsondenfeld und Hybridkollektor Solaranlage. Die Niedertemperaturwärme aus den Hybridkollektoren wird im Sommer zur Regeneration des Erdsondenfeldes eingesetzt.



1 Abb. Pressebilder Überbauung Oberfeld. Quelle: <http://wohnenimoberfeld.ch/web/rubriken/downloads>

Die Realisierung dieser Pilotanlage dient dazu, Erfahrung für die kommerzielle Anwendung von PVT Anlagen zu gewinnen, weiteres Entwicklungspotential auf der technischen Ebene zu identifizieren und Erkenntnisse für die Auslegungsplanung und den Betrieb mit Erdwärmesondenfeldern zu gewinnen.

Neben den reinen Leistungsdaten werden auch Erkenntnisse zu technischen und praktischen Aspekten gewonnen, wie z.B. Verschaltung der Kollektoren, effiziente Montage, Anbindung an bestehende oder neue Gebäudetechnik, sowie Schnittstellen zwischen den einzelnen Installationsunternehmen. Mit den Messdaten dieses Pilotprojekts können simulierte Werte anhand von Messungen überprüft werden.

### Projektziele insgesamt

- Erkenntnisse über die langfristige Temperaturentwicklung und das Verhalten des Erdsondenfeldes bei dessen Regeneration
- Regelungstechnische Gesamtanlagenoptimierungen.
- Auslegungs- und Betriebserfahrungen für weitere (Gross-)Anlagen der Systemkombination Wärmepumpe und solarthermisch regeneriertem Erdsondenfeld
- Systemintegration von PVT Anlagen in der Gebäudetechnik, Planungs- und Installationstechnisches Optimierungspotential eruieren.

### Projektziele Berichtsjahr

Aufgrund der Datenauswertung erwarten wir im Frühling 2015 Ergebnisse aus der Heizsaison 2014/2015 in folgenden Bereichen:

- Installation Messdatenerfassung
- Bruttowärmeertrag der Solaranlage in der Heizperiode
- PV-PVT Temperaturen und resultierender elektrischer Mehrertrag in der Heizperiode
- Temperaturentwicklung im Erdwärmesondenfeld herbeigerufen durch die Heizperiode

## Kurzbeschreibung der Anlage / des Monitorings

Die Solardachanlage von Haus B besteht aus 379 Hybridkollektoren (606.4 m<sup>2</sup>) des Typs Meyer Burger Hybrid 260/900. Das Flachdach wurde mit einem Montagesystem von K2 ausgerüstet, das die Hybridkollektoren mittels Laminatklebungen in einer horizontalen Ebene ausrichtet (Modulneigung 0°).

Die Hybridkollektoranlage besitzt eine elektrische Leistung von 98.5 kWp und eine thermische Nennleistung von 341.1 kWp.

In diesem Monitoring Projekt wurde das Heizungssystem, die Solardachanlage 392 PVT Kollektoren und die 14 Erdsonden von Haus B (U-Gebäude) mit einem Messsystem ausgestattet. Die Messkonzeption, Inbetriebnahme des Messsystems sowie Begleitung und Datenauswertung wird durch das SPF gewährleistet. Die Erkenntnisse werden mit Meyer Burger evaluiert und die Optimierung der Anlage durch das EWB vorgenommen. Die Erkenntnisse der Anlage in Haus B können direkt auf die Anlagen von Haus A und C übertragen werden.



2 Abb. Haus B Grundansicht mit Teildächern 1-7. Quelle: Meyer Burger Projektdokumentation

Das Messsystem ist getrennt vom restlichen Gebäudetechniksystem und arbeitet mit eigenen Sensoren. Eine negative Beeinflussung der Anlage und dessen Steuerung ist somit nicht gegeben.

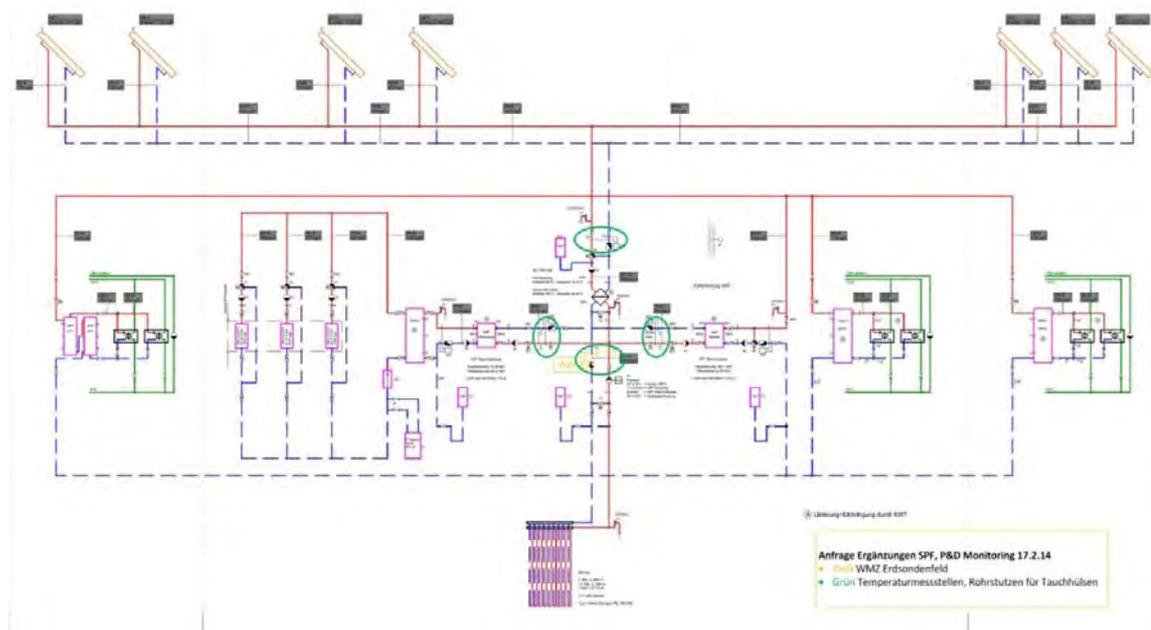
Mitte Juli 2014 ist das Messsystem vollständig in Betrieb genommen worden und erfasst seither die Daten der Anlage.

### Datenerfassung

Mit dem installierten Messsystem werden die Meteorologischen Daten wie Temperatur, Wind und Globalstrahlung erfasst. Die Volumenströme und Temperaturen der Solaranlage, des Erdsondenfeldes, sowie der beiden Wärmepumpen für Brauchwarmwasser und Heizung primärseitig gemessen.

Im Rahmen dieses Monitorings wird neben der Wärmeversorgung auch der direkte Vergleich eines PV-Moduls mit einem PVT-Kollektor betrachtet. Diese sind nebeneinander installiert und separat an unabhängige Modulwechselrichter angeschlossen. Die elektrischen Leistungen und die rückseitigen Oberflächentemperaturen dieser beiden Module werden erfasst.

## Schema



3 Abb. Prinzipschema Wärmeerzeugungssystem Haus B.  
Quelle: EWB EnergieWasserBern (contractor)

Die Abbildung 3 zeigt das Prinzip-Schema von Haus B. Die grün markierten Bereiche zeigen die Messstellen für die Volumenmessung und die Temperaturerfassung an. Es werden jeweils die Vor- und Rücklauftemperaturen erfasst. Dies bei der Solaranlage, dem Erdsondenfeld und den beiden Wärmepumpen (je eine für Heizung und Brauchwarmwasser).

## Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse

### Installation, Inbetriebnahme Monitoring

Das Messsystem wurde im Juni 2014 installiert. Im Technikraum von Haus B wurde ein Schaltschrank eingebaut. In dem Schaltschrank befindet sich das komplette Datenerfassungssystem, Messrechner und die Hardware zur Datenübermittlung (). In (Abb. 5) ist die Steigzone auf Dach 4 zu sehen, sowie Messen Sensorik für Metedaten.



4 ABB. Schaltschrank im Technikraum für die Datenerfassung, Quelle: SPF, Aleksis Baggenstos



5 ABB. Verkabelung Sensoren auf dem Dach, Steigzone Dach 4. Quelle: SPF, Aleksis Baggenstos

Auf dem Dach 4 wurden zwei Module (ein PV, ein PVT) aus dem ursprünglichen elektrischen String herausgenommen und über separate Modulwechselrichter an das Stromnetz angeschlossen. Die beiden Module wurden mit Temperatursensoren an der Modulrückseite ausgestattet. Fünf Temperaturfühler wurden am PVT Kollektor (6) und drei am PV-Modul (7) installiert.

Mit den Temperaturen und den Modulwechselrichtern ist eine differenzierte Betrachtung der elektrischen Leistung und Ertrages möglich. Dies z.B. in Abhängigkeit der Modulrückseiten Temperatur.



6 ABB. PVT Modul,  
5 Temperatursonden an der Rückseite

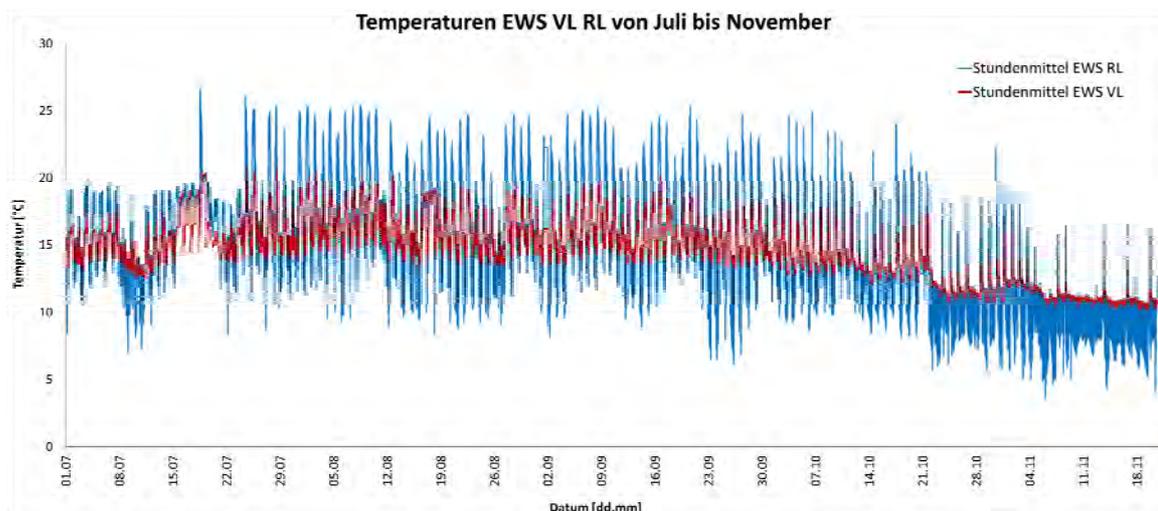


7 ABB. PV Modul,  
3 Temperatursonden an der Rückseite

### Auswertung

Aussagekräftige Resultate zur Anlage werden nach Abschluss des ersten Messjahres im Herbst 2015 erwartet. Eine erste Auswertung der ersten Heizsaison (2014/15) findet im Frühjahr 2015 statt.

Eine erste Betrachtung der Erdwärmesondentemperaturen wurde gemacht. Im folgenden Diagramm (Abb. 8) sind die gemessenen durchschnittlichen (Stundenmittel) Sondentemperaturen Vor- und Rücklauf von Juli 2014 bis November 2014 ersichtlich.



6 Abb. Temperaturverlauf VL und RL des Erdsondenfeldes. Quelle: SPF Aleksis Baggenstos

Die Austrittstemperatur aus dem EWS Feld (VL, rot) ist über den Sommer relativ stabil, sie befinden sich im Bereich von 14-18°C. Ab Herbst speziell ab November ist ein sinkender Temperaturverlauf feststellbar. Ab November liegt die VL Temperatur im Bereich 10-11°C, was mit dem verstärkten Heizbetrieb und dem entsprechenden Wärmebezug aus dem EWS erklärt werden kann.

Gleichzeitig vermindert sich ab November der Wärmeintrag von der PVT Anlage in das Erdwärmesondenfeld. Ersichtlich ist das an den wenigen blauen Peaks ab dem 4.11. verglichen mit den Sommermonaten. Die blauen noch oben ausschlagenden Peaks sind charakteristisch für den Regenerationsbetrieb. Die PVT Anlage lieferte Wärme an das EWS. Die Eintrittstemperatur RL ins EWS Feld ist damit höher als die Austrittstemperatur aus dem EWS Feld. Die begrenzte Regeneration ab November zusammen mit dem erhöhten Wärmebedarf durch das Heizen führt, wie zu erwarten war, zu einer sinkenden Soletemperatur in der Heizsaison.

## **Bewertung 2014**

Die Messdatenerfassung ist installiert und in Betrieb genommen worden. Die Messdaten werden in der Folge validiert und ein Tool zur Messdatenaufbereitung wird entwickelt.

Die Arbeiten verlaufen nach Projektplan

## **Ausblick 2015**

Datenauswertung für das erste Betriebsjahr.

- Bruttowärmeertrag der Solaranlage
- PV-PVT elektrischer Mehrertrag in Abhängigkeit der Modulrückseitentemperatur
- Temperaturentwicklung im Erdwärmesondenfeld
- Erste Regelungstechnische Optimierung der Gesamtanlage

## **Referenzen**

[1] Website: Bauprojekt in Ostermundigen der Wohnbaugenossenschaft Oberfeld. [www.wohnen-im-obefeld.ch](http://www.wohnen-im-obefeld.ch)



# PRODUKTENWICKLUNG PV/T KOLLEKTOR MIT INSTALLATIONSSYSTEM

Annual Report 2014

Author and Co-Authors	Aleksis Baggenstos, Matthias Rommel
Institution / Company	Institut für Solartechnik SPF
Address	Oberseestrasse 10, 8640 Rapperswil
Telephone, E-mail, Homepage	055 2222 4821, <a href="mailto:matthias.rommel@spf.ch">matthias.rommel@spf.ch</a> , <a href="http://www.spf.ch">www.spf.ch</a>
Project- / Contract Number	KTI12606.2
Duration of the Project (from – to)	10/2011 – 12/2014
Date	10.12.2014

## ABSTRACT

The project goal is to develop a low-temperature unglazed PV/T collector and a specially tailored installation system. The starting points for the development are standard Meyer Burger PV modules for the collector and available market components for the installation system. This product should be optimized for use in low-temperature building technology.

## Systemtechnik

---

U. Muntwyler, M. Jost, T. Schott <b>Langzeit-Messung von PV-Anlagen</b> - PV-Langzeitmessung	187
U. Muntwyler, D. Gfeller <b>Prüfstand für Multistring Solarwechselrichter</b> - SI/500900 - SI/500900-01	194
U. Muntwyler, A. Werder, D. Gfeller <b>Akkreditierung des Solarwechselrichter-Testverfahren für Forschungsplattform</b> - SI/501082 – SI/501082-01	198
C. Bucher <b>SmartGrid Eich (SGE) – Zentrale Steuerung von Photovoltaik-Wechselrichtern</b> - SI/501094 – SI/501094-01	203
B. Ruhstaller, K. Pernstich <b>PAIOS+ - Integrierte Messplattform für OLED und Solarzellen R&amp;D</b> – KTI15889.2	209
J. Rohrer <b>Development of Optimization Tools for Large-Scale Photovoltaic Systems with Complex Geometries Considering Direct Reflection of Various Surfaces like Snow and Water</b> – KTI16596.1	210
R. Egli, M. Markstaler <b>Deicing von Photovoltaikanlagen</b> – KTI15759.1	211
D. Marcel, L. Perret <b>Photovoltaïque et neige: Horizon des solutions pour l'installation sur les toits dans les régions enneigées</b> - SI/500568 – SI/500568-01	212
J. Rohrer <b>PVT-Solarkraftwerk Lintharena-sgu: Strom und Wärme vom Dach</b> - SI/501095 – SI/501095-01	226





# LANGZEITMESSUNG VON PV-ANLAGEN

## Annual Report 2014

Author and Co-Authors	Urs Muntwyler, Monika Jost, Thomas Schott
Institution / Company	Berner Fachhochschule, Technik und Informatik
Address	Jlcoweg 1, CH-3400 Burgdorf
Telephone, E-mail, Homepage	034/426 68 11, <a href="mailto:thomas.schott@bfh.ch">thomas.schott@bfh.ch</a> , <a href="http://www.pvtest.ch">www.pvtest.ch</a>
Project- / Contract Number	Langzeit Messung
Duration of the Project (from – to)	1992 -
Date	17.12.2014

### ABSTRACT

Since 1992 the PV LAB of BFH-TI at Burgdorf has carried out several analytical monitoring projects with a continuously increasing number of PV plants. At present time 40 grid connected PV plants are monitored. The purpose of these long-term monitoring projects is to register all relevant influences on energy yield, degradation mechanism, reliability, safety issues and life expectancy of grid-connected PV plants which can not be detected during initial monitoring campaigns of 1 or 2 years. For some of the PV plants, very long monitoring periods of 20 years without gaps are now available.

Within the “energy turnaround 2050”, 20 to 30 Mia SFr. will be invested into the PV technology. This corresponds to an installed power of 10 to 20 GWp. Consequently, the reliability of this technology is very important. The data collection of the PV Lab contains important information about the reliability of PV components during the whole life cycle of the plant. In 2014 a new focus on fire precipitation was added to the project. This is a consequence of a project with the Bernische Gebäudeversicherung (GVB) for the years 2014 - 2016.

The funding of a project of more than 20 years is difficult, because many financing partners can't see the benefit of such a long term measuring of PV plants. But it's exactly the long data series over a complete lifetime of PV power plants that is needed for the engineering of solid PV installations. Actually, the survival of the project is on the edge because of inadequate funding. With the SCCER - FURIES WP1 the long term PV measurement received 2014 a very important financial support.

## Einleitung

Seit 1992 erfasst das PV LAB der Berner Fachhochschule für Technik und Informatik (BFH-TI) die Betriebsdaten von netzgekoppelten Photovoltaikanlagen. Insgesamt werden aktuell über 40 PV-Anlagen in der Messkampagne erfasst. Davon sind 13 PV-Anlagen mit einer Feinmessausrüstung nach Abbildung 1 ausgestattet, welche unabhängig vom Wechselrichter DC- und AC seitig die Leistung, sowie die Einstrahlung, Modul- und Umgebungstemperatur mittels Datenlogger aufzeichnen. Die Daten werden in einer Auflösung von 5-Minuten-Mittelwerten abgespeichert. Bei den restlichen PV-Anlagen wird eine Grobmessung durchgeführt, welche die ins Netz eingespeiste Energie als 15-Minuten-Mittelwerte aufzeichnet. Informationen zur Einstrahlung und Temperatur werden hier von einer nahegelegenen Referenzmeteostation übernommen.

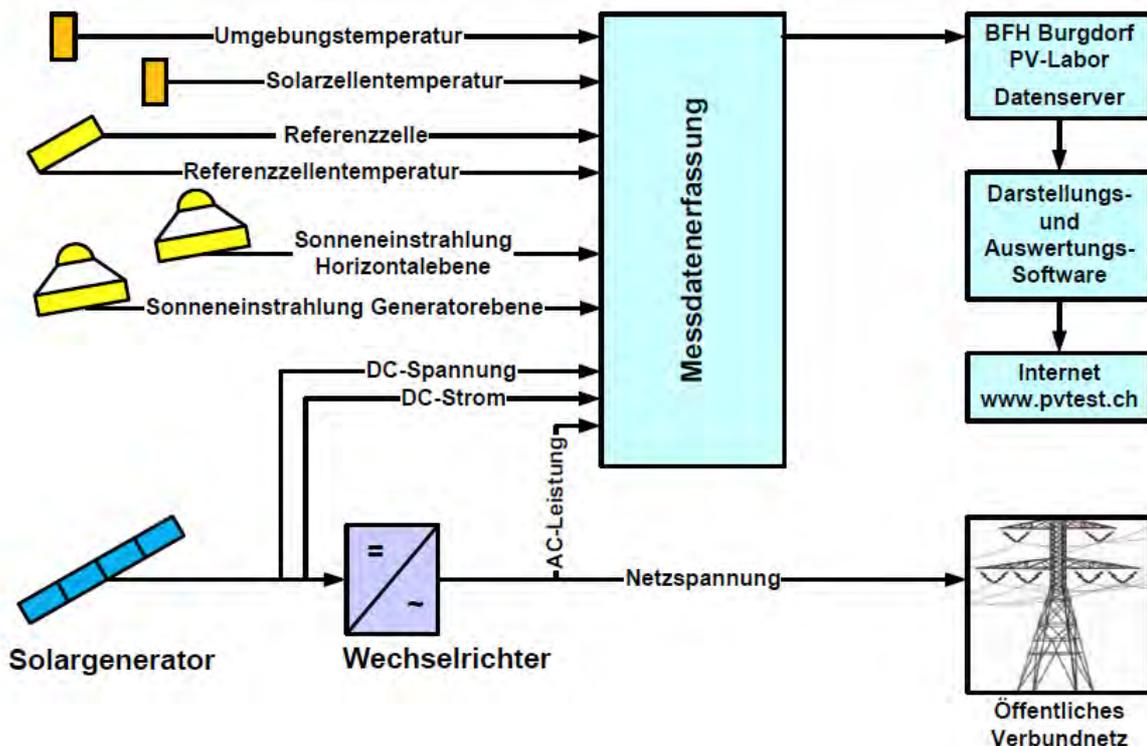


Abbildung 1: Allgemeine Darstellung der Feinmesstechnik einer PV-Anlage

Diese Langzeitmesskampagne wird seit sie begonnen wurde, unterbrechungsfrei geführt. Das Messprogramm gehört zu den weltweit am längsten mit feiner Auflösung geführten Messkampagnen, jedenfalls ist den Autoren keine längere, gleichartige Messreihe bekannt. Aus den Datenreihen des PV-LABs können wichtige Aussagen zur Zuverlässigkeit von PV-Anlagen gewonnen werden. Nur mit Messreihen bis zum Ausfall der PV-Anlagen lassen sich technologiebedingte Probleme von montage- und wartungsbedingten Problemen unterscheiden. Je nach Standpunkt kann ein Wirkungsgradverlust einer Degradation (durch Alterung verursachter Wirkungsgradverlust) oder einer unsachgerechten Montage und Pflege angelastet werden. Nur wenn dank Langzeitmessungen von, unter verschiedenen Bedingungen betriebenen PV-Anlagen, die maximal mögliche Lebensdauer dieser Anlagen bekannt ist, stehen für die Planung und Finanzierung seriöse Aussagen über die Qualität von PV-Anlagen zur Verfügung.

Die Finanzierung eines Projektes über einen Zeitraum von mehr als 20 Jahren sicherzustellen erweist sich als äusserst schwierig. In der Vergangenheit wurde die Messkampagne hauptsächlich durch das Bundesamt für Energie (BFE), der Gesellschaft Mont-Soleil (GMS) und die Localnet AG (Energieversorgung der Region Burgdorf) finanziert. Seit dem Jahr 2010 hat die Messkampagne ernsthafte Finanzierungsschwierigkeiten. Einzig die Gesellschaft Mont-Soleil hat in den letzten drei Jahren das Projekt weiterhin finanziell unterstützt. Es wurde mehrmals vergeblich ein Antrag zur Forschungsunterstützung beim BFE eingereicht. Dies wurde 2014 intensiviert und es wird 2015 ein Projekt im Rahmen des „P+D-Programms“ eingereicht.

Nachdem sich abzeichnete, dass die PV-Langzeitmessung im SCCER – FURIES (Swiss Competence Center für Energy Research – zukünftige Netze) platziert werden kann, wurde diese Finanzierung forciert. Das ermöglichte es, die Langzeit-Messung fortzuführen und sogar auszubauen. Die Mitarbeit

im SCCER-FURIES bedeutete allerdings auch einen erheblichen Mehraufwand. Für die Betreuung konnte mit Thomas Schott (ex Landeshydrologie/ Metas) ein erfahrener Messdaten-Spezialist gewonnen werden. Er wird die Arbeiten von Monika Jost (vormals Münger) übernehmen, welche 2015, im Rahmen des Turnus, die BFH verlassen muss.

Die Messinfrastruktur wurde weiterhin so gut als möglich regelmässig unterhalten, um die Qualität und Kontinuität der Messreihen nicht zu gefährden. Hingegen musste die Auswertung der Messdaten aufgrund der zunehmend prekären finanziellen Projektsituation auf ein Minimum reduziert werden. Anfang 2014 wurde mit der Bernischen Gebäudeversicherung (GVB) eine Zusammenarbeit für ein Projekt mit der Fokus bei der Brandverhütung bei PV-Anlagen vereinbart.

## Kurzbeschreibung der Messinfrastruktur

In Abbildung 1 ist das gesamte Messnetz der Langzeitmesskampagne schematisch dargestellt. Die blau eingefärbten Rechtecke stehen für die PV-Anlagen aus der Feinmessung. Der Anlagenname, sowie die wichtigsten Anlageinformationen sind in den Rechtecken, unter den Nummern 1 bis 5 aufgeführt. Im grün eingefärbten Rechteck sind die Namen aller PV-Anlagen aus der Grobmessung aufgeführt. Die Referenzmeteostation ist rot dargestellt. Bei jeder PV-Anlage sind die vorhandenen Meteo- und Temperatursensoren eingezeichnet. Weiter ist in der Grafik enthalten, wie die Datenübertragung zum Server des PV-LABs stattfindet. Dies geschieht entweder über eine Festnetzverbindung (Analog-Modem, Internet), über das Funknetz (GSM-Modem), oder über direkte Verbindung mit RS232-Schnittstelle zum Server. Die Messdaten von PV-Anlagen aus der Grobmessung müssen vor Ort ausgelesen und manuell in die Datenablage eingefügt werden. Die Daten aus der Feinmessung werden entweder über eine Internetverbindung alle fünf Minuten oder ein Mal pro Tag über eine Telefonverbindung an den Datenserver gesendet. Dieser speichert die Messdaten auf einem internen Laufwerk der BFH-TI ab.

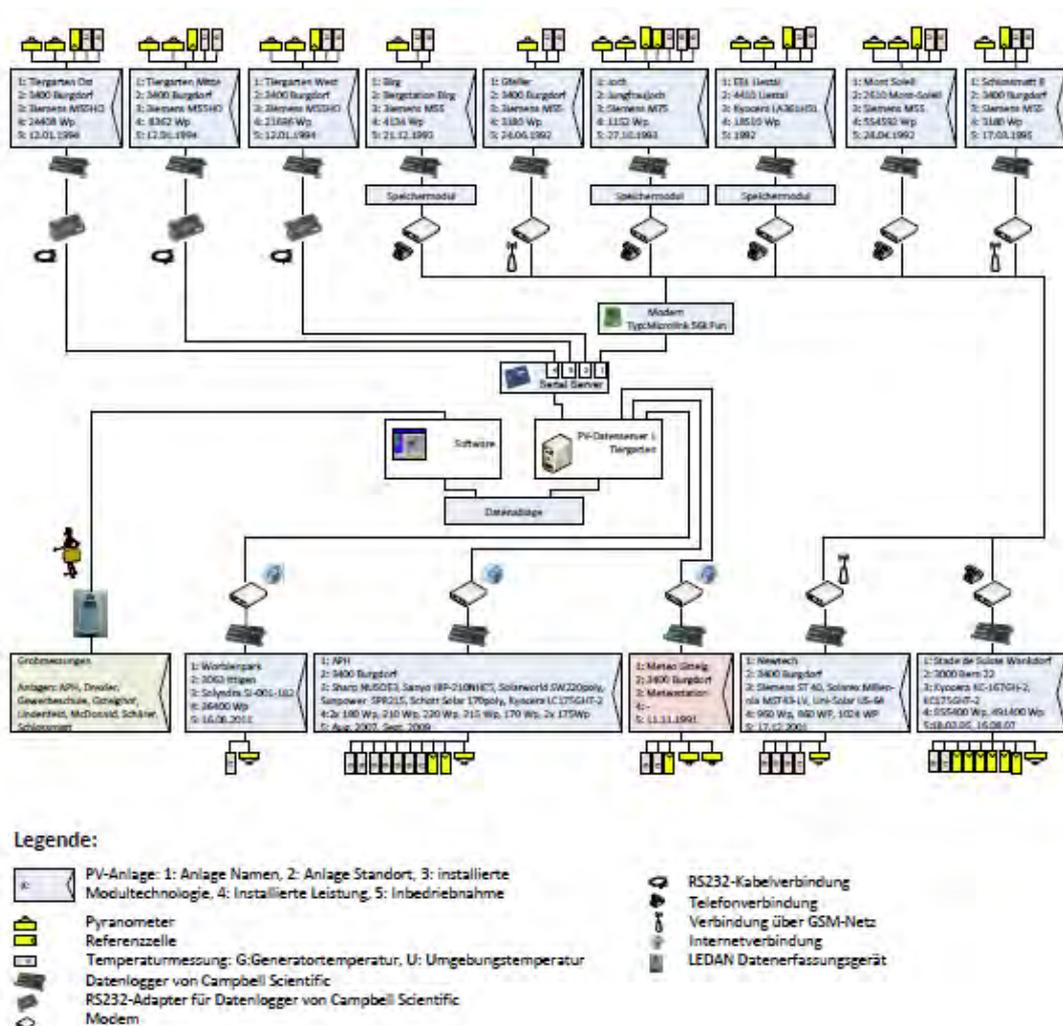


Abbildung 2: Übersicht Messinfrastruktur der Lanzeitkampagne des PV LAB

## Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse 2014

### Neue PV-Anlage mit Feinmessung am Jungfrauoch

Die bestehende PV-Anlage am Gebäude des Hochalpinen Forschungslabors am Jungfrauoch von 1993 mit einer Fläche von 9.65m<sup>2</sup> und einer Leistung von rund 1200Wp, wurde flächenmässig um 13.05m<sup>2</sup> und leistungsmässig um rund 2760Wp ausgebaut. Im Unterschied zur bestehenden Anlage, haben die neuen Panel einen Wirkungsgrad von 21%, weshalb die Vergrösserung der Gesamtfläche um den Faktor 2.3 eine Steigerung der Gesamtleistung um den Faktor 3.3 ergibt. Die Erweiterung wurde gemacht um vor allem drei Fragestellungen untersuchen und beantworten zu können:

1. Vergleich der Technologie der 1990er Jahren mit der der 2010er Jahren
2. Alterung der Silizium-Module mit rückseitenkontaktierten Solarzellen in hochalpiner Umgebung
3. Entwicklung des Anlagenertrages (u.a. PR-Faktor – wir erwarten über 1!)

Wie sich bis jetzt zeigte, sind die PV-Module der ersten Anlage in den 20 Jahren Betrieb bedeutend weniger gealtert, als dies angenommen wurde. Es gibt auch keine Anzeichen, dass sie demnächst ausfallen könnten. Die neue Anlage wurde am 1. Oktober 2014 in Betrieb genommen und funktioniert gut.



Abbildung 3: neue PV-Anlage am Forschungslabor

### Neue PV-Anlagen beim Schulgelände Tiergarten Burgdorf

Auf dem Gelände der Schule am Jlcoweg 1 wurden in den Jahren 2013/2014 insgesamt 3 neue Anlagen aufgebaut und in Betrieb genommen:

1. Ein im Markt eingeführter Carport von 2'700Wp (10 Solarmodulen von je 270Wp) mit einem Wechselrichter von Kaco mit softwareseitig einstellbarer Leistungsbegrenzung wurde zum „Auftanken“ von Elektromobilen auf dem Parkplatz des Schulgebäudes aufgestellt. Die Energie der 2'700Wp reicht für eine Jahresfahrleistung eines E-PKWs von über 15'000 km. Ein Benzinauto würde für die gleiche Jahresfahrleistung ca. 900 Liter Benzin benötigen. Damit substituiert der Solarcarport in seiner gesamten Lebensdauer zusammen mit einem E-PKW über 20'000 Liter Benzin. Die Anlage wird neben Demonstrationszwecken (für Studierende und Externe) auch für „V2X/ PV2X“ (vehicle to X/ PV to X smart grid - Forschungen eingesetzt).
2. Eine PV-Tracker-Anlage von 4'800 Wp in Kombination mit der Carportanlage. Hier kann der Unterschied der Produktion einer 1-achsen-Trackeranlage zu einer fix installierten PV-Anlage direkt gezeigt werden. Jugendliche haben im Mai 2014 diese Anlage mutwillig beschädigt, indem sie sie mit Steinen beworfen hatten. Alle „Treffer“ sind in der Infrarotaufnahmen (Abb. 4) als „hot spots“ sichtbar. Es wurde beschlossen, diese Anlage vorerst, bis zur Reparatur, zu betreiben um Erfahrungen sammeln zu können, wie sich eine beschädigte Anlage verhält. Dank der Langzeitmessung wird man diese, durch Beschädigung, forcierte Alterung dokumentieren können.

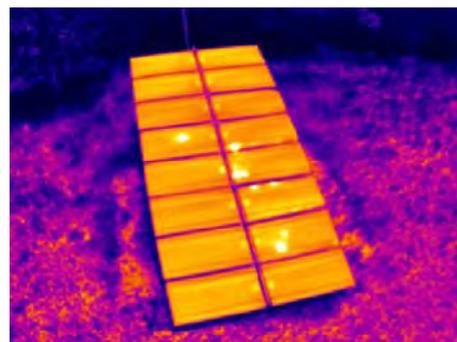


Abbildung 4: hot spots auf defekter Tracker-PV-Anlage

3. Eine neue Anlage von 5'500 Wp wurde auf dem Veloständer aufgebaut. Diese Versuchsanlage dient zur Evaluation von Verschaltungsstrategien bei teilbeschatteten PV-Anlagen. Erste Untersuchungen wurden im Rahmen einer Bachelorarbeit gemacht. Hier wurden Stringwechselrichter (u.a. SMA), Power Conditioner (Solar Edge) und Modulwechselrichter verglichen. Die Anlage dient der Industrie zu Vergleichsmessungen ihrer Produkte (u.a. KTI-Projekt).

### Neues Gerät zur Erkennung und Messung von Hot Spots an PV-Anlage

Mit der steigenden Anzahl von grossen PV-Anlagen auf Hausdächern, steigt auch das Bedürfnis nach fachmännischer Überprüfung der Anlagen auf ihre Funktionstüchtigkeit. Da es gefährlich und teuer ist, nur wegen einer Überprüfungen, auf mögliche Schäden an PV-Anlagen auf Dächer zu steigen, und

dabei zu riskieren, während der Überprüfung neue Schäden an den PV-Module anzurichten, wurde am PV-LAB der BFH ein Konzept mit einer Messdrohne ausgearbeitet. Die Besonderheit an diesem Konzept ist die, dass mit einem Oktokopter eine Infrarotfilmkamera, die zur Temperaturmessung eingesetzt wird, über die PV-Anlage geflogen wird. Das mit der Kamera erfasste bewegte Bild, gibt viel mehr Informationen her, als ein Einzelbild, das mit einer üblicherweise eingesetzten IR-Fotokamera gemacht wird. Die Aufnahme von Bild 4 mit den Hot Spots auf der oben beschriebenen, beschädigten, Tracker-PV-Anlage wurde mit dieser Drohne gemacht. Die BFH-IR Drohne ist schneller in der Fehlererkennung und 3- bis 4-mal günstiger als kommerzielle Drohnen.



Abbildung 5: Oktokopter (Drohne) mit Kamera

### Erneuerung des Datenablaufsystems aus den 90-er Jahren

Im Rahmen einer Master- und einer Bachelorarbeit wurden neue Möglichkeiten für die Abfrage der Messdaten sowie deren Speicherung auf einer MySQL-Datenbank erarbeitet. Es ist geplant, dies 2015 umzusetzen, wenn dafür die Finanzierung gefunden werden kann.

### Verbesserung der Messgenauigkeit der Referenzstation Tiergarten

Zur genaueren Messung der Sonnenleistung mit der Referenzstation Tiergarten auf dem Schulgebäude am Jlcoweg 1, wurde ein Sun Tracker mit Pyrheliometer, Pyranometer und einem Datenlogger, der die notwendige Steuerung enthält angeschafft. In Zukunft können am Jlcoweg die drei Sonnenparameter „Direktstrahlung/ Diffusstrahlung und Globalstrahlung“ erfasst werden. Die bestehende Meteostation auf dem Dach des Schulgebäudes und der neue Solartracker werden zu einer Station zusammengeführt. Ab Anfang 2015 stehen uns alle Luft und Solardaten zur Verfügung, die wir zur Beurteilung der Umwelteinflüsse auf PV-Anlagen als relevanten erachten.



Abbildung 6: Sun Tracker

### Unterhalt der Messinfrastruktur

Die Messinfrastruktur für die Monitoringkampagne wurde, wie in den vergangenen Jahren regelmässig gewartet. Bei der Anlage Tiergarten West wurden zwei Module mit Delaminationen ausgebaut und vermessen. Die beiden Module mit einer Minderleistung von rund 20% konnten dank dem oben beschriebenen Oktokopter mit der Infrarotfilmkamera entdeckt werden.

### Workshops

Zur Verbreitung der Resultate, der Kommunikation mit interessierten Fachkreisen organisierte das PV-Labor im Jahr 2014 zwei Workshops an der BFH-TI in Burgdorf:

1. 20 Jahre hochalpine PV-Anlage Jungfraujoch - Einweihung der neuen Anlage auf dem Jungfraujoch
2. Burgdorf verändert die Welt, 25 Jahre Solarstromvergütung in Burgdorf und was daraus wurde...

Es gelang für beide Veranstaltungen hochkarätige Referenten zu gewinnen. An der Veranstaltung über „hochalpine PV-Anlagen“ referierte u.a. Prof. Dr. Häberlin, der Gründer des PV-Labors der BFH über die Ergebnisse hochalpiner PV-Anlagen. Referenten aus der Industrie wie Thomas Nordmann (TNC), Anton Gunzinger (Swiss Super Computing AG), Stefan Frei (EKZ) und viele mehr beleuchteten das Thema der „hochalpinen PV-Anlagen“ und des Nutzens eines erhöhten Anteils von Winterstrom für die „Energiewende 2050“.

Bei der Jubiläumsveranstaltung zur Solarstrombörse konnten sowohl die historischen Elemente der ersten kostendeckenden Einspeisevergütung für PV-Anlagen als auch die Entwicklung in die Neuzeit dokumentiert werden. Eine Woche vor der Debatte der Energiewende 2050 im Parlament, war die Aktualität der Praxisbeispiele besonders interessant.

Beide Veranstaltungen nahmen Bezug auf die Umsetzung der Energiewende 2050. Die Veranstaltungen verfolgten zwei Ziele, einerseits sollte auf den Pioniergeist der damaligen Promotoren aufmerksam gemacht und aufgefrischt werden, andererseits sollten die Neuerungen und Fortschritte, die sich in den 20 Jahren Photovoltaik ergaben, herausgearbeitet werden. Damit die Energiewende 2050 auch wirklich umgesetzt wird, braucht es nach dem Pioniergeist der letzten 20 Jahre jetzt das Vertrauen der breiten Bevölkerung und der Politiker in die Technologie und das Wissen, dass mit der Photovoltaik ein adäquates Mittel für die Umsetzung der Energiewende zur Verfügung steht. Die Referate der beiden Veranstaltungen können von den TeilnehmerInnen von der PV-Labor-Internetseite heruntergeladen werden. Diverse Medien wie Regionaljournal, NZZ, Berner Zeitung und elektronische Medien berichteten über die Anlässe und das PV-Labor.

## **Bewertung 2014 und Ausblick 2015**

### **Finanzierung**

Seit Mitte 2014 stehen der PV-Langzeitmesskampagne mit dem SCCER-FURIES WP1, sowie dank der neuen Zusammenarbeit mit der Bernischen Gebäudeversicherung (GVB) wieder mehr Mittel zur Verfügung. Dadurch ist es immerhin möglich, das Messnetz auf einem technisch zeitgemässen Stand zu halten.

### **Unterhalt & Ausbau der Anlagenstandorte und der Messinfrastruktur**

Im Rahmen der Unterhaltsarbeiten, werden wo es mit wenig Aufwand möglich ist, die Datenübertragung von Modem auf Internet gewechselt. Einige Messgeräte für Umweltparameter müssen ersetzt und neu kalibriert werden. Am Jungfrauoch ist die Neuinstallation der Messmittel noch nicht abgeschlossen.

Mit zwei Anlagebesitzern, deren Anlagen sich auf „mittlerer Höhe“ befinden (um 2'000mü.M.) sind wir im Gespräch um diese Anlagen ins Messnetz aufzunehmen. Denn zurzeit haben wir nur Anlagen, die tiefer oder höher gelegen sind. Diese Standorte ergänzen den Fokus, der hochalpinen Anlagen mit Anlagen, die einen erhöhten Winterertrag bringen können. Dies ist im Rahmen der „Energiewende 2050“ erwünscht. Hochalpine Anlagen über 2'000m.ü.Meer haben aufgrund der Witterungsverhältnisse hohe Baukosten und es dürfte schwierig sein, dafür eine Baubewilligung zu erhalten.

Ein neuer Aspekt sind die Probleme mit der Schneebedeckung in diesen Höhen. Dazu soll ein Forschungsprojekt gestartet werden. Zur Vorbereitung ist eine zusätzliche Anlage auf der Männlichen-Bahn gebaut worden. Dort sollen erstmals Schneedecken gemessen und Methoden zur Beseitigung des Schnees untersucht werden.

### **Datenablagensystem**

Für die Ablage der gewonnenen Daten muss das mit einer Bachelorarbeit begonnene Projekt weitergeführt werden. Eine sinnvolle Ausgestaltung von Datenspeicherung und Datenveröffentlichung im Sinne eines Service Public muss ausgearbeitet werden. So dass einerseits die Ergebnisse dieser Langzeit-Messkampagne via Internet einer breiten Öffentlichkeit zur Verfügung gestellt werden können. Andererseits sollen vertrauliche Messdaten von laufenden Forschungsarbeiten nur für berechtigte Benutzer zugänglich sein. Das PV-Labor erhielt 2014 verschiedene Anfragen für die Lieferung von Datensätzen zur Evaluation von Solarkatastern. Weiter hat ein Industrieunternehmen die Anlage Mont-Soleil benutzt, um ein Produktionsvorhersage-System zu entwickeln. Diese Unterstützung hat das PV-Labor im Rahmen der Zusammenarbeit der Studiengesellschaft Mont-Soleil SGM gratis geleistet.

### **Oktokopter (Drohne)**

Der Oktokopter der zur Erkennung und Messung von Hot Spots an PV-Anlagen gebaut wurde, soll im folgenden Jahr an allen Anlagen der BFH sowie an weiteren fremden Anlagen angewendet werden. Dadurch sollen weitere Erfahrungen für den optimalen Einsatz dieses Gerätes gesammelt werden. Es wird im Moment geprüft, ob ein Workshop für „PV-IR Drohnen“ einen Mehrwert für die Forschungs- und Industrielandschaft bringen würde. Diese Arbeiten wurden im Rahmen des GVB – Projektes „Brandprävention von PV-Anlagen“ möglich.

## **Lichtbogendetektor**

Im Rahmen des GVB – Projektes „Brandprävention von PV-Anlagen“ wird die Arbeit an der Entwicklung eines Lichtbogen-Detektors weitergeführt. Aktuell arbeitet ein Masterstudent an einer Verbesserung des in der BFH entwickelten Lichtbogendetektors. Für 2015 ist u.a. die Entwicklung eines automatischen Lichtbogen-Generators geplant. Damit sollen Lichtbögen mit definierteren Charakteristika erzeugt werden können.

## **Kontaktqualität von PV-Spezialsteckern**

Ebenfalls im Rahmen des GVB – Projektes „Brandprävention von PV-Anlagen“ sollen Kreuzverbindungen von PV-Steckern untersucht werden, wenn diese von verschiedenen Herstellern vermischt werden. Dies ist ein Qualitätsproblem bei PV-Anlagen, das Brände auslösen könnte.

Im Rahmen des Unterrichts soll die Tauglichkeit auf Brandschutz von Spezialkontakten für die Verbindung der Hochstromleitungen der PV-Module untersucht werden.

## **CAS „Stromproduktion aus neuen erneuerbaren Energien“**

Es ist ein „Certificate of advanced Studies“ für „**Stromproduktion aus neuen erneuerbaren Energien**“ in Planung. Primär sollen alle Bereiche abgedeckt werden, die von der „Energiewende 2050“ angesprochen wird. KursteilnehmerInnen könnten das nötige Wissen erwerben, um sich mit diesen Technologien kompetent auseinandersetzen zu können.

Der Bereich der Photovoltaik und weiterer Produktionsarten werden vom PV-Labor abgedeckt. Für die Bereiche „Netze“ und „Stromspeicher“ sind Kollegen vom Standort Biel engagiert. Das Projekt stösst bei Industrie, Strombranche (u.a. BKW, Swissgrid) auf grosses Interesse. Eine Projekteingabe wurde beim Bundesamt für Energie BFE deponiert. Je nach BFE-Zusage kann 2015 oder 2016 (eher wahrscheinlich) gestartet werden.

## **Studiengänge im Bereich BSc- und MSE mit PV-Bezug**

Die Erkenntnisse der PV-Langzeitmessung fliessen in die Lehrgänge der BSc- und Masterausbildung ein. Es sind dies u.a.:

- Wahlmodul „Photovoltaik“ BFH-TI
- Praktikumsmodul „Photovoltaik“ der BFH-TI
- Vertiefungsmodul „Neue erneuerbare Energietechnologien“ BFH-TI
- Masterkurs MSE Modul „Photovoltaik“ (mit Prof. Dr. Vezzini BFH und Dr. Baumgartner ZHAW)
- Wahlmodul „Nachhaltigkeit für Ingenieure“ BFH-TI
- Vorlesungen bei der AHB (verschiedene Lehrgänge)

Damit ist gesichert, dass die Erkenntnisse der PV-Langzeitmessung auch den Ingenieuren und Architekten von Morgen zukommen.

## **Externe Vorträge und Kurse**

**An verschiedenen Kursen und Ausbildungsgängen werden die Erkenntnisse der PV-Langzeitmessung weiter nach aussen getragen. So u.a.:**

- Halbjährliche Workshops „Plushaus“ von energie-cluster.ch bei der BFH in Burgdorf
- Plushaus-Schulungen von energie-cluster.ch
- Vorträge und Referate an Fachtagungen und auf Einladung (10-20)

So gehen die Erkenntnisse der PV-Langzeitmessung über den Kreis der BFH und der Masterausbildung hinaus.



# PRÜFSTAND FÜR MULTISTRING- SOLARWECHSELRICHTER

Annual Report 2014

Author and Co-Authors	Prof. Urs Muntwyler, Daniel Gfeller
Institution / Company	Berner Fachhochschule, Technik und Informatik
Address	Jlcoweg 1, CH-3400 Burgdorf
Telephone, E-mail, Homepage	034 / 426 68 11, <a href="mailto:urs.muntwyler@bfh.ch">urs.muntwyler@bfh.ch</a> , <a href="http://www.pvtest.ch">www.pvtest.ch</a>
Project- / Contract Number	SI/500900-01
Duration of the Project (from – to)	01.06.2013 – 28.02.2015
Date	01.12.2014

## ABSTRACT

The goal of this project is the development and the construction of a low EMI test bench for research and testing of multistring PV inverters. The test bench shall be able to simulate three independent sub arrays with open circuit voltage of up to 1'000V and maximum power of 11.52kW each. The thermal stability of the generated I/V characteristics shall be sufficiently high to allow measurements of the inverter's MPP tracking accuracy.

In preparation of this project, commercially available systems for the simulation of PV arrays were evaluated. Because none of the evaluated products matched our needs, it has been decided to self-construct the PV array simulator according to our requirements. The major component of this simulator is a powerful, liquid cooled, low drift, controllable linear current source based on latest generation linear power MOSFETs. To achieve good dynamic behaviour and high flexibility, the control and V/I curve generation is realised with a high speed digital circuit based on FPGA and fast, high resolution data converters.

So far, a prototype simulator (only 1 string) has been developed, constructed and tested. However, because the installation of the cooling system requires more time than anticipated, the project is delayed. It is planned that the multistring inverter test bench will be operational by early summer 2015.

## Einleitung

Im Rahmen des Projekts „Prüfstand für Multistring-Solarwechselrichter“ soll ein Testplatz aufgebaut werden, welcher es erlaubt, Solarwechselrichter mit bis zu drei MPP-Trackern vollumfänglich, normgerecht und realitätsnah zu prüfen. Herzstück des Prüfstands bildet ein Solargenerator-Simulator, welcher es erlaubt, drei voneinander unabhängige Solarkennlinien zu generieren. Im Vorfeld des Projekts wurde recherchiert, ob auf dem Markt verfügbare Solargenerator-Simulatoren den hohen Anforderungen für den Einsatz in einem Prüflabor gerecht werden. Keines der untersuchten Geräte vermochte jedoch vollumfänglich zu überzeugen. Die wesentlichen Schwachstellen der kommerziell erhältlichen Simulatoren waren hohe EMV-Störungen, ungenügende Regelgeschwindigkeit, zu kleiner Spannungsbereich und zu hohe Erdkapazitäten. Deshalb wurde entschieden, den benötigten Solargenerator-Simulator selbst zu entwickeln.

Der geplante Simulator besteht aus drei Teilsimulatoren. Davon kann jeder eine Kennlinie mit einer Leerlaufspannung von bis zu 1'000V und einem Kurzschlussstrom von bis zu 32A generieren. Wird eine Kennlinie gemäss EN50530 (Füllfaktor 72%) verwendet, beträgt die maximale MPP-Leistung 11.52kW. Bei höheren Füllfaktoren werden auch Leistungen von über 13kW möglich, womit der Prüfstand über 40kW Solarleistung simulieren kann. Um gute dynamische Eigenschaften zu erreichen und EMV-Störungen zu vermeiden, basiert der Solargenerator-Simulator auf einem linearen Design und verfügt über eine schnelle, FPGA basierte Regelung. Da im Betrieb beträchtliche Verlustleistungen auftreten können, werden flüssigkeitsgekühlte Leistungshalbleiter der neusten Generation (1'500V Linear MOSFET) eingesetzt.

Für die Steuerung des Prüfplatzes im Allgemeinen und des Simulators im speziellen wird eine Software geschrieben, welche es erlaubt, vollautomatische Messprozeduren gemäss EN50530 an Solarwechselrichtern durchzuführen. Daneben werden Programmroutinen implementiert, welche eine manuelle Steuerung der Simulatoren ermöglichen, wie sie beispielsweise für EMV-Messungen oder Sicherheitstest gemäss VDE 0126-1-1 und VDE-AR-N 4105 notwendig ist.

## Kurzbeschreibung des Projekts

Der geplante Solargenerator-Simulator basiert hauptsächlich auf einer leistungsstarken, hochstabilen, steuerbaren Stromquelle, welche durch lineare Power MOSFET realisiert wird. Die Kennlinienerzeugung und die Regelung erfolgen durch eine schnelle FPGA basierte Digitalschaltung. Fig. 1 zeigt das stark vereinfachte Prinzipschema eines Teilsimulators.

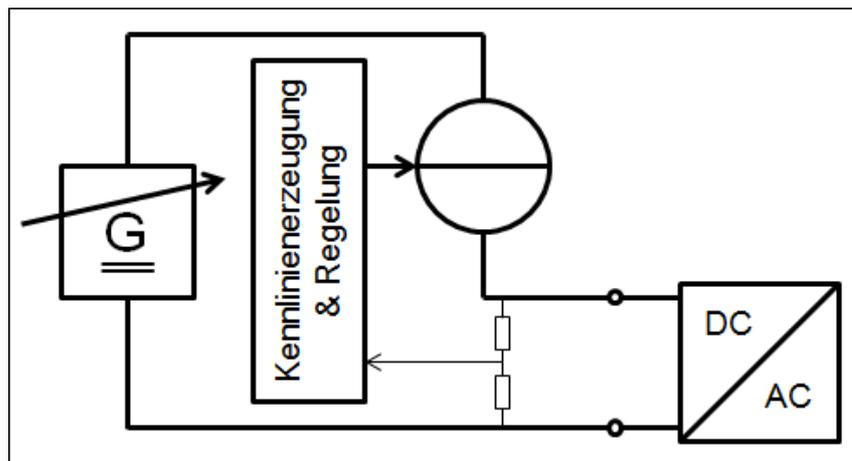


Fig. 1: Prinzipschema eines Teilsimulators

Diese steuerbare Stromquelle ist die Komponente, welche die Qualität des Simulators am massgeblichsten beeinflusst. Die Quelle soll ein schnelles Regelverhalten zeigen, darf aber unabhängig von der angeschlossenen Last nicht schwingen. Damit diese beiden konkurrierenden Eigenschaften erreicht werden können, wird die Quelle ausgangsseitig mit einem ohmsch-kapazitiven Dämpfungsglied beschaltet. Eine Ausgangskapazität ist aber bei einem Solargenerator-Simulator grundsätzlich unerwünscht, weshalb dieses Glied so klein wie möglich gehalten wird. Ein weiteres qualitätsbestimmendes Merkmal der Stromquelle ist die thermische Stabilität des Ausgangsstromes, denn diese wirkt sich direkt auf die Stabilität der Kennlinie aus. Damit Messungen der Trackinggenauigkeit von Wechselrichtern überhaupt möglich sind, darf die Kennlinie des verwendeten Solargenerator-Simulators höchstens um ein Promille driften. Die letzte grosse Herausforderung beim Bau der Stromquelle stellt

die Kühlung der Linear MOSFET dar. Wird im Betrieb der Ausgang des Simulators kurzgeschlossen, fällt die gesamte Spannung über der Stromquelle ab. So können pro Teilsimulator kurzzeitig bis zu 16kW Verlustleistung entstehen. Selbst im Normalbetrieb kann die Verlustleistung etwa 1...4kW betragen. Aufgrund der kompakten Abmessungen der Stromquelle entsteht so eine beträchtliche Leistungsdichte. Deshalb erfolgt die Kühlung der Stromquelle mit einer leistungsstarken Flüssigkeitskühlung.

Die digitale Kennlinienerzeugung und Regelung ist für die Qualität des Simulators ebenfalls sehr entscheidend. Damit ein schnelles Regelverhalten erreicht wird, darf die Reglerschaltung keine grosse Totzeit in den Regelkreis einbauen. Um dies zu erreichen, werden schnelle AD- und DA-Wandler (3 MSPS / 16 Bit) und eine Kennlinienberechnung ohne Pipeline-Delay eingesetzt. Die Totzeit der Regelung beträgt damit weniger als 1µs. Da eine Echtzeitberechnung der komplexen Kennlinie eines Solargenerators in dieser kurzen Zeit nicht möglich ist, werden die Kennlinien vorgängig berechnet und in einem Flash-Speichermodul abgelegt. Dieses bietet Platz für 65'536 Kennlinien, welche im Betrieb beliebig umgeschaltet und skaliert werden können.

Die Speisung des Simulators erfolgt über programmierbare Speisegeräte. Da die Teilsimulatoren unabhängig voneinander funktionieren sollen, ist pro Teilsimulator ein eigenes Speisegerät notwendig. Um die Verlustleistung der Stromquelle in Grenzen zu halten, wird die Spannung der Speisegeräte der Ausgangsspannung nachgeregelt, wozu eigens eine Schaltung entwickelt wird. Bei den vorgesehenen Speisegeräten handelt es sich um Schaltnetzteile. Damit die Messungen nicht durch EMV-Störungen der Speisegeräte verfälscht werden, müssen diese entstört werden. Dabei ist es jedoch entscheidend, dass keine nennenswerten Erdkapazitäten eingebaut werden, da ansonsten der Test von traflosen Wechselrichtern verunmöglicht würde (Ansprechen der Fehlerstromdetektion durch kapazitive Erdströme).

Die Steuerung der Simulatoren erfolgt über eine Steuerschaltung, welche die Kommunikation mit dem Steuercomputer, die Konfiguration der Kennlinienerzeugung, die Fehlerüberwachung und sämtliche Schaltfunktionen übernimmt. Das Herzstück der Steuerschaltung ist ein leistungsfähiger Cortex-M4 Microcontroller (32-Bit).

## Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse

Bisher wurde der erste Teilsimulator entwickelt und gebaut. Dieser ist in der Lage, einen Strang mit einer Leerlaufspannung bis 1'000V und einem Kurzschlussstrom bis 32A zu simulieren. Dieser Teilsimulator wurde mittlerweile rudimentär getestet. Rudimentär deshalb, weil die für den Betrieb des Simulators benötigte Kühleinrichtung noch nicht vorhanden ist. Wie bereits erwähnt wurde, generiert der Prüfstand eine beachtliche Verlustleistung. Zunächst war geplant, für Kühlung einen Kaltwassersatz mit 12kW Kälteleistung zu installieren. Dies hätte jedoch grosse Kosten verursacht. Ausserdem hätte der benötigte Kühler extern am Gebäude angebracht werden müssen, was unter anderem eine Baubewilligung nach sich gezogen hätte. Um diese Aufwände zu umgehen wurde beschlossen, die Kälteleistung über einen Wärmetauscher von einer im Gebäude bestehenden Kälteanlage zu beziehen. Diese Kälteanlage hat eine Kälteleistung von über 80kW und dient zur Kühlung der technischen Apparaturen unseres Reinraums. Die Anlage ist für diesen Zweck stark überdimensioniert, weshalb sie zusätzlich für die Kühlung des Multistring-Simulators eingesetzt werden kann. Dies bedingt aber einen Eingriff sowohl in den Kühlmittelkreis als auch in die Steuerung der Anlage. Deshalb wurde das für den Reinraum zuständige Ingenieurbüro mit der Planung dieser Erweiterung beauftragt. Die Kühlanlage wird voraussichtlich im ersten Quartal 2015 betriebsbereit sein. Bis dahin ist der Test der Hardware des ersten Teilsimulators am Ruhen, wodurch sich das Projekt verzögert.

Zum Einbau der drei Teilsimulatoren sowie der Speise- und Messgeräte wurde ein stabiles Rack konstruiert, welches in *Fig. 2* gezeigt wird. Auf der Abbildung sind ausserdem der erste Teilsimulator und links daneben das dazugehörige Speisegerät zu erkennen. Für den Prüfstand wird derzeit ein Raum eingerichtet, in dem nebst der bereits angesprochenen Kühlung auch ein Netzanschluss von 70kVA installiert wird.



**Fig. 2:** Rack für den Multistring-Simulator mit dem ersten Teilsimulator

## **Bewertung der Bisherigen Arbeiten und Ausblick**

Die bisher erzielten Resultate lassen darauf schliessen, dass der Multistring-Prüfstand die geplanten Spezifikationen erreichen wird. Bis dahin gibt es noch mehrere Arbeiten zu erledigen, wovon die wichtigsten im Folgenden genannt werden.

Sobald die Kühlanlage einsatzbereit ist, muss der erste Teilsimulator unter Vollast getestet werden. Erst dann macht es Sinn, die verbleibenden zwei Teilsimulatoren zu bauen. Da alle Teilkomponenten des ersten Teilsimulators bereits eingehend getestet wurden, ist von diesem Schlusstest ein positives Resultat zu erwarten.

Für die Steuerung des Prüfstandes, insbesondere der Teilsimulatoren, muss eine Mess- und Steuer- software geschrieben werden. Die Ansteuerung der Teilsimulatoren erweist sich dabei als vergleichsweise einfach, da diese über simple Terminalbefehle erfolgt, welche von der Hardware der Simulatoren bearbeitet werden. Deutlich komplexer ist die Ansteuerung der Leistungsanalysatoren. Insbesondere die Synchronisation der simulierten Testmuster und der Messgeräte bei dynamischen Testmustern ist sehr komplex.

Der aktuelle Projektstand lässt darauf schliessen, dass der neue Multistring-Prüfstand im Sommer 2015 in Betrieb genommen werden kann. Somit steht der Prüfstand voraussichtlich ab Herbst 2015 als Test- und Forschungsplattform zur Verfügung.



# AKKREDITIERUNG DES SOLARWECHSEL- RICHTER-TESTVERFAHREN FÜR FORSCHUNGSPLATTFORM

## Annual Report 2014

Author and Co-Authors	Prof. Urs Muntwyler, André Werder, Daniel Gfeller
Institution / Company	Berner Fachhochschule, Technik und Informatik
Address	Jlcoweg 1, CH-3400 Burgdorf
Telephone, E-mail, Homepage	034 / 426 68 11, <a href="mailto:urs.muntwyler@bfh.ch">urs.muntwyler@bfh.ch</a> , <a href="http://www.pvtest.ch">www.pvtest.ch</a>
Project- / Contract Number	SI/501082-01
Duration of the Project (from – to)	01.09.2014-31.03.2017
Date	11.12.2014

### ABSTRACT

The BFH test laboratory for photovoltaics in Burgdorf has decided to be accredited by SAS in testing of grid-connected inverters in terms dynamic and static tracking behavior and electromagnetic compatibility.

Since the approval of the subsidy contract by the BFE, the SAS has been contacted and the first steps were determined. Thereupon, the preparation of the self-assessing checklist and the processing of the Quality Manual could be started and are going to be finished soon.

Also, the evaluation of the required measuring-accuracy has already been carried out and forms an important basis for accreditation.

The test bench is already available but needs to be placed elsewhere. The relocation will take about half a year of time.

## Einleitung / Projektziele

Das von Prof. Dr. Häberlin gegründete Photovoltaiklabor der Berner Fachhochschule in Burgdorf (PV LAB) führt seit 1989 Tests von Wechselrichtern für netzgekoppelte PV-Anlagen durch. Anfangs wurden unter anderem DC-AC-Umwandlungswirkungsgrad und Oberschwingungsströme mit der schuleigenen PV-Dachanlage (60kW) getestet und untersucht, die eigens dafür konstruiert wurde. Im Jahre 2005 wurden weitere Tests eingeführt, wie Messung des statischen und dynamischen MPP-Trackingverhalten und die vom PV LAB eingeführte Grösse "Gesamtwirkungsgrad" oder "totaler Wirkungsgrad"  $\eta_{\text{tot}}$ . Dieser Gesamtwirkungsgrad eignet sich sehr gut zur ganzheitlichen Beschreibung des Verhaltens von Wechselrichtern und wurde zunehmend auch von anderen Institutionen und von der Fachpresse (z.B. Photon) verwendet. Wegen der notwendigen sehr hohen Stabilität sind hochpräzise Messungen des MPP-Tracking-Wirkungsgrades resp. -Anpassungsgrades und des Gesamtwirkungsgrades an realen PV-Generatoren nicht möglich. Zur Messung des MPPT-Verhaltens und des Gesamtwirkungsgrades sind computergesteuerte Solargenerator-Simulatoren (SolGenSim) im Rahmen von verschiedenen Forschungsprojekten im PV LAB entwickelt, programmiert und optimiert worden.

Die im PV LAB verwendeten Testprozeduren für das dynamische und statische Trackingverhalten sind in der Norm EN50530 festgehalten. Die Elektromagnetische Verträglichkeit (leitungsgebundene Störaussendungen) ist ein weiterer wichtiger Punkt bei der Qualität von netzgebundenen Wechselrichtern und somit der Netzqualität und wird mit den Grenzwerten in der Norm EN61000-6-3 (Wohnbereich, Geschäfts- und Gewerbebereiche sowie Kleinbetriebe) resp. EN61000-6-4 (Industriebereich) festgehalten. Dank dieser Testprozeduren hat sich gesamthaft die Qualität von netzgebundenen Wechselrichter erheblich verbessert.

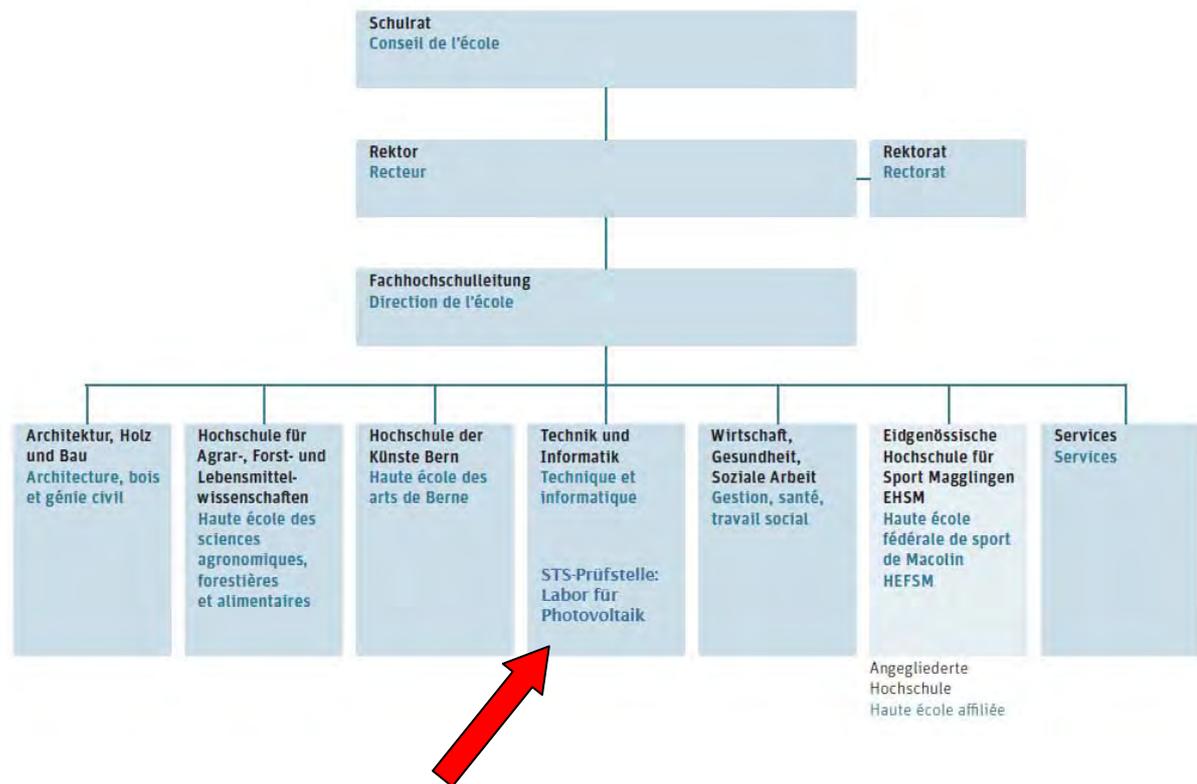
Das Prüflabor hat mit seinen über 20 Jahren Erfahrung im Testen von Solarwechselrichtern, den Publikationen und den Forschungsprojekten einen guten Beitrag zur Verbesserung von Solarwechselrichtern geleistet und grosse Kompetenz auf diesem Gebiet bewiesen.

Um diese Kompetenz weiter auszubauen und von einer unabhängigen Stelle zu bestätigen, hat sich das Prüflabor für die Akkreditierung nach ISO/IEC 17025 entschieden und ein Akkreditierungsverfahren bei der Schweizerischen Akkreditierung Stelle (SAS), Lindenweg 50, CH-3003 Bern-Wabern eröffnet.

## Kurzbeschrieb des Projekts / der Anlage

Das Photovoltaiklabor (PV LAB) des Departements Technik und Informatik der Berner Fachhochschule BFH-TI Burgdorf gehört im Bereich der Forschung dem Institut Energie und Mobilität (IEM) an (siehe Figur 1). Das PV LAB ist ein Labor, welches als Teil der BFH folgende Aufgaben wahrnimmt:

- a) Begleitung und Durchführung von Forschungs- und Entwicklungsprojekten auf dem Gebiet der Photovoltaik-Systemtechnik
- b) Erbringen von Dienstleistungen auf dem Gebiet der Photovoltaik-Systemtechnik in Industrieprojekten (bspw. KTI-Projekten)
- c) Erbringen von Dienstleistungen wie das Testen und Messen von Photovoltaik-Wechselrichtern (Netzverbundanlagen und Inselanlagen) im Labor mit einem Solargenerator-Simulator oder der eigenen PV-Anlage, das Prüfen von anderen Komponenten der PV-Systemtechnik im Labor, sowie das Testen von Blitz- und Überspannungsschutz im Hochspannungslabor [Kompetenzgruppe WRT]
- d) Langzeitmessungen an netzgekoppelten Photovoltaikanlagen [Kompetenzgruppe LZPV]
- e) Aus- und Weiterbildungen in Photovoltaik-Systemtechnik im nationalen und internationalen Bereich
- f) Organisation, Durchführung und Begleitung von Lehrveranstaltungen, Vortragstagungen, Studienprojekten, Laborübungen, technischen Führungen
- g) Publikationen, Berichte, Vorträge, Wissenstransfer, Auskünfte, Beratung und Networking
- h) Pflege der eigenen Homepage [www.pvtest.ch](http://www.pvtest.ch)



Figur 1: Eingliederung des PV-Labors in der BFH

### Unabhängigkeit als Prüfstelle

Das PV LAB und dessen Kompetenzgruppe WRT (Testen und Prüfen von Solarwechselrichtern und deren Komponenten) untersteht der Direktion der BFH-TI, Burgdorf. Die Unabhängigkeit der Aktivitäten als Prüfstelle ist von der Direktion der BFH-TI gewährleistet.

Die Kompetenzgruppe WRT finanziert sich zu etwa 60-80% aus Drittaufträgen. Dies sind Testaufträge, Beratungen, Industrieprojekte, usw. mit externen Firmen oder Institutionen.

Die Räumlichkeiten des Prüflabors (Raum T933) sind vom Schulungsbereich und anderen Abteilungen abgetrennt und können nur von Mitarbeitern (mit Schlüssel) betreten werden. Der Standort soll allerdings für die Akkreditierung noch geändert werden.

### Sicherstellung zukünftige Unabhängigkeit als Prüfstelle

Um auch bei zukünftigen Veränderungen wie Umzug der Prüfstelle (bspw. Thema Campus Biel, 2020), Umstrukturierungen der Abteilungen, usw. die Unabhängigkeit der Prüfstelle garantieren zu können, werden hier die wichtigsten Punkte aufgelistet, die dafür einzuhalten/zu beachten sind:

1. Finanzielle Unabhängigkeit der Prüfstelle (eigene Kontoführung)
2. Zugriffsberechtigungen für die Laufwerksordner mit vertraulichen Daten nach Bedarf verteilen
3. Ablegung und Archivierung der Dokumente und Daten anpassen
4. Räumlich Trennung des Messplatzes und der Aufbewahrung Prüflinge vor
  - a. Besuchern
  - b. Studierenden
  - c. (Unbefugte) Mitarbeitern ausserhalb der Prüfstelle
5. Ergänzung und Anpassung der Vertraulichkeitserklärung
6. Anpassungen/Ergänzungen der Dokumentation Kapitel Personalwesen (bspw. Checkliste Eintritt neuer Mitarbeiter)
7. Nach Bedarf, Unabhängigkeitserklärung der Prüfstelle (Internet)

## Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse

Um die gewünschte Akkreditierung als unabhängiges Prüflabor zu erlangen wurde mit der Schweizerischen Akkreditierungsstelle SAS bereits Kontakt aufgenommen. Erste Gespräche mit dem zugewiesenen Begutachter Orlando Holenstein, SAS und dem Fachexperten Fabian Beck, EPCOS haben bereits stattgefunden. Dabei wurde definiert, welche Unterlagen/Dokumente von der SAS benötigt werden, damit die Akkreditierung gesprochen werden kann. Dies sind insbesondere:

- Standard-Checkliste für die Akkreditierung von Prüflaboratorien nach ISO/IEC 17025

Diese Checkliste ist eine Art Selbstdeklaration des Prüflabors und gibt insbesondere Auskunft über die Organisation, Zuständigkeiten und Prozesse. Mit der Bearbeitung der Liste konnte bereits begonnen werden. Sie ist mittlerweile auf einem Stand, welcher einen Abschluss in wenigen Wochen als realistisch erscheinen lässt.

- Qualitätsmanagement-Handbuch (MHB) nach ISO/IEC 17025

Für die Erstellung des Handbuchs wurde der Kontakt zur Abgasprüfstelle in Nidau gesucht. Die Prüfstelle unter der Leitung von Dr. Jan Czerwinski ist ebenfalls im Departement Technik und Informatik der Fachhochschule (BFH-TI) eingegliedert und hat sich kürzlich ebenfalls als Prüflabor akkreditieren lassen. Wir konnten das MHB von ihnen beziehen und brauchen es als hilfreiche Vorlage.

Eine saubere Pflege dieses Handbuchs ist sehr zeitaufwändig und ist aktuell im Gange. Die Mitarbeiterin, welche damit begonnen hat, hat das Prüflabor anfangs 2014 verlassen. Ein neuer Mitarbeiter wurde mit der Bearbeitung beauftragt und befindet sich in der Einarbeitungsphase. Sobald die Thematik genügend vertieft ist, kann die Fortsetzung des Akkreditierungsvorgehens angegangen werden.

Der zu akkreditierende Teil des PV-Labors ist nun so organisiert:

Leitung des Labors:	LL	Prof. Urs Muntwyler
Qualitätsmanager	QM	Ing FH André Werder
Verantwortliche für technische Fragen:	VTF	Ing HTL Luciano Borgna Ing FH Daniel Gfeller
Prüfprozessverantwortlicher:	PV	Vakant

Ein weiterer Punkt, welchen es vorgängig zu klären gilt, ist die Evaluation der Messgenauigkeit. Dafür hat der VTF beim METAS eine spezifische Schulung besucht und die Messmittel gezielt kalibrieren lassen. Mit den erhaltenen Resultaten konnte dann die Messgenauigkeit unseres eigenen Prüfaufbaus genau bestimmt und durch Testmessungen validiert werden.

## Nationale / internationale Zusammenarbeit

Das Abgas-Prüflabor der Automobil-Abteilung der BFH-TI in Nidau wurde im August 2012 als Prüfstelle für Diesel Partikelfilter akkreditiert (STS 0561). Dieser Anlass und die damit verbundene Erfahrung im Akkreditierungswesen wurde genutzt um Unterstützung zu holen. Der zuständige MS-Verantwortliche Pierre Comte hat freundlicherweise die betreffenden Unterlagen zur Inspiration zur Verfügung gestellt. Ausserdem fand ein Gespräch mit dem Laborleiter Dr. Jan Czerwinski statt.

## Bewertung 2014 und Ausblick 2015

Die Vorarbeiten für die Akkreditierung konnten 2014 von Frau Manuela Schöni erfolgreich in Angriff genommen werden. Durch ihren Weggang aus dem PV-Labor ist leider eine Lücke entstanden und die Weiterarbeit lag eine Zeit lang brach. Durch einen Neuzugang von Herrn André Werder im September konnte ein Nachfolger gefunden werden, der mit der Akkreditierung betraut wurde. Die Einarbeitung wird noch einige Zeit in Anspruch nehmen. Eine erste Fassung der Checkliste und des MS-Handbuchs liegen vor. Die Anmeldung zur Begutachtung kann demnächst ins Auge gefasst werden.

Der 100 kWp SolGenSim (siehe Figur 2), welcher für die dynamischen WR-Tests verwendet wird, ist bereits vorhanden, jedoch muss der Standort geändert werden, um die Zugänglichkeit für den Prüfenen sowie die Belüftung des SolGenSim (und natürlich auch des Prüflings) zu verbessern. Der Umzug vom alten Standort (Raum T933 im UG) an den neuen (Raum T014a im EG) bedarf noch einiger Vorbereitung, kann aber voraussichtlich innerhalb eines halben Jahres vollzogen werden. Bis dahin sollten auch die Checkliste und das Handbuch soweit sein, dass sie von der SAS begutachtet werden können.



Figur 2: SolGenSim 100kWp



# SMART GRID EICH

## ZENTRALE STEUERUNG VON PHOTOVOLTAIK-WECHSELRICHTERN

Annual Report 2014

Author and Co-Authors	Christof Bucher
Institution / Company	Basler und Hofmann AG
Address	Forchstrasse 395, 8032 Zürich
Telephone, E-mail, Homepage	044 387 13 80, <a href="mailto:christof.bucher@baslerhofmann.ch">christof.bucher@baslerhofmann.ch</a> , <a href="http://www.baslerhofmann.ch">www.baslerhofmann.ch</a>
Project- / Contract Number	SI/501094-01 / SI/501094-01
Duration of the Project (from – to)	July 2014 – July 2016
Date	9 <sup>th</sup> December 2014

### ABSTRACT

In the 'Smart Grid Eich' project, a novel integration of photovoltaic power systems into the low voltage distribution grid will be implemented. In the Eich district of Frenkendorf (Canton Basel-Landschaft), 29 PV power systems with a total rated AC power of 131 kW were installed in 2012. However, the PV hosting capacity of the grid is only 80 kW due to voltage constraints. The power output of the PV power plants was therefore limited to 60% of the AC power directly after commissioning. The estimated energy loss due to active power curtailment is 6%.

A control system has been set up to control the reactive power output of the PV systems and to limit active power curtailment just to those times when the local grid voltage would exceed the tolerated limits. This control system consists of voltage/power measurements in the district of Eich, a communication system to transfer the measured values to the grid operator's control centre, a Matlab based control tool and the existing ripple control system to transmit the control commands to the PV power systems.

In 2014, the system was set up and fully commissioned. Initial system tests have now been carried out successfully. Further tests will be carried out in spring / summer 2015 at high irradiance levels.

## Einleitung / Projektziele

In der Überbauung "Eich" in Frenkendorf können wegen Spannungsproblemen von 29 PV-Anlagen mit einer Gesamtleistung von 131 kVA nur gerade 60% respektive 78.6 kW ins Netz eingespeist werden. Dadurch resultiert ein jährlicher Energieertragsverlust von hochgerechnet ca. 6%. In dem Projekt "Smart Grid Eich" sollen die PV-Anlagen dynamisch geregelt und der Ertragsverlust ohne Netzausbau reduziert werden. **ABBILDUNG 1** zeigt eine Luftaufnahme der Überbauung Eich mit den 29 PV-Anlagen.

### Übergeordnete Ziele

- Verhinderung Netzausbau
- Reduktion Ertragsverlust von 6% auf maximal 4%
- Demonstration Kosteneinsparung für Folgeprojekte
- Rolle der Kommunikation von Netzbetreiber zu PV-Anlage aufzeigen
- Sicherstellung Netzstabilität

### Ziele für das Jahr 2014

- Inbetriebnahme des Regelungssystems
- Demonstration der Funktionsweise des Regelungssystems



Abbildung 1: Luftaufnahme des Quartiers Eich.

## Kurzbeschreibung des Projekts / der Anlage

Das Regelungssystem des Smart Grid Eich wird in **ABBILDUNG 2** dargestellt. Das Regelungskonzept funktioniert in Kürze wie folgt:

1. Die PV-Anlagen speisen ohne statische Leistungsbegrenzung ins Netz ein.
2. Die Netzspannung wird überwacht. Bei erhöhter Netzspannung wird der Leistungsfaktor der PV-Anlagen reduziert ( $\cos(\phi) < 1$ , induktiv). Damit wird die Netzspannung gesenkt.
3. Ist Massnahme 2 nicht ausreichend, so wird zusätzlich die Wirkleistung begrenzt. Die Reduktion des  $\cos(\phi)$  sowie der Wirkleistungsgrenze erfolgen in acht Stufen.
4. Sinkt die Netzspannung unter ein gewisses Niveau, so werden die Massnahmen 3 und 2 wieder aufgehoben.

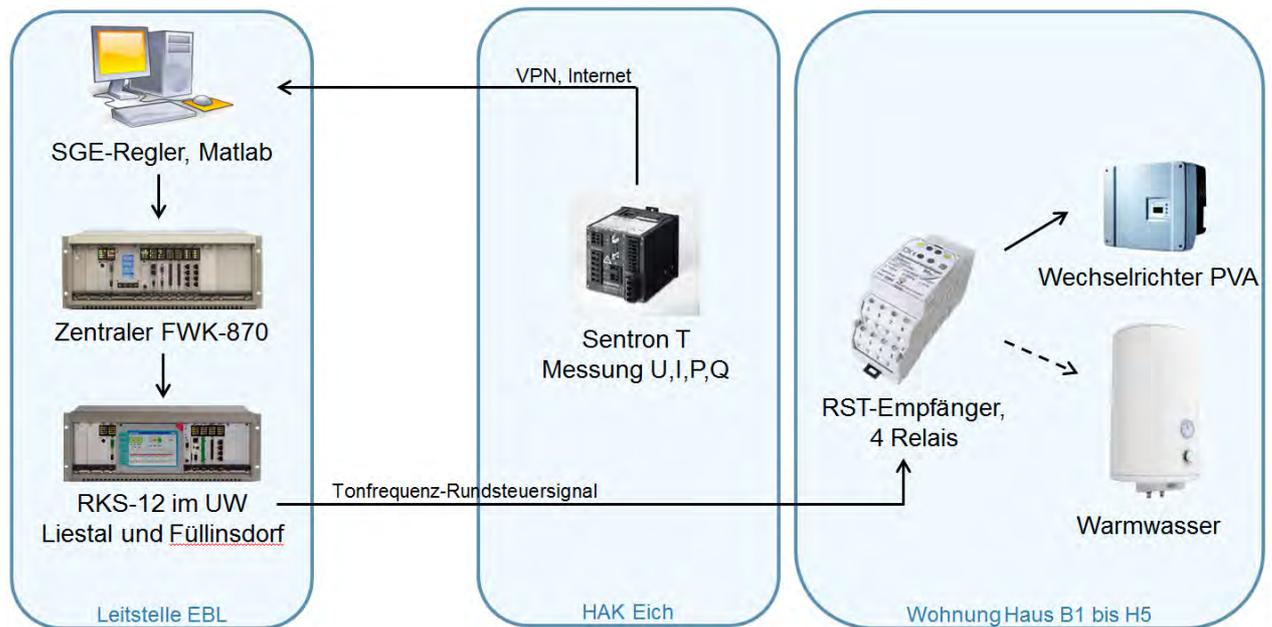


Abbildung 2: Regelungssystem Smart Grid Eich.

## Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse

Im Jahr 2014 wurde das Regelungskonzept aus der Vorstudie verfeinert, implementiert und mit der dafür notwendigen Hardware installiert und in Betrieb genommen. Erste Funktionstests dazu wurden durchgeführt.

**ABBILDUNG 3** zeigt die Simulationsergebnisse der Funktionsweise des Smart Grid Eich. Aufgrund der Simulation wird mit rund 2'000 bis 3'000 Rundsteuersendungen pro Jahr gerechnet, welche vorwiegend im Sommerhalbjahr anfallen. Der Energieertragsverlust soll von 6% auf unter 1% gesenkt werden können.

**ABBILDUNG 4** zeigt die Benutzeroberfläche des Smart Grid Eich. Neben der automatischen Regelung wurde zu Testzwecken ein Interface geschaffen, welches die manuelle Sendung von Rundsteuerbefehlen ermöglicht.

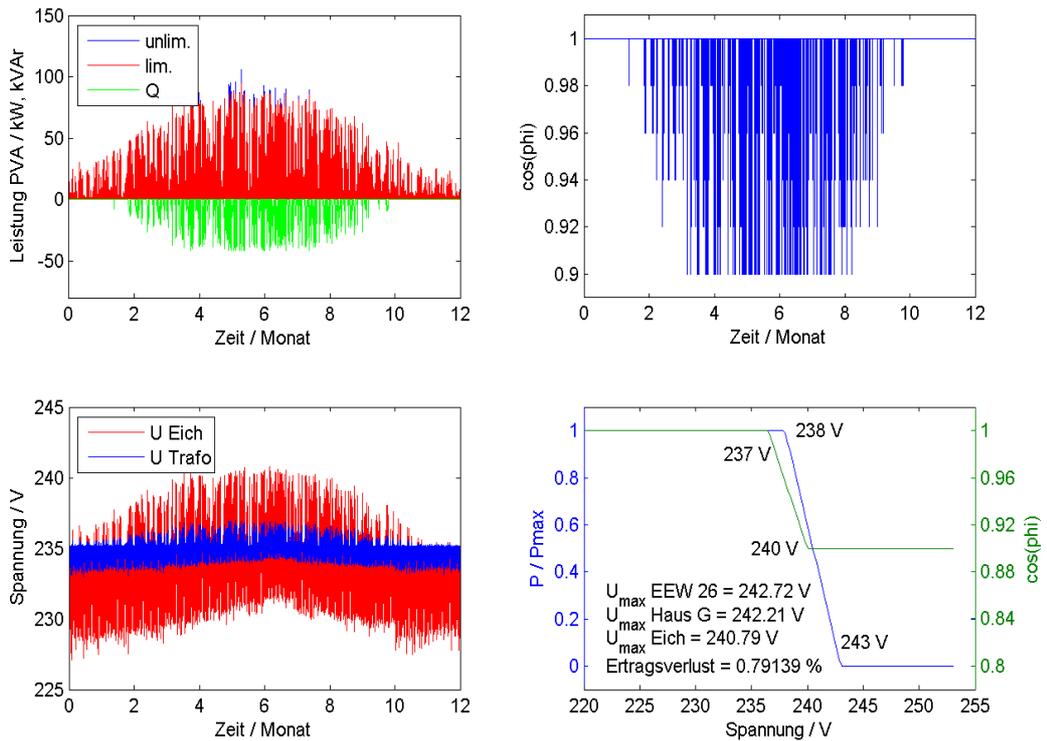


Abbildung 3: Jahressimulation des Smart Grid Eich.

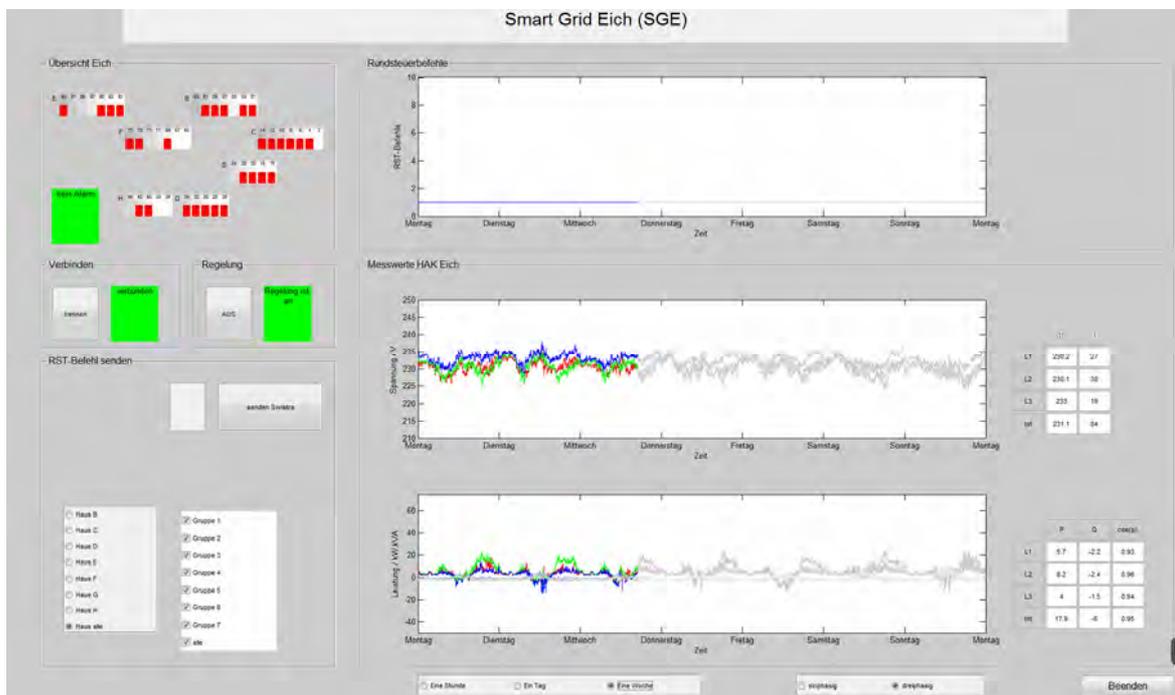


Abbildung 4: Benutzeroberfläche Smart Grid Eich.

Die korrekte Funktion des Smart Grid Eich wird in **ABBILDUNG 5** nachgewiesen. Die acht Regelstufen des Smart Grid Eich werden durchgelaufen und die berechnete mit der gemessenen Blindleistung verglichen. Die gemachten Messungen sind Netto-Leistungsmessungen und zeigen nicht nur die Einspeisung der PV-Anlagen, sondern auch den Blindleistungsbezug der Haushalte. Deshalb gibt es gewisse Unterschiede zwischen der Soll- und Ist-Blindleistung.

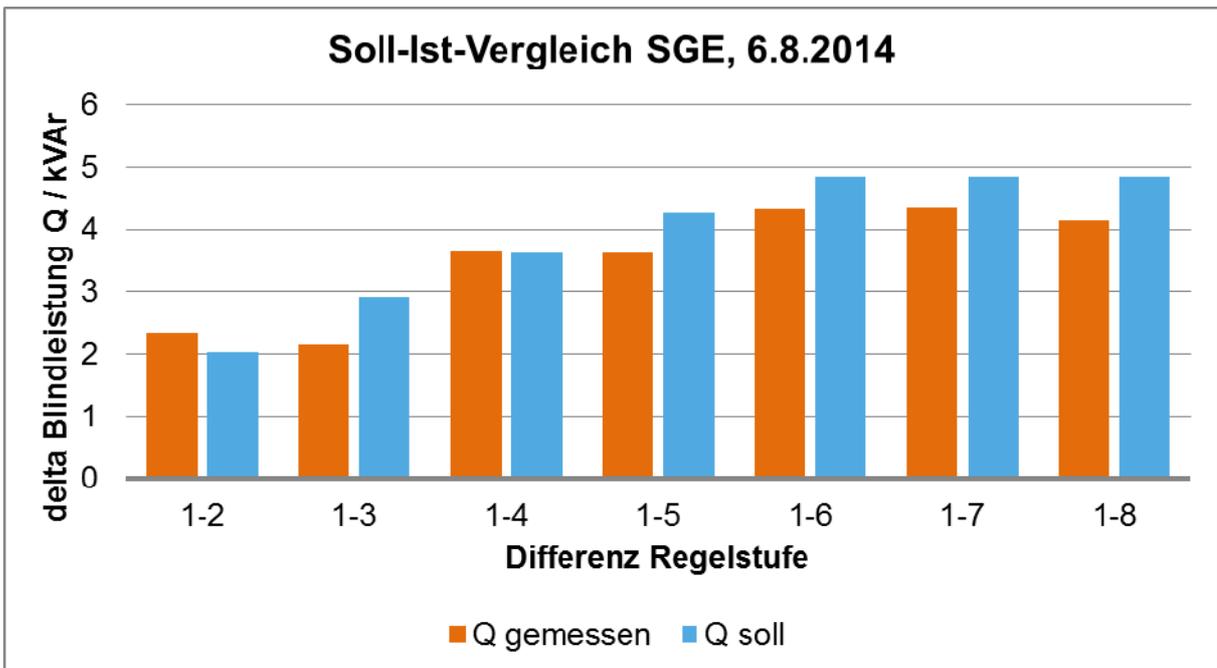


Abbildung 5: Funktionstest Smart Grid Eich.

Ein Soll-Ist-Vergleich der Wirkleistung war noch nicht möglich, weil zu Zeiten starker Einstrahlung (August) noch nicht genügend PV-Anlagen am System angeschlossen waren, um aussagekräftige Messresultate zu erhalten.

### Nationale / internationale Zusammenarbeit

Das Projektteam wird von folgenden Firmen gebildet:

- **Elektra Baselland (EBL):** Träger des Projekts und Hauptprojektleitung.
- **Solvatec AG:** Installation der PV-Anlagen, Rundsteuergeräten und Konfiguration der Wechselrichter.
- **Basler & Hofmann AG:** Regelungskonzept, Simulationen, Implementierung der Regelung, Betreuung und Optimierung des Regelungssystems.
- **Swistec Systems AG:** Lieferung und Wartung der Rundsteuerung, Implementierung der Softwareschnittstelle der Regelung und des bestehenden Rundsteuersystems.

Zu den Anwohnern und Eigentümern der PV-Anlagen im Quartier Eich besteht ein enger Kontakt und Austausch. Des Weiteren wird der direkte Kontakt zu Kostal (Deutschland), dem Hersteller der Photovoltaik-Wechselrichter, gepflegt.

### Bewertung 2014 und Ausblick 2015

Das Regelsystem wurde gemäss Zeitplan installiert und in Betrieb genommen. Mit den Funktionstests konnte die korrekte Funktion des Systems nachgewiesen werden. Die Ziele für das Jahr 2014 wurden somit erreicht.

Die grössten Herausforderungen lagen dabei auf folgenden Punkten:

- Konfiguration Wechselrichter
- Zuverlässigkeit Datenkommunikation

Für das kommende Jahr (2015) sind insbesondere Messungen und Auswertungen vorgesehen. In der folgenden Tabelle ist der Projektplan aufgeführt:

<b>Aktivitäten</b>	<b>Anfang</b>	<b>Ende</b>	<b>Meilenstein</b>	<b>Zuständige/r Projektpartner/in</b>
Vorstudie	2012	2013	Abgeschlossen: Variantenentscheid	EBL
Vorbereitungen	04.2014	05.2014	Konzept Regelung Entworfen	Basler & Hofmann
Aufbau Smart Grid bei Powerusern	06.2014	06.2014	Bau und Inbetriebnahme Smart Grid bei vier Kunden	Basler & Hofmann
Aufbau SG	08.2014	08.2014	Aufbau des Smart Grids bei allen 29 PV-Anlagebetreibern	Basler & Hofmann
Messperiode 1	09.2014	12.2014	Auswertung, Optimierungen, BFE Jahresbericht	Basler & Hofmann
Messperiode 2	01.2015	12.2015	Auswertung, Optimierungen, BFE Jahresbericht	Basler & Hofmann
Erfolgskontrolle	01.2016	02.2016	Auswertung Energieertragseinbusse, Spannungsqualität	Basler & Hofmann
Technologietransfer	09.2014	06.2016	Im Rahmen der Kommunikation	Basler & Hofmann, EBL
Kommunikation	09.2014	06.2016	Dissemination <ul style="list-style-type: none"> <li>• Publikationen</li> <li>• Präsentationen</li> <li>• IEA PVPS Task 14, Subtask 5</li> </ul>	Basler & Hofmann, EBL
Schlussbericht	06.2016	06.2016	BFE-Schlussbericht	Basler & Hofmann



## PAIOS+

# INTEGRIERTE MESSPLATTFORM FÜR OLED UND SOLARZELLEN R&D

## Annual Report 2014

Author and Co-Authors	Beat Ruhstaller <sup>1</sup> , Kurt Pernstich <sup>2</sup>
Institution / Company	<sup>1</sup> Fluxim AG <sup>2</sup> Zurich University of Applied Sciences Institute of Computational Physics
Address	<sup>1</sup> Technoparkstrasse 2, 8406 Winterthur <sup>2</sup> Technikumstrasse 9, 8401 Winterthur
Telephone, E-mail, Homepage	<sup>1</sup> +41 500 4771, <a href="mailto:Beat.Ruhstaller@fluxim.com">Beat.Ruhstaller@fluxim.com</a> , <a href="http://www.fluxim.com">www.fluxim.com</a> <sup>2</sup> +41 58 934 7488, <a href="mailto:Kurt.Pernstich@zhaw.ch">Kurt.Pernstich@zhaw.ch</a> , <a href="http://www.icp.zhaw.ch">www.icp.zhaw.ch</a>
Project- / Contract Number	KTI15889.2
Duration of the Project (from – to)	1.1.2014 – 31.10.2015
Date	11.12.2014

### ABSTRACT

Fluxim AG is a leading supplier of R&D tools for (in-)organic solar cells and organic light emitting diodes. In addition to its simulation software *Setfos*, Fluxim has introduced a novel measurement platform *Paivos* for all-in-one optoelectronic device characterization of solar cells and organic light-emitting diodes. One goal in this project is to extend the *Paivos* measurement system to be able to elucidate the physics of solar cells at cryogenic temperatures and also at elevated temperatures for life-time studies. A second major goal is to integrate the simulation software and the measurement hardware into a turn-key solution so that the various measurements performed with *Paivos* can be simulated with *Setfos* at the press of a button. This allows a reliable parameter extraction of model parameters in a streamlined and rapid process.

After the first project year, a prototype of a low-temperature probe station was developed, successfully tested, and compared with a commercial cryostat. The measurement capabilities of the *Paivos* system have been greatly enhanced by designing a new front end. Cell impedances, for example, can now be measured over frequencies spanning 7 orders of magnitude and more than 8 orders in impedance. An ongoing development of the optical system will enable to illumine multiple samples at the same time to perform parallel measurements.

To extract the optimal model parameters, a multi-criteria optimization algorithm needs to be developed. In an initial step the numerical algorithms to make forward calculations of the device parameters were improved. The data exchange between *Paivos* and *Setfos* has been completed, now the definition of optimization targets as well as the optimization algorithm for the multi-criteria fit can be developed.



# DEVELOPMENT OF OPTIMIZATION TOOLS FOR LARGE-SCALE PHOTOVOLTAIC SYSTEMS WITH COMPLEX GEOMETRIES CONSIDERING DIRECT REFLECTION OF VARIOUS SURFACES LIKE SNOW AND WATER

## Annual Report 2014

Author and Co-Authors	Jürg Rohrer
Institution / Company	ZHAW Zurich University of Applied Sciences, Life Sciences,
Address	Campus Grüental, CH-8820 Wädenswil
Telephone, E-mail, Homepage	+41 58 934 54 33 / <a href="mailto:rohu@zhaw.ch">rohu@zhaw.ch</a> / <a href="http://www.iunr.zhaw.ch">www.iunr.zhaw.ch</a>
Project- / Contract Number	KTI 16596.1
Duration of the Project (from – to)	17.03.2014 to 02.11.2018
Date	15.12.2014

### ABSTRACT

In order for Switzerland to achieve a self-sufficient electrical energy supply, more power plants that deliver electricity especially in winter are needed. Photovoltaic facilities located in the Alps are very promising, because they produce about 50% more energy compared to facilities in lower regions and their production is seasonally balanced, whereas roof-mounted photovoltaic systems in urban and rural areas usually produce 70% of their energy during summer.

Designing large-scale, winter-optimized photovoltaic power plants places new challenges on the project engineers. Therefore the ZHAW Waedenswil is developing a new planning and calculation software in collaboration with Zenna AG and EKZ (electrical utilities of the canton of Zurich) and with financial support of CTI (Commission for Technology and Innovation of Swiss administration). The application focuses on optimizing multiple objectives (e.g. daily, monthly or yearly production) of complex photovoltaic systems considering additional irradiation from sunlight reflected on water and snow surfaces. Also visibility tests and studies on potential glaring effects are included in the software.

A mobile and autonomous irradiation measurement station was built, which enables investigating different photovoltaic technologies in multiple locations and delivers data to verify and improve the accuracy of the developed calculation tool.

The measurement station is currently installed at a lake in Switzerland. At this location, the influence of direct reflection of sunlight at a water surface on PV energy production is going to be analyzed. The station will be moved to a high-elevation location in the Alps afterwards.



# DEICING VON PHOTOVOLTAIKANLAGEN

## Annual Report 2014

Author and Co-Authors	Roland Egli, Markus Markstaler
Institution / Company	Hochschule NTB Buchs
Address	Werdenbergstrasse 4, 9471 Buchs
Telephone, E-mail, Homepage	+41 81 755 33 47, <a href="mailto:roland.egli@ntb.ch">roland.egli@ntb.ch</a> , <a href="http://www.ntb.ch">www.ntb.ch</a>
Project- / Contract Number	KTI 15759.1
Duration of the Project (from – to)	01.8.2013 – 31.07.2014
Date	18.12.2014

### ABSTRACT

Die Interstaatliche Hochschule für Technik Buchs NTB erarbeitete im Rahmen eines KTI Projektes gemeinsam mit dem Solarenergieinstallateur „hassler energia alternativa AG“ eine technische Lösung für die automatisierte Schneentfernung auf Photovoltaikanlagen. Speziell wurden dabei die rauen Betriebsverhältnisse und die Wirtschaftlichkeit der Anlage berücksichtigt.

### Problemstellung

Wegen der erhöhten Strahlungsintensität und den vergleichsweise tiefen Temperaturen, bei welchen Photovoltaikzellen einen hohen Wirkungsgrad aufweisen, sind Photovoltaikanlagen in alpinen Regionen sehr attraktiv. Schneefälle wirken sich jedoch negativ auf die Produktivität solcher Anlagen aus. Um das gesamte Potential einer Photovoltaikanlage im alpinen Raum auszuschöpfen muss diese frei von Eis und Schnee gehalten werden. Möglich wird dies mit einer automatisierten Vorrichtung zur Schneentfernung. Solch ein System reduziert gleichzeitig auch die Gefahr von Dachlawinen.

### Projektziel

Nach Abschätzen der technische Machbarkeit und Wirtschaftlichkeit wird ein Prototyp für eine Schneentfernungsvorrichtung entwickelt und an einer bestehenden Photovoltaikanlage über eine Winterperiode getestet.

### Ergebnis

Das entwickelte System entfernt erfolgreich den Schnee von PV-Anlagen und gewährleistet somit einen Mehrertrag von Photovoltaikanlagen in den attraktiven Wintermonaten. Zudem wird die Gefahr durch Dachlawinen reduziert. Das System ist skalierbar für dachparallele Klein- und Grossanlagen.



# PHOTOVOLTAÏQUE ET NEIGE

## Horizon des solutions pour l'installation sur les toits dans les régions enneigées

Annual Report 2014

Author and Co-Authors	Davy Marcel, Lionel Perret
Institution / Company	Planair SA
Address	Crêt 108a CH-2314 La Sagne
Telephone, E-mail, Homepage	<a href="mailto:davy.marcel@planair.ch">davy.marcel@planair.ch</a> , <a href="mailto:lionel.perret@planair.ch">lionel.perret@planair.ch</a> , <a href="http://www.planair.ch">www.planair.ch</a>
Project- / Contract Number	SI/500568 / SI/500568-01
Duration of the Project (from – to)	01.02.2011 – 30.07.2014
Date	15.11.2014

### ABSTRACT

The PV installations of Blaise Cendrars school have been thought, from the begin, to test and compare performances of various solutions in terms of energy produced and behaviour toward snow. After three years of operation, we make the following conclusions:

- The various de-icing solutions depend considerably on the specific features of the roof and installation: The height of the modules, the tilt/slope of the modules, the space between modules, the ballasting of the installations, are important parameters.
- Among passive solutions, the bifacial HIT Double panel is very promising. The damp-proof film impact remains to be validated (an upper tilt of the modules shall enable us to measure this impact).
- The active de-icing solutions did not show their efficiency in our first tests, but the reverse current flows do not seem to damage the health or impact any way the efficiency of the installations.

## Résumé

Les installations photovoltaïques du lycée Blaise-Cendrars ont été pensées depuis le départ pour tester et comparer les performances de différentes solutions en terme d'énergie produite et notamment le comportement vis-à-vis de la neige. Au bout de plus de trois ans d'exploitation, nous tirons le bilan global suivant :

- Les solutions de déneigement sont plus ou moins pertinentes en fonction des caractéristiques particulières du toit et de la configuration de l'installation: la hauteur des modules, l'inclinaison des panneaux, l'espacement entre panneaux et le lestage sont notamment des paramètres importants.
- Parmi les solutions passives, le panneau bifacial HIT Double est très prometteur. La solution hydrofuge reste à valider (une inclinaison supérieure des modules permettra potentiellement de la mesurer).
- Les solutions actives de déneigements n'ont pas prouvé leur efficacité dans nos premiers tests, mais l'injection de courant « inverse » ne semble pas être néfaste pour la santé ou le rendement des installations.



Figure 1: Vue des installations avec déneigement progressif

## Contexte

Le projet, en partenariat avec le canton de Neuchâtel, Viteos SA et Planair SA, se base sur une installation didactique sur les toits du Lycée Blaise-Cendrars à La Chaux-de-Fonds.

Cette installation a permis de comparer la production de différentes technologies photovoltaïques dans des conditions d'enneigement. Les différentes technologies ainsi que les systèmes de déneigement étudiés sont répertoriés dans le paragraphe « technologies installées ».

La conception, l'installation des capteurs et des systèmes de déneigement se sont déroulés durant l'année 2011 (voir Figure 2, schéma général de communication). Les mesures de productions des différentes technologies se sont déroulées durant l'hiver 2011-2012 et 2013-2014.

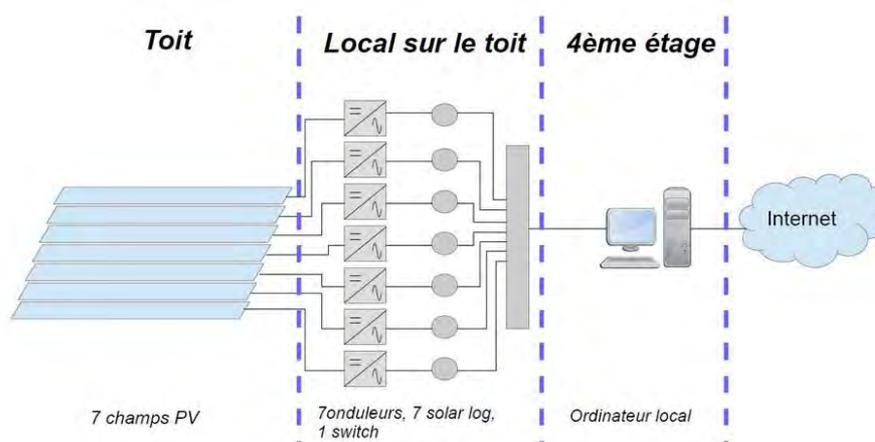


Figure 2: Schéma simplifié de communication de l'installation photovoltaïque du Lycée Blaise-Cendrars à La Chaux-de-Fonds

Le tableau ci-dessous, résume les évènements majeurs de l'installation:

Quoi	Quand
Mise en place des installations de production PV sur les toits	courant 2011
Conception, installation des capteurs et systèmes de déneigement	courant 2011
Première acquisition des données de production de Solutronic	début janvier 2012
Première acquisition des données de consommation (2012 seulement)	10. janv. 2012
Début d'acquisition des données de production (toutes hormis Solutronic)	17. janv. 2012
Modification de la position du senseur de présence neige d'Eulektra	17. févr. 2012
Ajout d'un câble chauffant sur la solution Eulektra	début janvier 2013
Problème de communications à priori résolu	courant 2014

Tableau 1: histogramme des évènements majeurs de l'installation

Il est à noter qu'au jour de l'édition du rapport, l'installation semble fonctionner correctement.

Certains paramètres comme l'exposition au vent ou l'orientation vis-à-vis du soleil, semblent favoriser le déneigement sur certaines installations selon les périodes, rendant la comparaison pas entièrement objectives, et nous supposons que le temps d'étude de trois ans estompera ces différences. Les données de la consommation du système Eulektra ne sont pas exploitables au jour de l'édition du présent document (données « GZ » dans le solar log).

Concernant le climat durant les années étudiées, les informations ci-dessous permettent de nous apporter des renseignements :

### Conditions climatiques 2013/2014

L'hiver 2013/2014 a été caractérisé par sa douceur, une quantité de neige faible et un faible niveau de tenue de la neige. Les graphiques ci-dessous montrent les chutes de neige (hauteur en cm) et la couche restante:

### Graphique des chutes de neige hiver 2013-2014

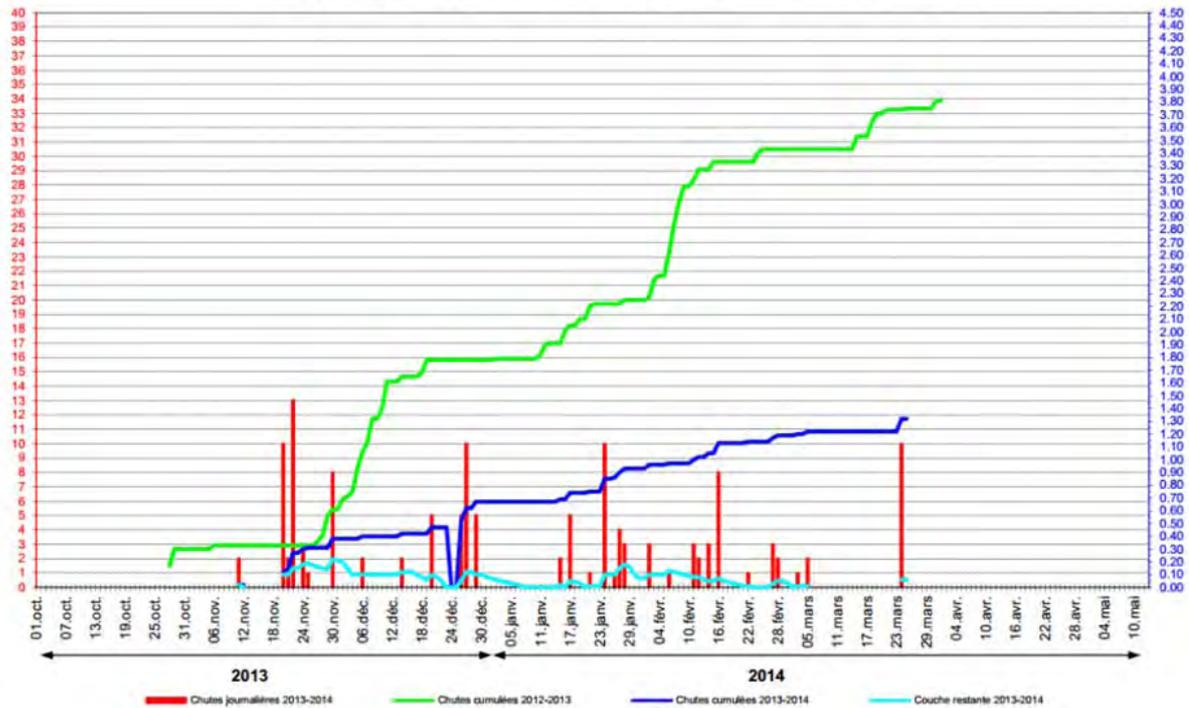


Figure 3: aperçu annuel 2013/2014 des chutes de neige et de sa tenue (Source : Service du Domaine public, <http://www.chaux-de-fonds.ch/mobilite-urbanisme/circulation-stationnement/mesures-hivernales-et-deneigement>)

L'hiver 2012/2013 a été ponctué de fortes chutes de neige et plusieurs périodes de tenue de la couche résiduelle épaisse durant notre période d'étude :

### Graphique des chutes de neige hiver 2012-2013

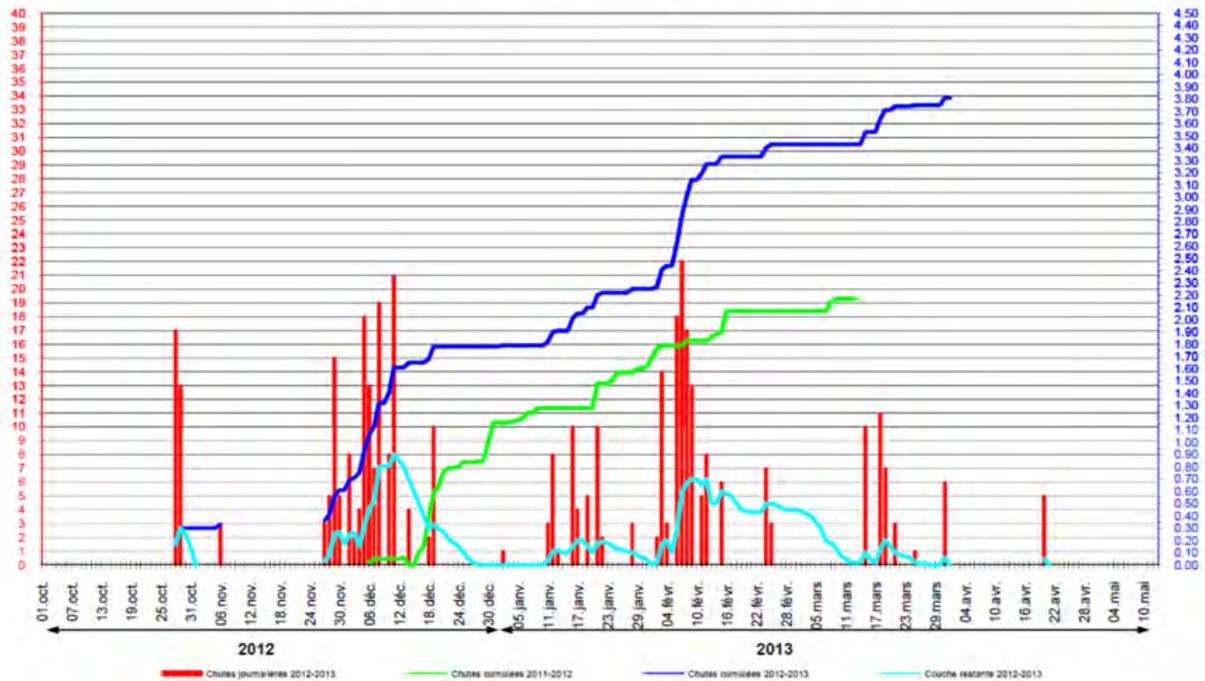
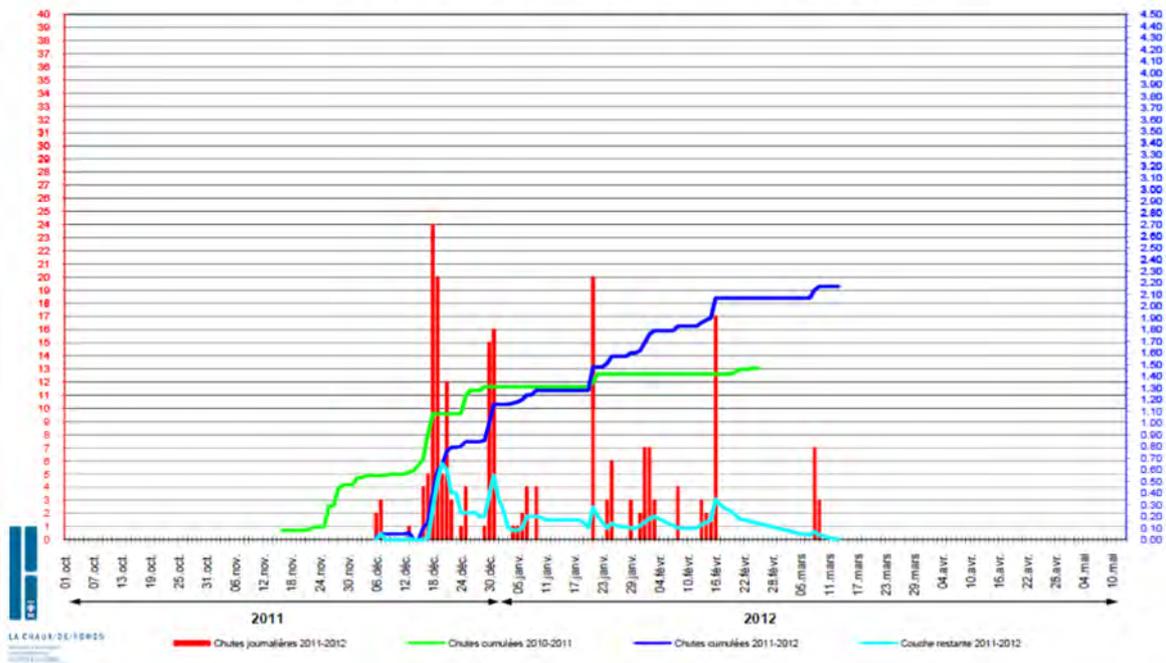


Figure 4: aperçu annuel 2012/2013 des chutes de neige et de sa tenue (Source : Service du Domaine public, <http://www.chaux-de-fonds.ch/mobilite-urbanisme/circulation-stationnement/mesures-hivernales-et-deneigement>)

Service de la voirie - 22.04.2013

L'hiver 2011/2012 a été ponctué de quelques chutes de neige et une tenue constante de la couche résiduelle durant la période d'étude :

Graphique des chutes de neige hiver 2011-2012



Service de la voirie - 17.04.2012

Figure 5: aperçu annuel 2011/2012 des chutes de neige et de sa tenue (Source : Service du Domaine public, <http://www.chaux-de-fonds.ch/mobilite-urbanisme/circulation-stationnement/mesures-hivernales-et-deneigement>)

Evolution chutes de neige cumulées

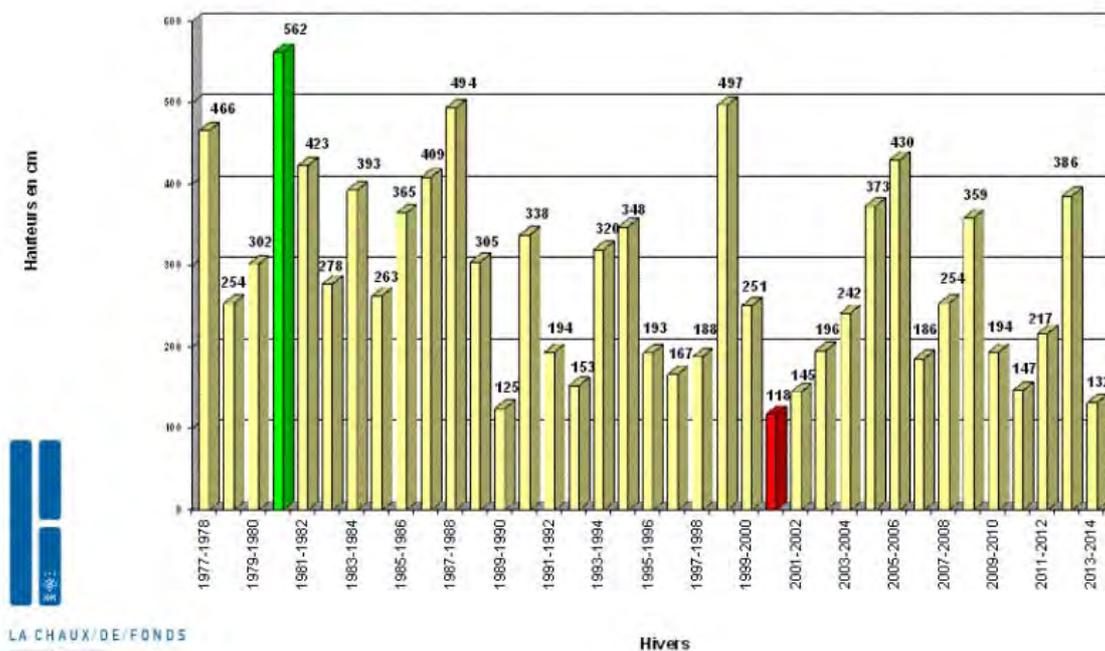


Figure 6: évolution des chutes de neiges cumulées, <http://www.chaux-de-fonds.ch/mobilite-urbanisme/circulation-stationnement/mesures-hivernales-et-deneigement>

## Objectifs

L'objectif du projet est de comparer la production de différentes technologies photovoltaïques dans des conditions d'enneigement.

Ce document fait le bilan du comportement des installations en termes de bilan de production électrique sur les trois années écoulées depuis l'installation, en se focalisant sur les trois derniers hivers.

Une attention toute particulière est portée sur les solutions actives de déneigement.

## Procédures / Méthodologie

Nous étudions ici la production électrique sur les trois années écoulées depuis l'installation, en se focalisant sur les trois derniers hivers. La même période de l'année sera étudiée avec l'intention de comparer les productions sur le même nombre d'heures (du 10 janvier à minuit au 31 mars à 23:59). Concernant les solutions actives de déneigement (Solutronic et Eurelektra), les données de consommation seront prises en compte lorsque présentes et, leur production fera l'objet d'un bilan.

Nous réalisons en premier lieu un historique technique des installations (répertoriant les incidents techniques et/ou modifications matérielles pertinentes etc.) afin de faire le bilan de l'histoire technique des installations (voir contexte). Il est à noter que pour les mêmes installations, et compte tenu de certains facteurs hors de contrôle (supposés climatiques comme l'intensité et l'orientation du soleil, le passage de nuages etc.), la neige accumulée ne se retire pas à la même vitesse, même sur les panneaux « passifs », et malgré l'absence d'ombrage, une inclinaison et une orientation communes. Nous comptons sur l'effet de durée des mesures pour minimiser ces différences hors de notre contrôle.

Nous nous focaliserons sur les différences relatives de production entre les installations plutôt que sur les résultats absolus de production des installations, afin d'évaluer les performances des systèmes de déneigement entre eux dans un contexte pratique et durant les mêmes périodes.

Nous ne prendrons en compte que les résultats de production lorsque toutes les données de toutes les installations ont été acquises ou qu'elles sont toutes absentes (il peut arriver durant certaines périodes que les données de certaines solutions n'aient pas été acquises (eg : problème d'onduleur, incident de communication, autre..)).

Notre niveau d'analyse sera la moyenne journalière : en consultant la plateforme d'acquisition de données (<http://viteos.solarlog-web.ch/1788.html>), nous vérifierons par méthode visuelle que les données ont bien été acquises pour toutes les installations.

## Technologies installées

Les technologies de modules photovoltaïques suivantes ont été installées sur le toit du Lycée Blaise-Cendrars :

Technologie	Fabricant	Puissance de l'installation
Si Amorphe	Flexcell	1.35 kW <sub>p</sub>
Si Monocristallin	Bosch	1.41 kW <sub>p</sub> (x5)
HIT <sup>1</sup> Double	Sanyo	1.26 kW <sub>p</sub>
Si Polycristallin	Trina	1.41 kW <sub>p</sub>

Tableau 2: type de technologies des panneaux PV

La technologie amorphe a été choisie pour ses propriétés de sensibilité au rayonnement diffus, qui devrait lui permettre de chauffer même avec une faible épaisseur de neige.

La technologie bifaciale HIT Double a été choisie pour sa double couche photovoltaïque, qui devrait lui permettre de mieux profiter de l'albédo et de monter en température par la réflexion de la lumière sur la neige environnante.

Les modules du fabricant Trina permettront de comparer la production de panneaux de fabrications chinoises et de panneaux d'origine allemande de même puissance (Bosch).

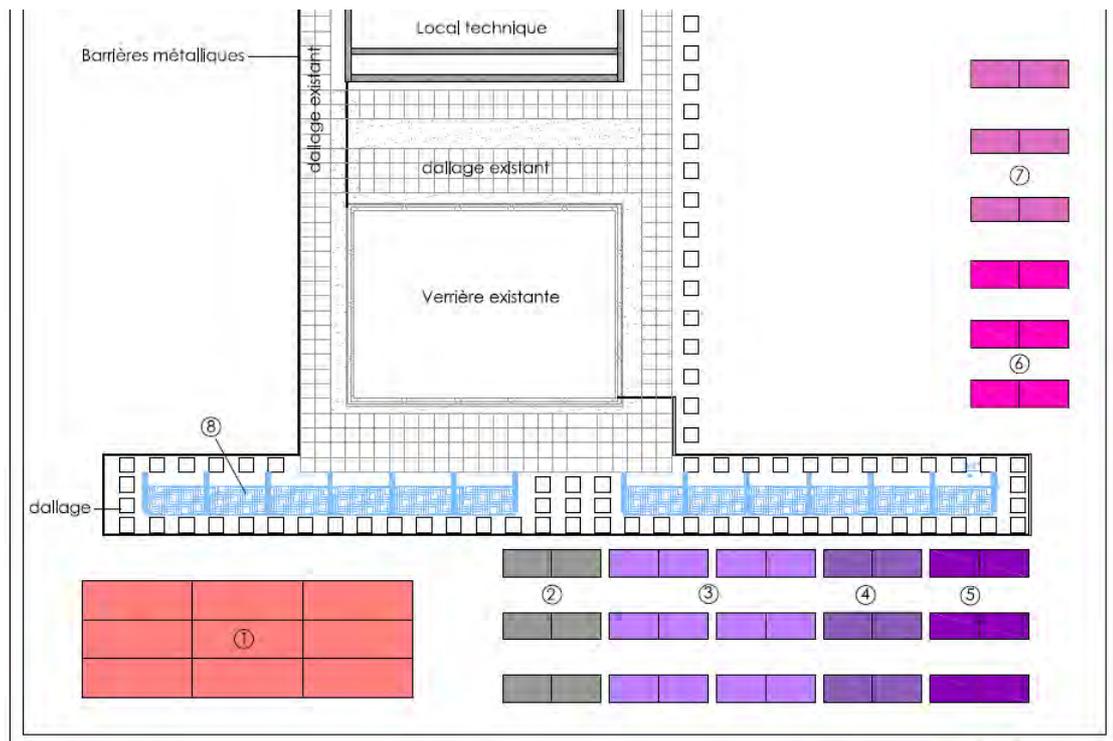
<sup>1</sup> HIT : Heterojunction with Intrinsic Thin layer

Les capteurs Flexcell (technologie amorphe) sont posés directement au sol et inclinés faiblement. Tous les autres capteurs sont inclinés à 20°. Les solutions de déneigement installées sur les différents champs de capteurs Bosch sont :

Type	Solution de déneigement	Remarques
Si Monocristallin, 1.41 kW <sub>p</sub>	Sans déneigement	Installation de référence
Si Monocristallin, 2,82 kW <sub>p</sub>	Solutronic (solution 1)	Inversion <b>manuelle</b> du courant dans les panneaux
Si Monocristallin, 1.41 kW <sub>p</sub>	Eulekra (solution 2)	Inversion <b>automatique</b> du courant dans les panneaux
Si Monocristallin, 1.41 kW <sub>p</sub>	FRESO (solution 3)	Application de polymère permettant de rendre les surfaces hydrofuge.

Tableau 3: type de solution active de déneigement

L'installation complète dispose de 8 champs d'environ 1.4 kW<sub>p</sub> chacun, soit une puissance totale d'environ 11 kW<sub>p</sub>. La solution de déneigement Solutronic nécessite deux champs de capteurs pour fonctionner : il n'y a donc que 7 champs représentés sur le schéma ci-après.



**Légende:**

- 1) PV amorphe 44 m<sup>2</sup> 1.35 kWc
- 2) PV monocristallin Bosch 10 m<sup>2</sup> 1.41 kWc non enneigé = Référence
- 3) Référence avec sol 1 déneigement: Solutronic
- 4) Référence avec sol 2 déneigement: Freso
- 5) Référence avec sol 3 déneigement: Eulekra
- 6) PV polycristallin Trina 10 m<sup>2</sup> 1.41 kWc
- 7) PV monocristallin Sanyo HIT double 10 m<sup>2</sup> 1.26 kWc
- 8) Panneaux thermiques FRIAP TERZA 30 m<sup>2</sup>

**Echelle:**



Figure 7: vue d'ensemble de l'installation sur le toit du Lycée

Chacun des 7 champs PV dispose de son propre onduleur et d'un équipement de supervision (Solarlog) permettant d'enregistrer les différents paramètres (production d'électricité, T° extérieure, ensoleillement (W/m<sup>2</sup>).

Les deux champs disposant d'un système d'inversion de courant possèdent un équipement de mesure de l'énergie consommée.

## Résultats

### Bilan de l'hiver 2014

	Janvier (du 10 au 31)	Février (du 01 au 28)	Mars (du 01 au 31)	Bilan 2014
<b>Eulekra</b>				
<i>consommation</i> [kWh/kWc]	<i>n.a</i>	<i>n.a</i>	<i>n.a</i>	<b>139</b>
<i>production</i> [kWh/kWc]	<i>n.a</i>	25,09	113,44	
<b>Solutronic</b>				
<i>consommation</i> [kWh/kWc]	<i>n.a</i>	<i>n.a</i>	<i>n.a</i>	<b>144</b>
<i>production</i> [kWh/kWc]	13,02	22,64	108,65	
<b>Bosch référence</b>				
<i>production</i> [kWh/kWc]	<i>n.a</i>	17,67	103,84	<b>122</b>
<b>Freso</b>				
<i>production</i> [kWh/kWc]	<i>n.a</i>	17,47	104,22	<b>122</b>
<b>Sanyo HIT D</b>				
<i>production</i> [kWh/kWc]	<i>n.a</i>	25,89	128,87	<b>155</b>
<b>Trina</b>				
<i>production</i> [kWh/kWc]	<i>n.a</i>	20,62	109,69	<b>130</b>
<b>Flexcell</b>				
<i>production</i> [kWh/kWc]	<i>n.a</i>	8,58	55,22	<b>64</b>

Tableau 4: production et consommation des différentes solutions avec bilan sur la période janvier-mars 2014

#### Remarques importantes :

- Il est à noter que des données sont manquantes pour toutes les installations du 7 février au 19 février 2014.
- Selon l'analyse des données acquises par le solarlog, le champ **solutronic** a été le seul champ à produire de l'électricité entre le 20 novembre 2013 et le 6 février 2014 (les données des autres installations indiquent 0kW durant toute cette période). Il est à noter que la période du 20 novembre correspond à une forte période de chute de neige à La Chaux-de-Fonds. Compte tenu que nous ne disposons pas des données de consommation de cette installation, nous ne sommes néanmoins pas en mesure de conclure de manière évidente quoi que ce soit concernant l'efficacité finale de cette solution.

## Mise à jour du bilan de l'hiver 2013

Des données de 2013 sont désormais disponibles sur le solar log, suite aux travaux commandés par Viteos et par conséquent les valeurs du bilan indiquées dans le tableau bilan du rapport intermédiaire 2013 se trouvent modifiées au jour de l'édition du rapport.

Le tableau ci-dessous présente la mise à jour du bilan de l'hiver 2012/2013 :

	Janvier (du 10 au 31)	Février (du 01 au 28)	Mars (du 01 au 31)	Bilan 2013
<b>Eulekra</b>				
<i>consommation [kWh/kWc]</i>	<i>n.a</i>	<i>n.a</i>	<i>n.a</i>	<i>n.a</i>
<i>production [kWh/kWc]</i>	<i>n.a</i>	<i>n.a</i>	22,23	
<b>Solutronic</b>				
<i>consommation [kWh/kWc]</i>	<i>n.a</i>	<i>n.a</i>	<i>n.a</i>	<b>39</b>
<i>production [kWh/kWc]</i>	9,05	15,18	14,41	
<b>Bosch référence</b>				
<i>production [kWh/kWc]</i>	11,61	0,91	14,68	<b>27</b>
<b>Freso</b>				
<i>production [kWh/kWc]</i>	11,01	0,87	14,53	<b>26</b>
<b>Sanyo HIT D</b>				
<i>production [kWh/kWc]</i>	17,24	1,60	23,43	<b>42</b>
<b>Trina</b>				
<i>production [kWh/kWc]</i>	17,43	1,26	16,65	<b>35</b>
<b>Flexcell</b>				
<i>production [kWh/kWc]</i>	13,59	0,96	5,84	<b>20</b>

Tableau 5: production et consommation des différentes solutions avec bilan sur la période janvier-mars 2013

## Mise à jour du bilan de l'hiver 2012

Au jour de l'édition de ce rapport, certaines données absentes en 2012, notamment des données de production concernant les installations Flexcell et Trina sont disponibles au jour de l'édition du rapport. Compte tenu de la campagne de mesure de la consommation des installations Eulektra et Solutronic et leur suivi particulier durant 2012, il a par contre été décidé de ne pas modifier le contenu du bilan dressé en 2012 concernant ces deux dernières installations.

	Janvier (du 10 au 31)	Février (du 01 au 28)	Mars (du 01 au 31)	Bilan 2012
<b>Eulektra</b>				
<i>consommation [kWh/kWc]</i>	133	295	52	<b>-291</b>
<i>production [kWh/kWc]</i>	9	52	128	
<b>Solutronic</b>				
<i>consommation [kWh/kWc]</i>	2	6	0	<b>170</b>
<i>production [kWh/kWc]</i>	6	44	127	
<b>Bosch référence</b>				
<i>production [kWh/kWc]</i>	6	36	122	<b>164</b>
<b>Freso</b>				
<i>production [kWh/kWc]</i>	6	29	121	<b>156</b>
<b>Sanyo HIT D</b>				
<i>production [kWh/kWc]</i>	9	35	150	<b>193</b>
<b>Trina</b>				
<i>production [kWh/kWc]</i>	10	52	128	<b>189</b>
<b>Flexcell</b>				
<i>production [kWh/kWc]</i>	7	24	130	<b>161</b>

Tableau 6: production et consommation des différentes solutions avec bilan sur la période janvier-mars 2012

## Evaluation des résultats

L'hiver 2014 a été marqué par les points suivants :

- une grande douceur et une épaisseur moyenne de neige restante faible,
- la persistance des problèmes de communication concernant l'installation, avec notamment une grande période sans données, et des données de consommation d'énergie consommée par les solutions actives de déneigement indisponibles.

Néanmoins les remarques particulières suivantes peuvent être faites concernant l'hiver 2014 :

- la production en kWh des solutions Eulektra et Solutronic ont été à peu près équivalentes sur les mois de février et mars,
- la seule installation bénéficiant de données de production positives entre le 20 novembre 2013 et le 6 février 2014 a été « Solutronic »

## Bilan des résultats des trois hivers 2012 à 2014

En fonction des résultats de chaque hiver, nous pouvons dresser le bilan suivant :

Il est à noter que compte tenu des conditions climatiques très différentes, ainsi que de la perte de données en 2014 et l'absence de données continues concernant la consommation des solutions actives de déneigement, l'intérêt du tableau ci-dessous est avant tout d'avoir une vue d'ensemble de la production par an pour chaque installation (comparaison relative entre installations par année) :

	2012	2013	2014
<b>Eulektra</b>			
<i>Bilan production [kWh/kWc]</i>	-291**	n.a	139*
« Classement »	7	n.a	3
<b>Solutronic</b>			
<i>Bilan production [kWh/kWc]</i>	170	39*	144*
« Classement »	3	2	2
<b>Bosch référence</b>			
<i>Bilan production [kWh/kWc]</i>	164	27	122
« Classement »	4	3	5
<b>Freso</b>			
<i>Bilan production [kWh/kWc]</i>	156	26	122
« Classement »	6	4	6
<b>Sanyo HIT D</b>			
<i>Bilan production [kWh/kWc]</i>	193	42	155
« Classement »	1	1	1
<b>Trina</b>			
<i>Bilan production [kWh/kWc]</i>	189	17	130
« Classement »	2	5	4
<b>Flexcell</b>			
<i>Bilan production [kWh/kWc]</i>	161	6	64
« Classement »	5	6	7

Tableau 7: Bilan de production des différentes solutions durant les trois hivers 2012, 2013 et 2014 (\*: valeur incertaine compte tenu du manque de données de consommation / \*\*: valeur négative indiquant plus de consommation que de production).

Le classement représente la position relative des installations les unes par rapport aux autres concernant le bilan d'énergie produite.

## Bilan et remarques liées aux solutions passives

- Les illustrations ci-dessous donnent des informations sur le principe des panneaux Sanyo:

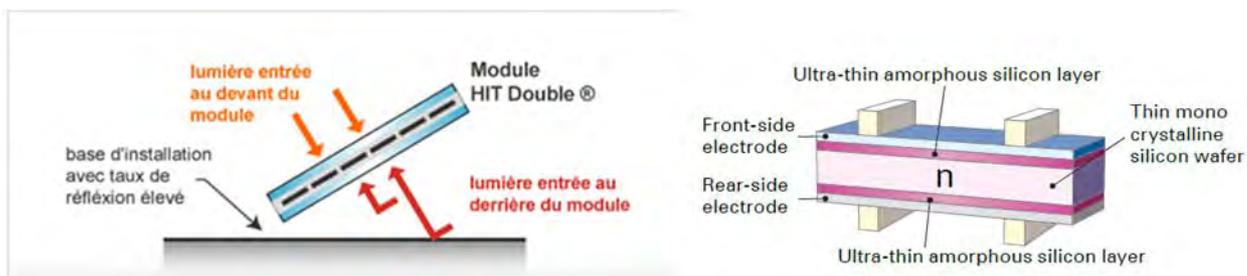


Figure 8: Illustration des caractéristiques du module HIT

L'installation **Sanyo** avec panneaux double face à les avantages suivants :

- production électrique même quand le panneau est recouvert,
- montée en température permettant d'évacuer la neige plus rapidement (voir figure 8)

Nous pouvons noter ses inconvénients suivants :

- n'est pas adaptée aux toitures inclinées,
- le prix des modules est plus élevé que des panneaux standards



Figure 9: Profil de production du 26 janvier 2012 de l'installation Sanyo (courbe marron) et de l'installation de référence (vert)

## Bilan et remarques liées aux solutions actives

La solution de déneigement **Eulektra** est une solution automatique de déneigement. Malheureusement, la consommation est bien plus importante que le gain apporté par cette solution.

Voici quelques conditions afin que le déneigement soit pertinent :

- météo de la journée suffisante pour apporter la perte due au déneigement,
- t° ambiante pas trop froide, sinon l'effet du déneigement électrique proposé ici est nul,
- pas de rechute de neige rapide suite au déneigement,
- activation du déneigement quand une irradiation est déjà présente : le soleil poursuit l'action enclenchée, l'inversion de courant accélère les choses,
- irradiation à venir suffisante pour que l'inversion de courant soit pertinente (gains>pertes).

L'expérience du terrain nous a également permis de voir que le détecteur de neige était placé trop bas sur le panneau. Nous l'avons donc remonté.

La solution de déneigement **Solutronic** est une bonne alternative quand une personne sur place peut prendre en compte tous les paramètres ci-dessus.

Les solutions avec injection d'énergie n'ont pas démontré leur efficacité pour des conditions très froides, le surplus d'énergie à injecter pour obtenir un effet reste largement supérieur au gain possible dans les jours suivants.

#### Remarques concernant le rendement et les solutions actives :

Le graphique ci-dessous montre l'**évolution des rendements** (kWh/kWp) des solutions Eulektra, Solutronic et Bosch référence durant les périodes de « juin, juillet, août 2012 », « juin, juillet, août 2013 », et « juin, juillet, août 2014 »

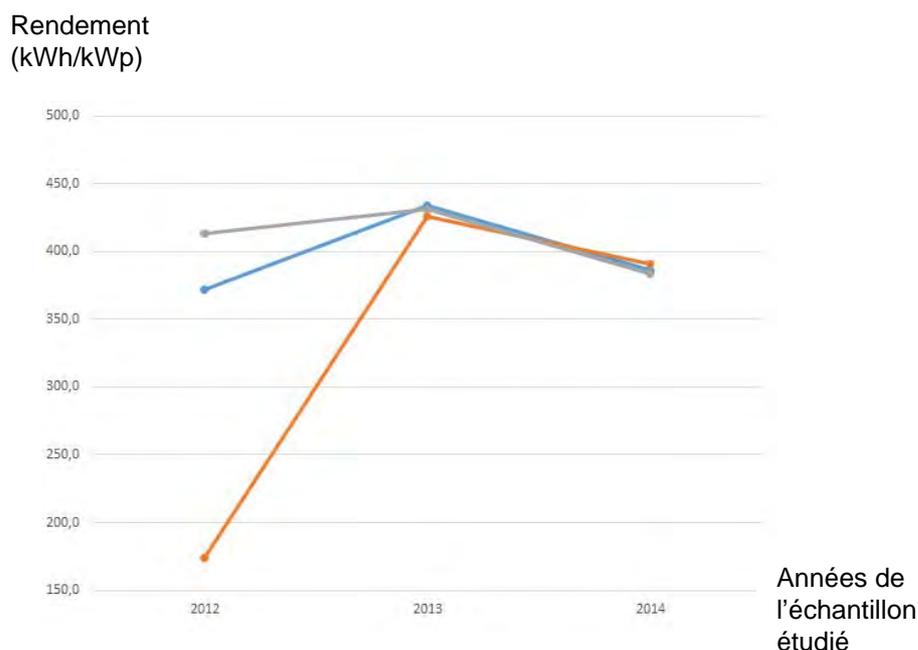


Figure 10: Evolution des rendements des solutions Eulektra, Solutronic, et Bosch référence

L'évolution du rendement des solutions de déneigements actives montre que le rendement ne semble **pas affecté** en utilisant l'inversion de courant dans les panneaux.

### Conclusions et perspectives

Concernant le **bilan** final des trois hivers de 2012 à 2014, et compte tenu des conclusions de tous les rapports intermédiaires, les **conclusions finales** suivantes ont pu être faites :

- L'installation **Sanyo** avec panneaux double face a montré le meilleur rendement ces trois années consécutives. Ces performances sont d'autant plus notables que dans le cas de Blaise-Cendrars, les panneaux ont été disposés bas par rapport aux autres installations.
- La solution **Solutronic**, avec système manuel de déneigement actif s'est avéré être une alternative intéressante dans le cas où une intervention humaine, proche et régulière, était possible durant les événements neigeux. Cette solution est limitée concernant le rendement global, particulièrement dans des conditions très froides. Cette solution est pertinente si une personne est sur place et prend en compte les différents paramètres permettant d'optimiser l'efficacité de cette solution. L'utilisation d'une webcam ou l'exploitation d'un service de contrôle commande à distance plus développé (eg : alertes SMS, outils d'aide à la décision etc...) pourrait s'avérer pertinente (dans des contextes plus enneigés, ou des parcs plus gros).
- La solution **Eulektra**, avec système automatique de déneigement actif, a encore à prouver son efficacité globale, d'une part en prenant en compte les pertes de consommation électrique et

d'autre part en prenant en compte les coûts de la solution. Le bilan (production – consommation) de cette solution est négatif, et le contrôle commande doit être optimisé (eg : modification de la résistance de chauffage ou implémentation de gardes fous type limites de fonctionnement horaires, prise en compte de l'épaisseur de neige, température, météo des prochains jours,...).

- La solution **Trina** a montré des performances notables par rapport à la référence.
- La solution **Freso** a donné des résultats à peu près comparables avec la solution de référence. L'application du polymère hydrofuge sur les panneaux de la solution **Freso** n'a donc visiblement pas apporté d'amélioration.
- En moyenne, la solution **Flexcell** montre la moins bonne performance lors de présence de neige.

Nos **conclusions finales générales** sont les suivantes :

- Les solutions de déneigement sont plus ou moins pertinentes en fonction des caractéristiques particulières du toit et de la configuration de l'installation: la hauteur des modules, l'inclinaison des panneaux, l'espacement entre panneaux et le lestage sont notamment des paramètres importants.
- Parmi les solutions passives, le panneau bifacial HIT Double est très prometteur. La solution hydrofuge reste à valider.
- Les solutions actives de déneigement n'ont pas prouvé leur efficacité dans nos premiers tests, mais l'injection de courant « inverse » ne semble pas être néfaste pour la santé ou le rendement des installations.

Les **perspectives** d'études sont, en coordination avec les partenaires, les suivantes :

- Correction de l'acquisition des données de consommation de la solution Eulekra sur le solar log et intégration des données de consommation de la solution Solutronic.
- Exploitation des données de consommation une fois obtenues (analyse bilan sur l'ensemble de la saison hivernale et analyser le gain/perte au niveau annuel (nous n'avons toujours pas pu établir le bilan production/consommation des solutions actives en 2014).
- Etablir, en fonction de différents paramètres (neige récente, température ambiante, prévision météorologique, ensoleillement présent et à venir), des recommandations pour la mise en route du déneigement pour la solution Solutronic.
- Mettre en place, éventuellement, un système de contrôle commande plus développé de la solution Solutronic afin de gagner en flexibilité (eg : une mise en marche par SMS).
- Modifier l'inclinaison des modules pour l'hiver 2014-2015 afin de mettre en évidence les changements (le système installé nous offre cette possibilité).
- Envisager de tester les performances de l'installation HIT pour des hauteurs différentes.
- Mesurer l'impact du polymère hydrofuge en modifiant l'inclinaison de l'installation FRESO et éventuellement en l'appliquant sur d'autres types de panneaux (eg : application sur un panneau HIT).

## 7. Références

- **Photovoltaïque et neige: Horizon des solutions pour l'installation sur les toits dans les régions enneigés**, Annual Report 2011 (Rapport intermédiaire 2011, OFEN, SI / 500568-01), Auteurs : Florian Bertrand et Lionel Perret, Planair SA.
- **Photovoltaïque et neige: Horizon des solutions pour l'installation sur les toits dans les régions enneigés**, Annual Report 2012 (Rapport intermédiaire 2012, OFEN, SI / 500568-01), Auteurs : Florian Bertrand et Lionel Perret, Planair SA.
- **Photovoltaïque et neige: Horizon des solutions pour l'installation sur les toits dans les régions enneigés**, Annual Report 2013 (Rapport intermédiaire 2013, OFEN, SI / 500568-01), Auteurs : Dario Poroli et Lionel Perret, Planair SA.



# PVT-SOLARKRAFTWERK LINTH-ARENA SGU

## STROM UND WÄRME VOM DACH

### Annual Report 2014

Author and Co-Authors	Jürg Rohrer
Institution / Company	ZHAW Zurich University of Applied Sciences, Dep. Life Sciences,
Address	Campus Grüental, CH-8820 Wädenswil
Telephone, E-mail, Homepage	+41 58 934 54 33 / rohu@zhaw.ch / <a href="http://www.iunr.zhaw.ch">www.iunr.zhaw.ch</a>
Project- / Contract Number	SI/501095-01 / SI/501095-01
Duration of the Project (from – to)	1.10.2014 to 1.10.2019
Date	15. Dezember 2014

#### ABSTRACT

Photovoltaic thermal hybrid solar collectors or PVTs are solar panels that produce thermal and electrical energy. Therefore, they are able to harvest more energy per unit area compared to conventional PV modules.

Until today PVTs are predominantly used in conjunction with geothermal probes. In the present project the use of PVTs in conjunction with ground water heat pumps is assessed. The thermal energy produced by the PVTs is used to preheat the ground water for the heat pumps. This increases the seasonal performance factor (SPF) of the heat pumps - they consume less electrical energy. At the same time the ground water flow cools the PVTs and raises their electrical efficiency, which results in a higher electrical energy yield. From the energy point of view the use of PVTs is favorable. But the financial gains from the reduction of the heat pumps electrical energy demand and increased electrical energy yield of the modules is believed not to be sufficient to fully compensate the higher cost of such a system compared to a conventional PV system.

Within the scope of the P&D project operational experience with a system combining PVT and heat pumps shall be gathered. Furthermore, the conditions, under which the combination of PVTs and ground water heat pumps is economically viable, are assessed.

For that purpose a PVT and a PV system with an electric power rating of around 230 kWp is installed on the roof of the linth-arena sgu in Näfels, a building containing a sports center with a swimming pool, gymnasium, restaurant, hotel, wellness area, etc. The PVT part of the system accounts for approx. 20% of the roof area used for the solar system. Construction starts in spring 2015.

## Einleitung / Projektziele

Hybrid- oder PVT-Module erzeugen auf derselben Fläche sowohl Strom als auch Wärme und erlauben deshalb pro Flächeneinheit mehr Energie zu ernten als reine PV-Module. Sie eignen sich insbesondere dann, wenn ein Wärmebedarf auch im Sommer besteht oder die Wärme gut saisonal gespeichert werden kann. Diese Idee wird seit über 30 Jahren verfolgt, konnte sich aber bisher auf dem Markt einerseits aus wirtschaftlichen, andererseits aus technischen Gründen nicht wirklich durchsetzen [1, 2].



Abb. 1: PVT-Modul (Quelle: Meyer Burger)

Man unterscheidet zwischen abgedeckten Hybridmodulen für die Wärmeerzeugung bei hohen und unabgedeckten Hybridmodulen für die Wärmeerzeugung bei niedrigen Temperaturen. Abbildung 1 zeigt ein unabgedecktes PVT-Modul mit dem auf der Rückseite aufgebracht, ungedämmten Wärmetauscher. Am häufigsten werden solche Hybridmodule im Zusammenhang mit Erdwärmesonden und einer Wärmepumpe zur Gebäudeheizung und Warmwassererzeugung eingesetzt [3,4]. Dadurch sollen Erdwärmesonden regeneriert werden und im Winter höhere Temperaturen für die Wärmepumpe liefern, sodass ihre Jahresarbeitszahl (JAZ) verbessert wird.

Das Problem der saisonalen Wärmespeicherung entfällt, wenn die Wärme auch im Sommer verwendet werden kann. Dies ist typischerweise z.B. bei Spitälern, Sportzentren, Hallenbädern, usw. der Fall. Nicht publizierte Untersuchungen der ZHAW Wädenswil haben gezeigt, dass Hybridmodule beim heutigen Preisstand selbst ohne Wärmespeicherung nicht wirtschaftlich sind [6]. Die gleichzeitige Nutzung der solaren Wärme wäre energetisch sinnvoll, der energetische Mehrertrag vermag aber

die höheren Kosten der Hybridmodule gegenüber PV-Modulen nicht zu kompensieren [6]. Von den Herstellern wird demgegenüber häufig argumentiert, der Einsatz von Hybridmodulen sei bereits heute wirtschaftlich rentabel [5]. Entsprechende Messergebnisse und Kostenrechnungen aus realen Anwendungen wurden aber bisher nicht zur Verfügung gestellt.

Mit dem vorliegenden Projekt wird auf dem Dach des Sportzentrums linth-arena sgu in Näfels (Sportzentrum mit Hallen- und Freibad, Mehrfachturnhalle, Kletterwand, Restaurant, Hotel, Sauna, Fitness, usw.) eine PV- und eine PVT-Anlage gebaut und die solaren Erträge während 5 Jahre gemessen und verglichen. Dabei werden insbesondere die folgenden Ziele verfolgt:

- Sammeln von Betriebserfahrungen bei der Integration von PVT-Modulen mit Grundwasser-Wärmepumpen zur Vorwärmung des Grundwassers.
- Messung des elektrischen Mehrertrages von PVT- gegenüber PV-Modulen
- Anhand der Ertrags-Messungen soll abgeschätzt werden, wie gross die Mehrkosten der Hybridmodule gegenüber PV-Modulen sein dürfen, damit die Hybridmodule für solche Anwendungsfälle wirtschaftlich konkurrenzfähig werden.
- Abklärung welcher Anteil an der Wärmeproduktion die Nutzung von Umgebungswärme in Zeiten geringer bzw. ohne Solarstrahlung hat
- Erfahrungen sammeln bezüglich der optimalen Steuerung der Wärmepumpe (Maximierung der JAZ, evtl. unter Einbezug von Wetterprognosen)

Für das Berichtsjahr 2014 war die Projektierung der Anlage geplant. Der Bau wird im Jahre 2015 erfolgen, sodass erste Messergebnisse per Ende 2015 zu erwarten sind.

## Kurzbeschreibung des Projekts / der Anlage

Der Verein Energieallianz Glarus-Linth erstellt auf dem Dach der linth-arena sgu (regionales Sportzentrum mit Hallen- und Freibad, Mehrfachturnhalle, Kletterwand, Restaurant, Hotel, Sauna, Fitness, usw.) eine PV-Anlage mit einer elektrischen Leistung von 230 kWp. Eine Studienarbeit an der ZHAW in Wädenswil mit dem Titel 'Optimiertes Energiekonzept für das Zentrum Lintharena sgu Näfels' [7] zeigte, dass auch im Sommer ein grosser Wärmebedarf besteht. Diese Wärme wird im Wesentlichen durch zwei Wärmepumpen bereit gestellt. Als Wärmequelle dient Grundwasser, welches je nach Jahreszeit eine Temperatur zwischen 5° bis 13° C aufweist [6]. Zur Abdeckung von Leistungsspitzen ist zudem eine Gasheizung vorhanden.

Weitere Studienarbeiten der ZHAW mit den Titeln 'Konzeptentwicklung & Anlagendokumentation einer PVT-Testanlage' [8], 'Evaluation PVT-Module Lintharena' [6] und 'Potentialabschätzung von Solargewinnung in öffentlichen Bädern' [9] haben gezeigt, dass der Einsatz von PVT-Modulen in der linth-arena sgu vielversprechend wäre. Die entstehende Niedertemperatur-Wärme könnte jederzeit (also auch im Sommer) verwendet werden. Mit der Wärme soll das Grundwasser vorgewärmt werden, sodass die Wärmepumpen eine höhere Jahresarbeitszahl erreichen und somit weniger Strom benötigen. Die Kühlung der PVT-Module wird in der warmen Jahreszeit zu einer gegenüber normalen PV-Modulen erhöhten Stromproduktion führen. Abbildung 2 zeigt das Grobschema der Anlage mit der hydraulischen Einbindung der PVT-Module.

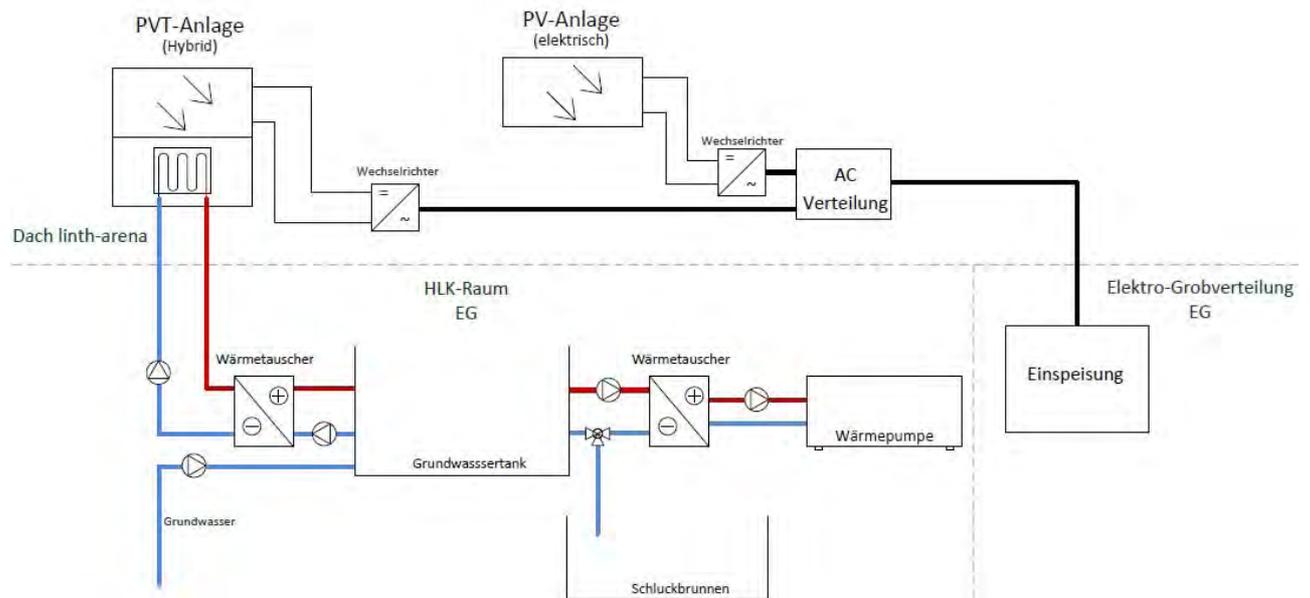


Abb. 2: Prinzipschema der Versuchsanlage

Aus energetischer Sicht sollte das ganze Dach mit PVT-Modulen bedeckt werden, aus finanziellen Überlegungen müsste aber das ganze Dach mit „normalen“ PV-Modulen bedeckt werden. Der Strompreis ist zu tief, sodass die finanziellen Einsparungen beim Stromverbrauch der Wärmepumpen und der prognostizierte elektrische Mehrertrag der PVT-Module die Mehrkosten der PVT-Module während der Lebensdauer der Anlage nicht kompensieren können [6].

Mit dieser Ausgangslage werden nun 20% des Solarkraftwerkes auf dem Dach der linth-arena sgu mit PVT-Modulen ausgeführt. Dieser Teil der Solaranlage dient als Pilot- und Demonstrationsobjekt zur Verfolgung der oben beschriebenen Zielsetzungen. Die elektrische Leistung bleibt dadurch gleich wie bei einer reinen PV-Anlage. Die thermische Leistung der PVT-Module beträgt maximal 160 kW, sodass die entstehende Wärme auch im Sommer im Gebäude verwendet werden kann. Abbildung 3 zeigt die vorgesehene Aufteilung der Dachfläche für PVT-Module (rot) und PV-Module (blau).

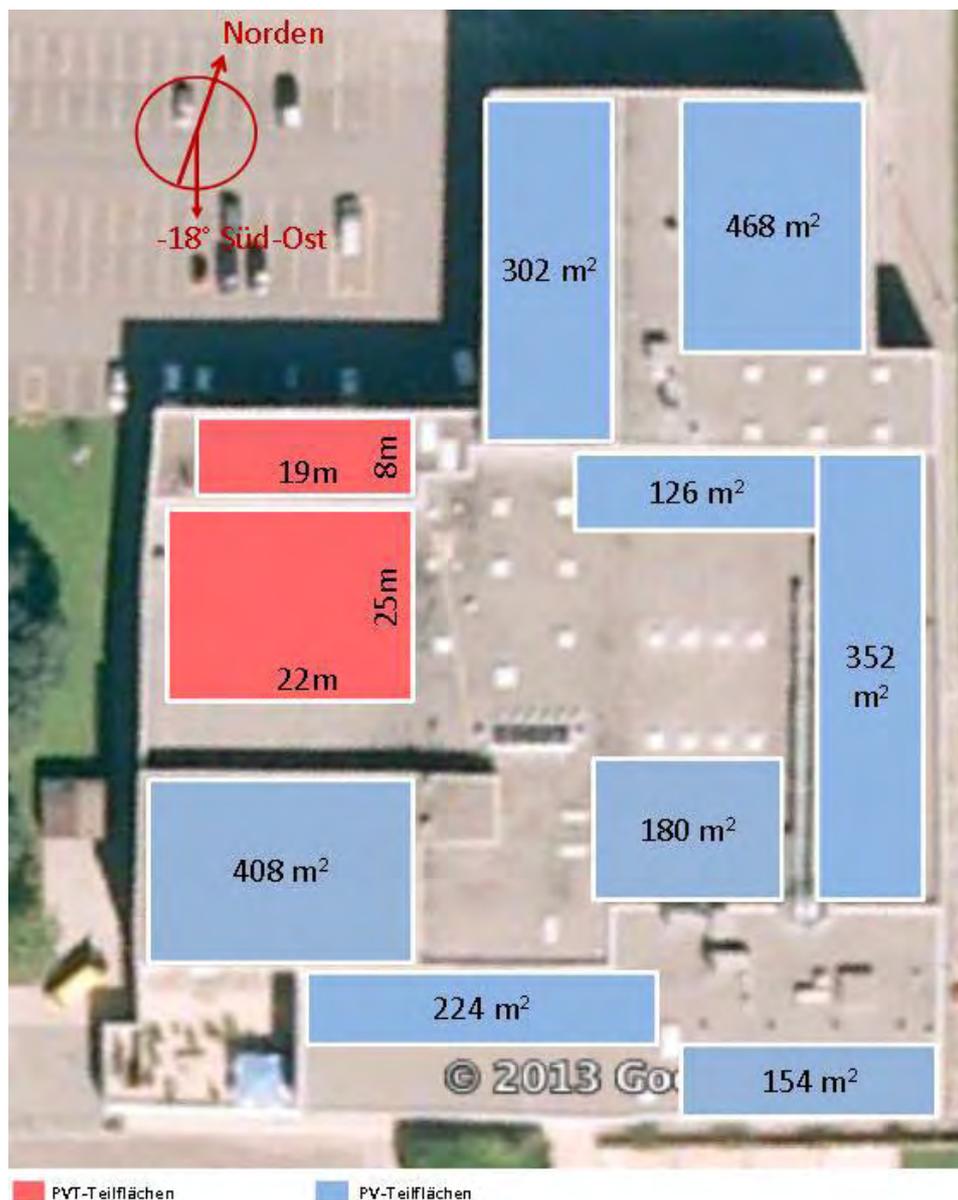


Abb. 3: Aufteilung der Dachfläche für PVT-Module in roter Farbe und PV-Module in blau (Bildquelle Google Maps, 2013, bearbeitet)

### Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse

Im Jahre 2014 wurde die Anlage projektiert, die Baueingabe eingereicht und der Bau der Anlage ausgeschrieben. Der Bau der Anlage soll im Frühjahr 2015 erfolgen, deshalb liegen noch keine Ergebnisse vor.

### Nationale Zusammenarbeit

Das Projekt wird in Zusammenarbeit mit den folgenden Partnern durchgeführt:

Die Genossenschaft **linth-arena sgu** stellt das Dach für den Bau der Solaranlage zur Verfügung. Bei der linth-arena sgu handelt es sich um ein grosses, weitherum bekanntes Begegnungs- und Sportzentrum mit 3-fach Turnhalle, Hallenbad, Freibad, Kletterhalle, Kraftraum, Restaurant, Hotel, Sauna, Skater-Park, Fussballfeldern, usw. in Näfels, Kanton Glarus. Sie gehört den Gemeinden Glarus Nord, Weesen und Schänis sowie den beiden Kantonen St. Gallen und Glarus. Siehe <http://www.linth-arena.ch/>

Die **Energieallianz Glarus-Linth** ist ein gemeinnütziger Verein, welcher die Energieregion Glarus-Linth mit einem hohen Energie-Selbstversorgungsgrad anstrebt und dafür Projekte initialisiert und selber realisiert. Siehe <http://www.Energieallianz-Glaruslinth.ch> Die Energieallianz Glarus-Linth realisiert als Bauherrin auf dem Flachdach der Linth-arena sgu in Näfels eine Photovoltaikanlage mit einer elektrischen Leistung von rund 230 kWp.

Die **Fachgruppe Solartechnik & Energieeffizienz an der Hochschule in Wädenswil (ZHAW)** betreibt angewandte Forschung und Entwicklung für die effiziente Anwendung von Solartechnologien. Neben dem effizienten Betrieb von Solaranlagen und Anwendungen für den Bau von Plusenergie-Gebäuden steht die Projektierung von PV-Anlagen im Gebirge im Fokus. Die Fachgruppe realisiert das Pilot- und Demonstrationsprojekt.

**Meyer Burger AG** gehört zu einer führenden und weltweit aktiven Technologiegruppe für innovative Systeme und Prozesse auf Basis von Halbleitertechnologien. Der Fokus der Gruppe liegt auf der Photovoltaik (Solarindustrie). Das Spektrum an Systemen, Produktionsanlagen und Dienstleistungen entlang der Wertschöpfungskette in der Photovoltaik umfasst die Prozesse Wafering, Solarzellen, Solarmodule und Solarsysteme. Meyer Burger AG liefert die PV- bzw. PVT-Module und die Unterkonstruktionen. Zudem finanziert Meyer Burger AG einen Teil des P&D-Projektes.

**Service 7000 AG** mit Sitz in Netstal (GL) ist ein führendes Dienstleistungsunternehmen und ein wichtiger Arbeitgeber in der Region Glarus. Service 7000 AG verkauft, installiert, unterhält und repariert sämtliche Haushaltgeräte aller Marken. Das Unternehmen tritt in diesem Projekt als Sponsor auf.

Die **Glarner Kantonalbank (GLKB)** ist mit 7 Standorten stark im Kanton Glarus verankert. Als Universalbank ist die GLKB auf das Hypothekar- und Spargeschäft sowie auf das Vermögensverwaltungs- und Anlagegeschäft fokussiert. Ihre Dienstleistungen erbringt die Bank primär an Kunden im Kanton Glarus und im angrenzenden Wirtschaftsgebiet. Das Unternehmen tritt in diesem Projekt als Sponsor auf.

Die **glarnerSach** ist eine öffentlich-rechtliche Anstalt des Kantons Glarus. Sie hat als kantonale Sachversicherung den gesetzlichen Auftrag Menschen, Tiere, Sachen und die Umwelt im Kanton Glarus nachhaltig vor Feuer-, Elementar- und anderen Schadenereignissen zu schützen und zu bewahren. Die glarnerSach finanziert die reine PV-Anlage auf dem Dach der linth-arena sgu und wird nach Abschluss des P&D-Projektes die PVT-Anlage weiter betreiben.

Der **Kanton Glarus** unterstützt den Bau der PVT-Anlage mit einem namhaften Beitrag aus dem kantonalen Förderprogramm „Thermische Solaranlagen“.

Das **Bundesamt für Energie (BFE)** unterstützt das P&D-Projekt mit einem Subventionsbeitrag.

Aufgrund der Lage der PVT-Anlage auf einer publikumsintensiven Einrichtung und der hohen Bekanntheit der linth-arena sgu, der ZHAW Wädenswil sowie der Projektpartner Meyer Burger, Service 7000, Glarner Kantonalbank, glarnerSach, Kanton Glarus und Energieallianz Glarus-Linth wird für dieses Projekt eine grosse Ausstrahlung weit über die Region hinaus erwartet.

## Referenzen

- [1] Ebert, V.; Günther, R.; Kremer, Z. u.a.: Fahrplan Solarwärme. Strategie und Maßnahmen der Solarwärme-Branche für ein beschleunigtes Marktwachstum bis 2030 , BSW – Bundesverband Solarwirtschaft e.V., Berlin (Hrsg.). 2012
- [2] Bertram, E.; Kirchner, M.; Rockendorf, G. u. a.: Solarthermie 2000+: Solare Gebäude-Wärmeversorgung mit unverglasten photovoltaisch-thermischen Kollektoren, Erdsonden und Wärmepumpen für 100% Deckungsanteil. Abschlussbericht zum Verbundvorhaben. Institut für Solarenergieforschung GmbH, Hameln (Hrsg.). 2011
- [3] Forrest Meggers, Volker Ritter, Philippe Goffin, Marc Baetschmann, Hansjürg Leibundgut, Low exergy building systems implementation, Energy, Volume 41, Issue 1, May 2012, Pages 48-55, ISSN 0360-5442, <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2011.07.031>.
- [4] Solardächer doppelt nutzen, BINE Projektinfo 10/2012, ISSN 0937-8367
- [5] Gysel Roman, Büttgenbach Simon, PVT (Hybrid) -Kollektoren, unveröffentlichter Vortrag, Meyer Burger AG, 2013
- [6] Hartmeier Benjamin, Evaluation PVT-Module Lintharena-sgu, unveröffentlicht, ZHAW Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften,, 2013
- [7] Gasser Remo, Irniger Benjamin, Optimiertes Energiekonzept für das Zentrum Lintharena Sgu Näfels, ZHAW Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften, unveröffentlicht, 2012
- [8] Rohrer Jürg, Arm Kevin, Konzeptentwicklung für eine PVT-Testanlage, ZHAW Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften, unveröffentlicht, 2013
- [9] Frei Raphael, Potentialabschätzung von Solargewinnung in öffentlichen Bädern, ZHAW Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften, unveröffentlicht, 2013

## Internationale Koordination

---

P. Hüsler <b>Schweizer Beitrag zum IEA PVPS Task 1 2014 - SI/400735 / SI/400735-02</b>	<b>233</b>
R. Frischknecht, F. Wyss <b>Schweizer Beitrag IEA PVPS Task 12 - 2014 Ökobilanzen von Solarstrom</b> - SI/500738 / SI/500738-03	<b>239</b>
T. Nordmann <b>Schweizer Beitrag IEA PVPS Task 13 – SI/500021 / SI/500021-04</b>	<b>246</b>
T. Friesen <b>Schweizer Beitrag IEA PVPS Task 13 – 2013/2014 – Performance and Reliability of PV Systems – 2014.02 – IEA PVPS Pool</b>	<b>252</b>
D. Marcel, L. Perret, C. Bucher, J. Remund <b>Schweizer Beitrag IEA PVPS Task 14 – High Penetration of PV Systems in Electricity Grids - 2011.01 / IEA PVPS Pool II</b>	<b>255</b>
J. Remund <b>Schweizer Beitrag IEA PVPS Task 46 - Solar Resource Assessment and Forecasting – SI/500184 / SI/500184-05</b>	<b>262</b>
P. Toggweiler <b>Photovoltaische Solarenergie-Systeme - SWISSOLAR – 17967</b>	<b>266</b>
S. Nowak, M. Gutschner, S. Oberholzer <b>SOLAR-ERA.NET - ERA-NET on Solar Electricity for the Implementation of the Solar Europe Industry Initiative - SOLAR-ERA.NET / EC FP7 321571</b>	<b>267</b>
S. Nowak, A. Mastronardi, S. Gnos <b>REPIC - Swiss Interdepartmental Platform for Renewable Energy and Energy Efficiency Promotion in International Cooperation - SECO UR-00123.04.01</b>	<b>273</b>





# SCHWEIZER BEITRAG ZUM IEA PVPS PROGRAMM, TASK 1

## Annual Report 2014

Author and Co-Authors	Pius Hüsser
Institution / Company	Nova Energie GmbH
Address	Schachenallee 29, CH-5000 Aarau
Telephone, E-mail, Homepage	062 834 03 00 / pius.huesser@novaenergie.ch <a href="http://www.iea-pvps.org">www.iea-pvps.org</a>
Project- / Contract Number	SI/400735 / SI/400735-02
Duration of the Project (from – to)	14.01.2014 – 31.12.2014
Date	31.01.2015

### ABSTRACT

The Swiss contribution to the PVPS Programme includes:

- National Survey Report, a summary of developments in the market and political areas. The report's data is integrated into the IEA's Trends in Photovoltaic Application Report.
- Targeted search for new contacts in the PV area, maintain a network of contacts.
- Contributions/organizations to/of national and international workshops.
- PR-work in Switzerland. Reference to the programme's international publications.
- Providing information for government, industry and media about the global development of PV.

The results of these activities include:

- National Survey Report (NSR) based on the statistics provided by the Swiss Association of Solar Professionals
- 2 Task 1 meetings in Tel Aviv (Israel) and Kyoto (Japan)
- 2 Workshops in Amsterdam and Kyoto
- Contributions to subtask "New Business Models for PV"
- Contribution to Subtask "Soft costs"

Ongoing work:

- Workshop organization with focus on utilities and business models in Paris (April 10th), Bangkok (Sept. 3rd) and Hamburg (Sept. 13th)
- Participation at Task 1 Meetings in Denver (April) and Ankara (October)
- Swiss data input for the "Snapshot on Global PV 1992 – 2014"
- National survey report 2014
- Contribution to subtask "New Business Models for PV", "Soft Costs", "Self Consumption"

## Einleitung / Projektziele

Innerhalb des IEA Implementing Agreements on Photovoltaic Power Systems kommt der Task 1 eine wichtige Bedeutung zu. Sie ist nicht nur der Kommunikationskanal für das gesamte Programm sondern seit 2013 berät sie auch das Executive Committee bei strategischen Fragen und macht Empfehlungen zu neuen Tasks.



## Kurzbeschreibung des Projekts

Task 1 unterstützt die generelle Strategie des PVPS Programmes (PV Technologie Entwicklung / Wettbewerbsfähige PV Märkte / Eine ökologische und wirtschaftlich nachhaltige PV Industrie / Empfehlungen zu politischen Rahmenbedingungen und Strategien) mit folgenden Produkten:

- Neu 2014: Snapshot of Global PV 1992-2013, erste Resultate der jährlich installierten Leistung. Publiziert im Frühjahr 2014
- Trends Report (Trends in Photovoltaic Applications, Survey report of selected IEA countries between 1992 and 2013), ein Jahresbericht zur Markt- und Technologie-Entwicklung der dem Programm angeschlossenen Länder sowie weitere wichtige Märkte
- Reports und Workshops zu spezifischen Themen der Photovoltaik
- Eigene Programm-Homepage unter [www.iea-pvps.org](http://www.iea-pvps.org)

Ziel ist es, die identifizierten Zielgruppen (Regierungen, EW's, Industrie, Forschung usw.) mittels qualitativ hochstehenden Produkten zu informieren.

## Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse

Der Schweizer Beitrag innerhalb des PVPS Programms (Task 1) konzentriert sich auf folgende Schwerpunkte:

- Input-Daten Schweiz für den Snapshot of Global PV 1992-2013 [1]
- National Survey Report [2], eine Zusammenstellung der Marktentwicklung und des politischen Umfeldes in der Schweiz. Diese Daten werden im Trends Report [3] zusammengefasst und publiziert
- Beiträge an Workshops und Konferenzen auf nationaler und internationaler Ebene
- Mithilfe bei der Organisation von Workshops an Konferenzen und Meetings
- Medienarbeit in der Schweiz: Hinweise auf internationale Publikationen des Programms, Publizieren von Marktstatistiken, insbesondere Snapshot und Trends Report
- bei der Subtask „Self Consumption“, Beiträge zur Situation in der Schweiz
- Mitarbeit in der neuen Subtask „New Business Models for PV“ und „Soft Costs“

### Daten für Snapshot of Global PV 1992-2013

In Zusammenarbeit mit Swissolar konnten bereits Anfang März 2014 erste Abschätzungen über die installierte Leistung erhoben werden. Gestützt werden diese Einschätzungen durch Direktinterviews bei grösseren Marktplayern sowie Umfragen bei der Kommission Markt und Politik von Swissolar.

### National Survey Report NSR 2013

Der NSR bildet die Grundlage für den jedes Jahr erscheinenden "Trends Report". Als Basis für die Statistiken dienen die jährlichen Erhebungen des Sonnenenergie Fachverbandes Swissolar. Die nachfolgende Tabelle gibt einen Überblick über die erhobenen Marktzahlen.

TABELLE 1 NUMBERS OF PLANTS / BUILDING TYPE – AUSZUG AUS DEM NSR SWITZERLAND

Type of system	2013 new added	2013 cumulated
single family homes:	<b>4078</b>	16'570
apartment buildings:	<b>781</b>	2'515
Industrial buildings	<b>967</b>	5'485
Farm houses	<b>1063</b>	4'310
Commercial buildings	<b>95</b>	465
Municipal & state owned buildings	<b>274</b>	1'945
Traffic infrastructure and buildings	<b>7</b>	60
others:	<b>2</b>	225
<b>Total:</b>	<b>7267</b>	<b>31.765</b>

Source: Markterhebung Sonnenenergie 2013

TABELLE 1 AUSZUG AUS DEM "NATIONAL SURVEY REPORT 1992-2013": THE CUMULATIVE INSTALLED PV POWER IN 4 SUB-MARKETS

		Cumulative installed capacity as of 31 December 2013 (kW)																					
Sub-market	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	
Stand-alone domestic	1 540	1 675	1 780	1 940	2 030	2 140	2 210	2 300*	2 390*	2 480*	2 570*	2 740*	2 810*	2 930*	3 050*	3 200*	3 300*	4 000	4 100	4 200	4 MW	4 MW	
Stand-alone non-domestic	70	100	112	143	162	184	190	200*	210*	220*	230*	260*	290*	320*	350*	400*	3 800	4 000	4 100	4 200	4 MW	4 MW	
Grid-connected distributed	2200	2900	3 600	4 050	4 850	5 950	7 630	9 420	11 220	13 340	15 140	16 440	18 440	21 240	23 740	30 040	41 540	67 040	104 140	206 700	433 MW	752 MW	
Grid-connected centralised	900	1 100	1 200	1 350	1 350	1 450	1 470	1 480	1 480	1 560	1 560	1 560	1 560	2 560	2 560	2 560	2 560	2 560	2 560	2 560	2 560	2 560	2 560
TOTAL (kW)	4 710	5 775	6 692	7 483	8 392	9 724	11 500	13 400	15 300	17 600	19 500	21 000	23 100	27 050	29 700	36 200	47 900	73 600	110 900	211 100	437 MW	756 MW	

## Workshops

Anlässlich der Europäischen Photovoltaik-Konferenz in Amsterdam organisierte das PVPS Programm 3 Workshops. Dank langjähriger guter Zusammenarbeit mit dem Veranstalter WIP, München wurden unsere Workshops als Teil des Konferenz-Programmes aufgenommen. Dies garantiert für einen sehr guten Besuch unseres Angebotes.



Task 1 legte das Schwergewicht auf Eigenverbrauch und der Wirtschaftlichkeit: „Self-Consumption Business-Models: Economic and technical Challenges“

An der asiatischen Photovoltaik-Konferenz in Kyoto (25. Nov. 2014) organisierte Task 1 zusammen mit weiteren Tasks einen Workshop zum Thema „Challenges and Promisses to Large Scale PV Deployment“.

## Konferenzen

Schweizer Photovoltaik-Tagung, Lausanne, April 2014: Operating Agent Gaëtan Masson stellte die aktuelle Marktentwicklung in den PVPS - Mitgliedländern vor.

EUPVSEC Amsterdam: Siehe Workshops, Task 1 war in mehreren Workshops sowohl bei der Organisation und Agenda-Setting wie auch als Referenten dabei.

Zusätzlich wurden für den PVPS-Stand (innerhalb des EPIA-Standes) Flyer mit den neusten Resultaten des Trends Reports aufgelegt.

PVSEC24 und 6. World Conference in Kyoto, Japan: Task 1 und PVPS waren mit mehr als 10 Präsentationen vertreten.

## PR und Networking

Mit-Organisation der Schweiz. Photovoltaik-Tagung 2014 von Swissolar in Lausanne. Mitglied des Programm-Komitees (Task 1 mit Operating Agent Gaëtan Masson als Referent organisiert).

Leitung der Kommission Photovoltaik des Branchenverbandes Swissolar

Der direkte Draht zu den Swissolar-Mitgliedern ermöglicht auch das direkte Abrufen von spezifischen Informationen zum PV-Markt in der Schweiz.

Mit Hilfe der Medienstelle von Swissolar konnte der Trends Report und der Press Release zum Snapshot einer sehr grossen Zahl von Zeitungen und anderen Publikationen per Email zugestellt werden.

Teilnahme am Workshop zur Energiestrategie des Kantons Aargau (Auf Einladung).

## Bewertung 2014 und Ausblick 2015

Mit den beiden Task 1 Meetings in Tel Aviv und Kyoto konnten wichtige Arbeiten an unseren neuen Subtasks weiter entwickelt werden. Self Consumption (Eigenverbrauch) als grosses Thema führte zu vielen Diskussionen. Dies ist auch bedingt durch die stark unterschiedlichen Blickwinkel der verschiedenen Akteure in den jeweiligen Ländern. Hier hilft auch die Sicht von P. Hüsler als Verwaltungsrat in einem lokalen Elektrizitätsversorgungsunternehmen.

Schwierigkeiten ergeben sich durch die grosse Vielfalt möglicher Themen, die angepackt werden müssten auf einer Seite und den stark beschränkten Ressourcen der Task 1 Experten auf der anderen Seite.

Auch der 2. Snapshot on Global PV fand wiederum ein sehr gutes Echo.

Obwohl die Daten provisorisch sind, ergeben sie doch einen guten Überblick über das vergangene Jahr. Damit hat es PVPS geschafft, bereits im Frühjahr publizierbare Daten aufzubereiten und zur Verfügung zu stellen.

Der Trends Report wurde dagegen wiederum recht spät (Oktober 2014) veröffentlicht. Dies ist vor allem auch bedingt dadurch, dass einzelne wichtige Länder ihren NSR National Survey Report zu spät veröffentlichen.

2015 wird einen Fokus legen auf die Verteilnetzbetreiber und deren Umgang mit höheren Anteilen an PV im Netz. Dazu werden Workshops in Paris, Denver/Golden und Bangkok organisiert.

## Referenzen

- [1] **A Snapshot of Global PV 1992 – 2013**, IEA, PVPS, Task 1 – 24-2014
- [2] P. Hüsler **National Survey Report on PV Power Applications in Switzerland 2013**, Juni/Aug. 2014
- [3] **Trends in Photovoltaic Applications in selected IEA countries between 1992 and 2013** IEA, PVPS, Task I – 25:2014
- [4] *Internet site [www.iea-pvps.org](http://www.iea-pvps.org)*



# IEA-PVPS TASK 12: SWISS ACTIVITIES IN 2014 - ÖKOBILANZEN VON SOLARSTROM

## Annual Report 2014

Author and Co-Authors	Dr. Rolf Frischknecht, Franziska Wyss
Institution / Company	treeze Ltd.
Address	Kanzleistrasse 4, 8610 Uster
Telephone, E-mail, Homepage	044 940 61 91, <a href="mailto:frischknecht@treeze.ch">frischknecht@treeze.ch</a> , <a href="http://www.treeze.ch">www.treeze.ch</a>
Project- / Contract Number	SI500738 / SI500738-03
Duration of the Project (from – to)	2014 – 2015
Date	November 27, 2014

### ABSTRACT

2014 was the second year under the new leadership of Garvin Heath. PVPS Task 12 team members started working on the three years pilot study within the Product Environmental Footprint activities of the European Commission. It involves global and European associations and US, European and Chinese manufacturing companies as well as research institutes and consultants.

Within the Swiss contribution to the *IEA PVPS task 12, subtask 2*, the existing data sets of the photovoltaic supply chain have been expanded to four world regions. The consideration of the actual market shares of the Silicon supply chain results in a significant increase of the environmental impacts of solar electricity produced in Europe. Data were aligned with data from SmartGreenScan (Mariska de Wild-Scholten) and LCI datasets of Chinese production using Chinese information from scientific literature were established. The report was unanimously approved by the Task 12 members and will be submitted to the Executive Committee for approval.

The life cycle assessments of future PV electricity production based on three different scenarios were finalised and data sets for future electricity mixes and future raw materials production were established. An IEA-report was unanimously approved by the Task 12 members. After a minor revision it will be submitted to the Executive Committee for approval.

Contacts with Chinese experts have been established and requests for sharing Chinese data with the PVPS Task 12 partners were expressed. For the time being data sets of the Chinese supply chain of multi-crystalline silicon panels are based on Chinese literature data. Data collection related to inverter manufacture were started in late fall 2014.

LCA activities in 2015 will focus on the revision of the methodology guidelines, the EC pilot study, the continuation of analysing Chinese production, the LCI of PV recycling, an extension of the water use analyses and on the termination of the balance of system LCIs.

## Einleitung / Projektziele

Ökobilanzen sind ein Umweltmanagement-Werkzeug, um die Umweltauswirkungen von Produkten und Technologien zu analysieren, zu vergleichen und zu verbessern. Eine wesentliche Grundlage für Ökobilanzen sind Sachbilanzdaten, welche die Energie- und Massenflüsse über die verschiedenen Lebensphasen des zu untersuchenden Objektes beschreiben. Ökobilanzdaten werden beispielsweise in der ecoinvent Datenbank [1] und in der KBOB-Empfehlung 2009/1:2014 [2] zur Verfügung gestellt.

Die Photovoltaik(PV)-Sachbilanzdaten wurden in den letzten Jahren regelmässig aktualisiert. Dazu wurden im Rahmen der *IEA PVPS Task 12, Subtask 2* verschiedene PV-Ökobilanz-Projekte durchgeführt. Die Schweizer Projektpartner aktualisierten im Jahr 2008 die Sachbilanzdaten zu Cadmiumtellurid-Modulen [3]. Sie stellten im Jahr 2009 neue Datensätze zu Freiflächen- und Photovoltaik-Grossanlagen für eine Implementierung in der ecoinvent Datenbank bereit [4]. 2010 wurden die Solarstrommixe in 26 Ländern aktualisiert sowie verschiedene Chemikalien und Materialien, die in der PV-Industrie verwendet werden, bilanziert [5]. 2011 wurde der Methodik-Leitfaden der Task 12 zu Ökobilanzen von Solarstrom überarbeitet und die Sachbilanzdaten für Ethylen-Tetrafluor-Ethylen (ETFE) erstmals aktualisiert.

Die Situation der amerikanischen und europäischen PV-Industrie sowie die Installation von 3 kWp PV-Anlagen auf Gebäuden sowie von Gross- und Freiflächenanlagen in der Schweiz und in Europa wurden im Jahr 2012 erarbeitet [6] und sind öffentlich verfügbar<sup>1</sup>. Diese Sachbilanzdaten sind auch in den ecoinvent Datenbestand v2.2+ [7] eingeflossen, welcher Grundlage für die obengenannte KBOB-Empfehlung 2009/1:2014 ist. Des Weiteren wurden im Jahr 2012 Sachbilanzdaten erarbeitet zur Herstellung von a-Si-Modulen und micromophen-Si-Modulen von Schweizer Firmen [8, 9]. In den Jahren 2013 und 2014 wurden die globale Marktsituation in Bezug auf die Lieferkette von kristallinen Silizium-Solarzellen und -Modulen abgebildet und in Szenarien die Stromproduktion mit in Zukunft hergestellten Solarpanels bilanziert [10].

Um die Wahrnehmung der Photovoltaik als umweltfreundliche Technologie aufrecht zu erhalten, sind seit etlichen Jahren Bestrebungen im Gange, ein Sammelsystem von Modulen nach dem Anlagerückbau zu etablieren und ein Recyclingsystem für die Photovoltaik-Module aufzubauen. Durch die WEEE Verordnung [11] ist Bewegung in die Recycling-Aktivitäten gekommen. Trotzdem sind bis heute nur punktuell verlässliche Informationen zu den Recyclingaufwendungen verfügbar, weshalb die Arbeiten der Schweizer Projektpartner der IEA PVPS Task 12 auf das Jahr 2015 verschoben wurden.

Für das Jahr 2014 plante der Schweizer Projektpartner folgende Arbeiten durchzuführen:

- Erarbeitung von detaillierten Sachbilanzdatensätzen zur Chinesischen Produktion
- Erarbeitung von IEA-Publikationen zu den aktualisierten Sachbilanzdaten der globalen Zulieferkette von Photovoltaik-Modulen und zu Ökobilanzen von Szenario abhängigen, zukünftigen Photovoltaik-Modulen mit dem Referenzjahr 2050
- Erarbeitung von Sachbilanzdaten zu Invertern
- Mitarbeit an der EU PEF (Product Environmental Footprint) Pilotstudie Stromproduktion mit Solarpaneelen
- Methodische Diskussionen, insbesondere zum Thema „energy return on investment“

Die Verantwortung über die Inhalte und Publikation der Sachbilanzdaten liegt bei *treeze GmbH*. Es ist geplant, dass die Daten im Rahmen einer Aktualisierung des ecoinvent Datenbestands publiziert werden (verantwortlich: *ecoinvent Centre*). Das Review der neu erstellten und überarbeiteten Datensätze durch das ecoinvent Zentrum ist hängig.

---

<sup>1</sup> Bericht und Datenfiles sind auf [www.lc-inventories.ch](http://www.lc-inventories.ch) abrufbar, einer Webseite, die vom Bundesamt für Umwelt betreut wird und aktualisierte Ökobilanzdaten enthält, die (noch) nicht in den ecoinvent Datenbestand v3.0 integriert worden sind.

## Kurzbeschreibung des Projekts

Das Ziel des Gesamtvorhabens, Subtask 2 innerhalb des Task 12, LCA, ist das Erarbeiten von aktuellen Sachbilanzdaten zur Stromerzeugung mit Photovoltaikanlagen und das Bereitstellen einer harmonisierten Methodik. In Tab.1 sind die einzelnen Bereiche im Subtask 2 aufgelistet. Wesentliche Aktivitäten finden in den USA, Deutschland, der Schweiz, den Niederlanden, Frankreich sowie China und Japan (letztere vor allem im Bereich fire safety) statt.

Tab.1: Aktuelle Struktur der Aktivitäten im Subtask 2 des IEA PVPS Task 12

X: Aktiver Beitrag; R: Review

\*: separate Finanzierung durch das Projektkonsortium

	Subtask 2. LCA	Schweizer Beitrag
2.1	LCA Methodology & Methodology Guidelines	Lead
2.1a	3rd edition of LCA methodological guidelines	X (2015)
2.1b	Net energy methodological guidelines	R (2014)
2.1c	European Commission Product Environmental Footprint Pilot Project	X (3 years project) *
2.2	Life Cycle Inventories	
2.2a	Global supply chain	X (2013-14)
2.2b	LCI of balance of system	X (2014)
2.2c	Water use in PV life cycle (manufacturing, panel washing)	X (2015)
2.2d	Changes in life cycle impacts of PV to 2050 (Average and best system characterization)	X (2013-14)
2.2e	LCI of module recycling	X (2015)

## Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse

Im Rahmen des Schweizer Beitrags zur IEA PVPS Task 12 wurden folgende Arbeiten im Jahr 2014 durchgeführt:

- Aktualisierung und Abgleich der Sachbilanzdaten zur globalen Zulieferkette unter Berücksichtigung der vier wichtigsten Produktionsregionen der Welt und Mitarbeit an der Aktualisierung des bisherigen IEA-Berichts zu den Sachbilanzen.
- Revision der Sachbilanzdaten zu zukünftigen siliziumbasierten monokristallinen und Cadmium-Tellurid Modulen und Erstellen eines IEA PVPS-Berichts.
- Vorbereitung der Datenerfassung für die Sachbilanzen zu Invertern.
- Präsentation der neusten Ökobilanzergebnissen zur globalen Zulieferkette an der Europäischen Konferenz und Ausstellung zu Solarenergie (29th EU PVSEC) in Amsterdam [12].
- Präsentation der neusten Ökobilanzergebnissen zur zukünftigen PV-Stromproduktion an der LCA XIV in San Francisco, USA [13]

In der Zwischenzeit konnten erste Sachbilanz-Datensätze der Chinesischen Produktion multikristalliner Zellen und Panels erstellt werden. Die Daten konnten aber noch nicht in die bisherigen Sachbilanzen eingebettet werden, da die chinesischen Informationen und die bisherigen Bilanzen unterschiedlich gruppiert und aggregiert sind.

Die Erhebung von Sachbilanzdaten zum Modulrecycling wurde auf 2015 verschoben, da die benötigten Daten noch nicht verfügbar sind.

Die in den letzten Jahren erarbeiteten Sachbilanzdaten stehen Interessierten unter [www.lc-inventories.ch](http://www.lc-inventories.ch) kostenlos zum Download zur Verfügung. Die Daten werden in einem Datenformat zur Verfügung gestellt, welches den Import in alle gängigen Ökobilanz-Softwareprogramme erlaubt.

## Sachbilanzdaten zur globalen Zulieferkette

Im Berichtsjahr wurde die Überarbeitung des IEA PVPS-Berichts zu den Sachbilanzen in Angriff genommen. Zu diesem Zweck hat der Schweizer Projektpartner die im Jahr 2013 erarbeiteten Sachbilanzdaten mit denjenigen von Parikhit Sinha (FirstSolar) und von SmartGreenScan (Mariska de Wild-Scholten) abgeglichen. Dabei konnten veraltete Daten ersetzt und die Modellierung harmonisiert werden. Letzteres betraf insbesondere den Umgang mit Produktionsabfällen in der Herstellung von monokristallinen Wafern. Die Silizium-Abfälle vom Zuschneiden der runden Einkristalle in quadratische Säulen (zur Herstellung monokristalliner Wafer) werden in der Produktion von multikristallinen Wafern eingesetzt. Der Aufwand zur Bereitstellung von Polysilizium in der Herstellung der Einkristalle wird neu vollständig den monokristallinen Wafern verrechnet (also auch derjenige Teil, welcher als Schneideabfall für die Herstellung multikristalliner Wafer genutzt wird). Dies führt dazu, dass die Aufwendungen für mono-kristalline Panels grösser sind als bisher, diejenigen für multikristalline dagegen tiefer und die Unterschiede in den Umweltauswirkungen zwischen den beiden Technologien grösser sind als bisher (siehe Fig. 1 und Fig. 2).

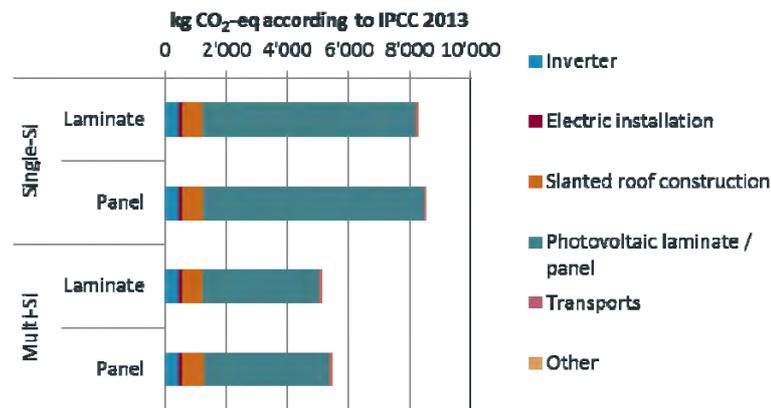


Fig. 1: Treibhausgasemissionen der Herstellung einer 3 kWp Anlage mit kristallinen Solarzellen. Die Werte beziehen sich auf die gesamte Anlage, installiert auf einem Schrägdach

Wie Fig. 2 zeigt, sind die spezifischen Treibhausgasemissionen des Solarstroms von monokristallinen Zellen deutlich angestiegen, während diejenigen des Solarstroms von multikristallinen Zellen heute nur unwesentlich höher liegen als vor rund 5 Jahren. Diese Entwicklung bildet einerseits die Verlagerung der Produktion nach China und andererseits den vorgehend beschriebenen Wechsel in der Modellierung der intern genutzten Produktionsabfälle ab.

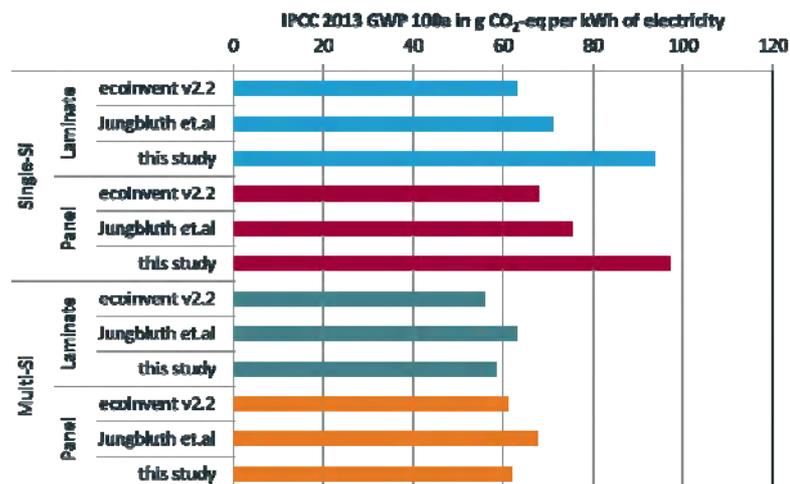


Fig. 2: Treibhausgasemissionen pro kWh Solarstrom von siliziumbasierten monokristallinen und multikristallinen Modulen in kg CO<sub>2</sub>-eq bei einem Ertrag von 975 kWh/kW<sub>p</sub>

## Sachbilanzdaten zu zukünftigen Modulen

In Zusammenarbeit mit den Partnern im IEA PVPS Task 12 wurden Szenarien abhängige Entwicklungen zentraler Parameter von monokristallinen Silizium- und von Cadmium-Tellurid-Modulen erarbeitet. Die drei Szenarien (business as usual BAU, realistic improvements (REAL), optimistic improvements (OPT)) enthalten unterschiedlich ambitionierte Prognosen für 7 beziehungsweise 12 zentrale Parameter wie Zelleffizienz, Waferdicke oder Lebensdauer.

Diese zukünftigen Parameterwerte wurden verwendet, um Ökobilanzen für eine Solarstromproduktion im Jahr 2050 in Abhängigkeit der drei Szenarien zu erstellen. Dabei wurden auch die Hintergrunddaten (Strommix, Herstellung von Aluminium und anderen Rohstoffen) Szenario abhängig an eine zukünftige Produktionsweise angepasst. Je nach Szenario und Indikator liegen die spezifischen Umweltauswirkungen pro kWh erzeugtem Solarstrom zwischen 15 % (BAU, Humantoxizität) bis über 85 % (OPT, Versauerung) unter den heutigen Werten (siehe Fig. 3).

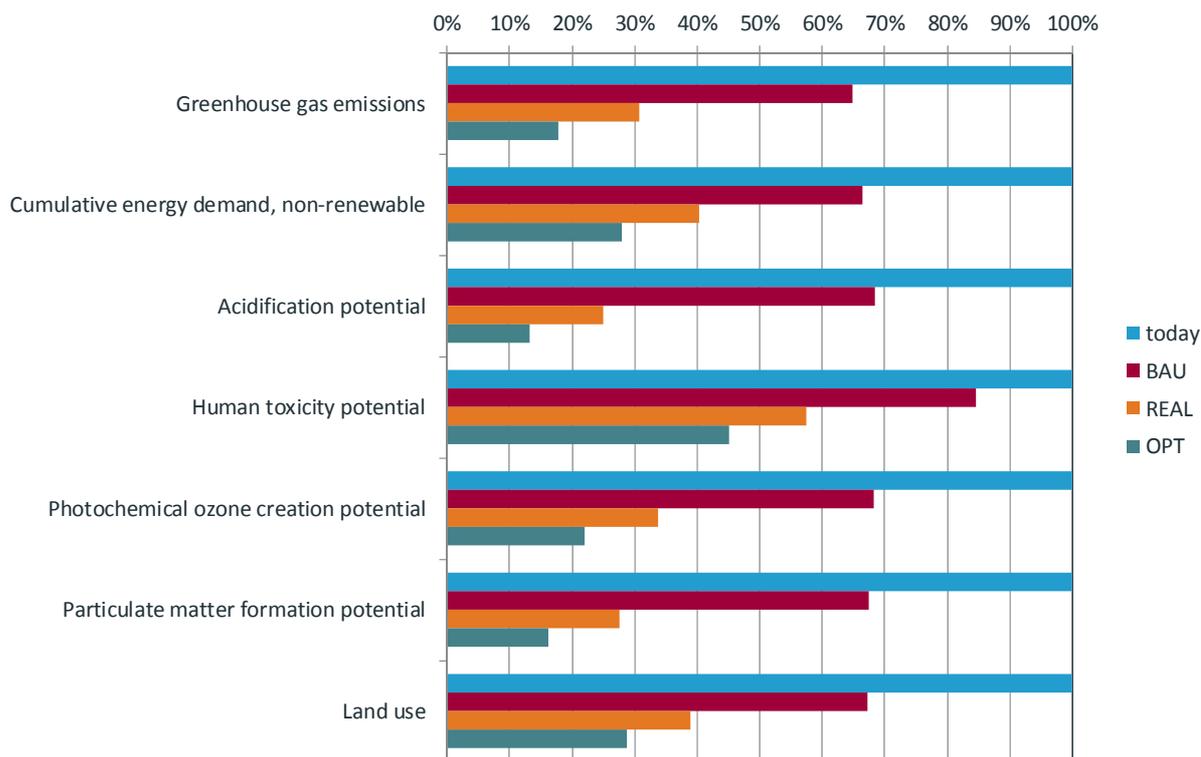


Fig. 3: Umweltauswirkungen pro kWh Solarstrom von siliziumbasierten monokristallinen Modulen; Ertrag (Durchschnitt Europa): 975 kWh/kWp (unter Berücksichtigung einer Degradation von 10.5% über die gesamte Lebensdauer); Moduleffizienz: 15.1% (today), 22.9% (BAU), 25.2% (REAL), 27.6% (OPT); Lebensdauer: 30 Jahre (today und BAU), 35 Jahre (REAL), 40 Jahre (OPT).

## Nationale / internationale Zusammenarbeit

Auf nationaler Ebene erfolgt die Zusammenarbeit primär mit demecoinvent Zentrum, welches die Validierung der aktualisierten Datensätze übernehmen soll. Dasecoinvent Zentrum hat bislang die bereit-gestellten Daten nicht in die neue Version desecoinvent Datenbestands (v3.1) aufgenommen.

Auf internationaler Ebene fanden insbesondere Diskussionen zu den zukünftigen Arbeiten der IEA PVPS Task 12 statt. Unter der Leitung von Garvin Heath wurden in zwei produktiven Projekttreffen die ersten Ergebnisse (Berichte) der Ökobilanz-Aktivitäten in Subtask 2 diskutiert und verabschiedet.

Mittlerweile konnten erste Daten zur chinesischen Produktion (aus wissenschaftlichen Publikationen stammend) verwertet und Sachbilanz-Datensätze erstellt werden. Diese Datensätze dienen den chinesischen Projektpartnern als Benchmark. Sie wurden um aktuellere beziehungsweise repräsentativere Daten angefragt. Antworten beziehungsweise Datenlieferungen stehen noch aus.

An der Internationalen Ökobilanz-Konferenz in San Francisco, USA hat Christian Bauer, PSI die im Rahmen des IEA PVPS Task 12 von treeze erarbeiteten Ergebnisse der Ökobilanzen zukünftiger Strom-erzeugung mit Photovoltaik präsentiert [13].

An der Europäischen Photovoltaik Konferenz (29th EU PVSEC) in Amsterdam wurden von den Schweizer Projektpartnern Ergebnisse zum Einfluss von Marktverschiebungen (im Wesentlichen nach China) auf die Ökobilanzresultate von Solarstrom präsentiert [12].

Dies wurde durch den beachtlichen Unterschied zwischen europäischen und chinesischen Modulen verdeutlicht (siehe Fig. 4). Die Reduktion der Umweltbelastung und der Treibhausgas-Emissionen durch Effizienzgewinne aufgrund von technischen Fortschritten werden durch den vermehrten Import von Solarzellen und Modulen aus China deutlich überkompensiert.

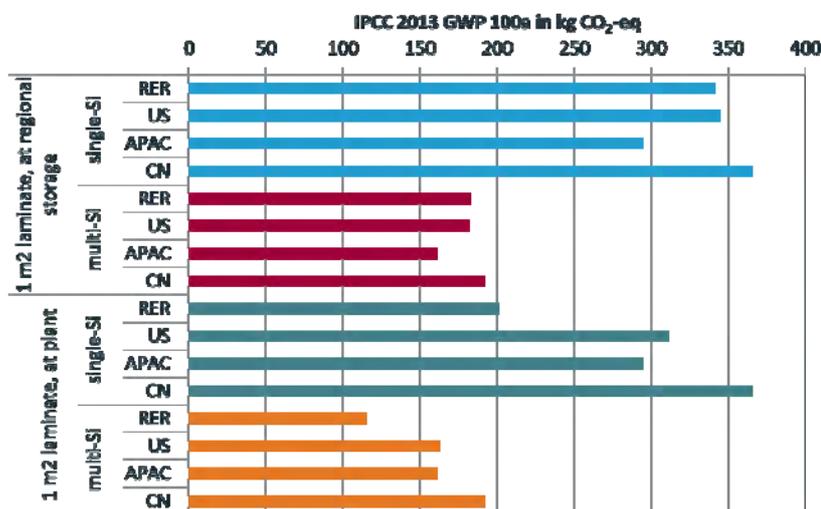


Fig. 4: Treibhausgasemissionen der Herstellung von rahmenlosen Solarpanels in den vier betrachteten Weltregionen (untere Hälfte) sowie des Marktmixes der in den vier Weltregionen installierten rahmenlosen Panels (obere Hälfte).

RER: Europa, US: USA, APAC: Asia and Pacific (ohne China), CN: China

Weiter nahm Rolf Frischknecht an zwei Projekttreffen des *IEA PVPS Task 12* in Peking, China und in Kyoto, Japan teil. Dabei ging es um die Verabschiedung der erarbeiteten IEA PVPS-Berichte und die Planung der Arbeiten und deren Koordination im Jahr 2015.

## Bewertung 2014 und Ausblick 2015

Die Erstellung erster Sachbilanzdatensätze zur chinesischen Produktion konnten abgeschlossen und in den Bericht zu den Sachbilanzdaten integriert werden. Noch ausstehend ist eine Integration dieser Daten in die regional differenzierten Wertschöpfungsketten kristalliner Solarzellen und –panels (Konsistenzprobleme).

Die Sachbilanzdatensätze zu den globalen Zulieferketten sind erstellt und ausgewertet. Der Bericht zu den Ökobilanzen zukünftiger mono-kristalliner Silizium- und Cadmium-Tellurid-Modulen [14] wurde verabschiedet und wird mit ein paar wenigen Anpassungen dem Executive Committee zur Genehmigung unterbreitet. Auch der aktualisierte Bericht zu den Sachbilanzdaten zu Photovoltaik wurde vom Task 12 genehmigt und wird nun dem Executive Committee zur Genehmigung unterbreitet.

Parallel zum PVPS Task 12 wird eine Pilotstudie durchgeführt zum Umweltfußabdruck von Photovoltaikstrom. Diese Pilotstudie hat im Frühjahr 2014 begonnen, dauert drei Jahre und wird durch Projektpartner des PVPS Task 12 und weitere Organisationen und Firmen durchgeführt.

Für 2015 sind folgende Arbeiten geplant:

- Weiterführung: Erstellung von detaillierten Sachbilanzdatensätzen zur Chinesischen Produktion (Task 2.2a)
- Mitarbeit am Methodikpapier zur Energetischen Payback Time und zum Energy Return on Investment (Task 2.1b).
- Zuarbeit zur Pilotstudie „Product Environmental Footprint of Photovoltaic electricity production“ (Task 2.1c, separat finanziert)
- Abschluss Sachbilanzdaten zu Balance of System, insbesondere Inverter (Task 2.2b).

- Mitarbeit an den Ökobilanzen zu Recycling und zu den Wassereinsatzabdruck-Bilanzen (Tasks 2.2c und 2.2e)
- Abschluss des IEA-Berichts Ökobilanzen zur zukünftigen Stromproduktion mittels Photovoltaik in Europa für das Jahr 2050 (Task 2.2d).

Falls von Mitgliedern der IEA PVPS Task 12 weitere Sachbilanzdaten zu Photovoltaik-Technologien zur Verfügung gestellt werden, wird angestrebt, diese für eine Implementierung in den ecoinvent Datenbestand (weiterhin basierend auf der v2.2 Methodik) aufzubereiten.

## Referenzen

- [1] ecoinvent Centre, *ecoinvent data v2.2, ecoinvent reports No. 1-25*, 2010, Duebendorf, Switzerland, Swiss Centre for Life Cycle Inventories.
- [2] 2. KBOB, eco-bau, and IPB, *KBOB-Empfehlung 2009/1:2014: Ökobilanzdaten im Baubereich, Stand April 2014*, 2014, Koordinationskonferenz der Bau- und Liegenschaftsorgane der öffentlichen Bauherren c/o BBL Bundesamt für Bauten und Logistik.
- [3] 3. Frischknecht, R. and M. Stucki, *IEA-PVPS Task 12: Swiss activities in 2008 – Aktualisierung der Ökobilanz von CdTe-PV (Jahresbericht)*, 2008, Uster, ESU-services Ltd.
- [4] 4. Frischknecht, R., M. Stucki, and S. Buesser, *IEA-PVPS Task 12: Swiss activities in 2009 – Ökobilanzen von PV Freiflächen- und Grossanlagen (Jahresbericht)*, 2009, Uster, ESU-services Ltd.
- [5] 5. Stucki, M., R. Frischknecht, and S. Buesser, *IEA-PVPS Task 12: Swiss activities in 2010 – Ökobilanzen von Solarstrom und von Chemikalien in der Photovoltaik-Industrie (Jahresbericht)*, 2010, Uster, ESU-services Ltd.
- [6] 6. Jungbluth, N., et al., *Life Cycle Inventories of Photovoltaics*, 2012, Uster, CH, ESU-services Ltd.
- [7] 7. KBOB, eco-bau, and IPB, *ecoinvent Datenbestand v2.2+; Grundlage für die KBOB-Empfehlung 2009/1:2014: Ökobilanzdaten im Baubereich, Stand April 2014*, 2014, Koordinationskonferenz der Bau- und Liegenschaftsorgane der öffentlichen Bauherren c/o BBL Bundesamt für Bauten und Logistik.
- [8] 8. Stucki, M., R. Frischknecht, and K. Flury, *Life Cycle Assessment of Flexcell Amorphous Silicon Modules*, 2012, Uster, ESU-services Ltd.
- [9] 9. Flury, K., R. Frischknecht, and R. Itten, *Life cycle assessment of Oerlikon Solar  $\mu$ C-Si solar modules*, 2012, Uster, treeze Ltd.
- [10] 10. Itten, R., F. Wyss, and R. Frischknecht, *LCI of the global crystalline photovoltaics supply chain and of future photovoltaics electricity production*, 2014, Uster, Switzerland, treeze Ltd.
- [11] 11. EU Parliament, *Directive 2012/19/EU of the European Parliament and of the Council on waste electrical and electronic equipment (WEEE)*. Official Journal of the European Union, 2012. **2012**(197): p. 38-71.
- [12] 12. Itten, R., R. Frischknecht, and F. Wyss. *Life cycle assessment of the global supply chain of crystalline PV modules*. in *29th EU PVSEC*. 2014. Amsterdam, The Netherlands.
- [13] 13. Frischknecht, R., et al. *Scenario-dependent LCA of future power generation technologies*. in *LCA XIV*. 2014. San Francisco, USA.
- [14] 14. Itten, R., F. Wyss, and R. Frischknecht, *Life cycle assessment of future photovoltaic electricity production from residential-scale systems operated in Europe; Draft for voting*, IEA-PVPS Task 12 Subtask 20, 2014, Paris, France, International Energy Agency, IEA.



# SCHWEIZER BEITRAG ZUM IEA PVPS PROGRAMM, IEA PVPS TASK 13

## Annual Report 2014

Author and Co-Authors	Thomas Nordmann
Institution / Company	TNC Consulting AG
Address	General Wille-Str. 59 - CH 8706 Feldmeilen
Telephone, E-mail, Homepage	044 991 55 77 - <a href="mailto:nordmann@tnc.ch">nordmann@tnc.ch</a> - <a href="http://www.tnc.ch">www.tnc.ch</a>
Project- / Contract Number	SI/500021 / SI/500021-04
Duration of the Project (from – to)	2014 – 2017
Date	15.12.2014

### ABSTRACT

Switzerland takes part in the Photovoltaic Power Systems (PVPS) program of the International Energy Agency (IEA), Task 13: Performance and Reliability of Photovoltaic Systems, 2014 – 2017. The overall objective of Task 13 is to improve the operation, reliability and, thus, electrical and economic output of photovoltaic power systems and subsystems.

Task 13 is focusing on:

- Providing reliable statistical data for any kind of decision makers for different PV applications and system locations (e.g. different countries, regions, climates).
- Technical issues such as adapting test methods and reliability assessments of PV modules, comparing the long-term behaviour of systems and components, as well as performance analysis and optimization of PV systems

The Task 13 starts in 2010 and has been extended by decision of the ExCo and the organisation of the Task in a renewed structure as follow:

Subtask 1: Economic of PV System Performance and Reliability

Subtask 2: System Performance and Analysis

Subtask 3: Module Characterisation and Reliability

Subtask 4: Dissemination

TNC is now responsible in cooperation with Wilfried van Sark, The Netherlands, for Activity 2.1 "Field Performance Analysis using two complementary approaches" in Subtask 2.

In the year 2014 the 'Input Tool' for the collection of plant- and operational data was used by the experts. The collected information and performance data was evaluated and controlled by TNC, imported into the database. It is available in the internet for the PV community and other interested parties worldwide. 2014 874 datasets of 21 existing PV systems from USA, Sweden and Italy were collected, approved and made available in the online database. The installations representing Italy, USA, Switzerland, Sweden, France, Germany and 6 other countries.

## **Einleitung / Projektziele**

Der Task 13, gestartet 2010, wurde nach Ablauf der Task-Zeit auf Wunsch des ExCo durch die Task Experten inhaltlich überarbeitet und die Verlängerung der Zeitperiode 2014 – 2017 genehmigt.

## **Kurzbeschreibung des Projekts**

Die Gesamtaufgabe des Task 13 in der zweiten Periode 2014 – 2017 ist die internationale Zusammenarbeit weiter zu führen und zu intensivieren, um die Rolle der Photovoltaik als ein wichtiges Element beim Umstieg auf eine nachhaltige Energieversorgung sicher zu stellen. Die Aufgabe vom Task 13 im Besonderen ist es, die Marktteilnehmer zu unterstützen bei der Verbesserung der Betriebstüchtigkeit, der Zuverlässigkeit und der Qualität von Photovoltaik-Komponenten und Systemen. Betriebsdaten von PV-Systemen in verschiedenen Klimazonen der Welt werden analysiert und erlauben Rückschlüsse auf die Zuverlässigkeit und auf die Ertragsprognosen.

Die Qualifizierung und die Lebenszyklus-Charakteristiken von Photovoltaik-Komponenten und Systemen sollen analysiert und identifiziert werden.

## **Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse**

Die Arbeiten der TNC Consulting AG innerhalb vom Task 13 umfassen folgende Themenbereiche:

1. Mitarbeit am Task 13 Workplan 2014 – 2017 (Co-Autor als Activity Leader)
2. Mitarbeit und Teilnahme am letzten Task13 Meeting vom 1. – 3. April 2014, ISE Freiburg i.B. (DE)
3. Ausarbeitung Abschlussredaktion des Report IEA-PVPS T13-05:2014 „Analysis of Long-Term Performance of PV Systems – Differenz Data Resolution for Different Purposes“ als Hauptautor in Zusammenarbeit mit den zwei Co-Autoren aus Holland und Israel.
4. Laufender Betrieb und Unterhalt der T13 Performance Web-Datenbank
5. Vorbereitung der Erfassung von mehreren 1'000 Schweizer KEV-PV-Anlagen in Zusammenarbeit mit Swissgrid.

## **Mitarbeit am Task 13 Workplan**

Der Task Workplan für die Verlängerung vom Task 13 von 2014 bis 2017 wurde im Autorenkollektiv aller beteiligten Subtask- und Activity-Leaders erarbeitet und zusammen gestellt. Dieser Workplan und die Verlängerung der Tätigkeit 2014 – 2017 wurde anlässlich des 41. PVPS ExCo-Meetings in Aachen, Deutschland, 28. – 30. April 2014, genehmigt.

Die TNC Consulting AG konzentriert sich dabei im zweiten Teil der Task Arbeiten auf den Bereich Subtask 2 „System Performance and Analysis“ für die Activity 2.1 „Field Performance Analysis using two complementary approaches“. Dies beinhaltet einerseits die Weiterführung der Projektdatenbank (analytical monitoring) und andererseits die Bereitstellung Schweizer Daten von konkreten Anlagen (global monitoring). Diese beiden komplementären Ansätze sollen sich bei der weiteren Taskarbeit entsprechend ergänzen. Für diesen Activity Lead sind die zwei Mitarbeiter Thomas Nordmann, TNC Consulting AG, Schweiz und Wilfried van Sark, Copernicus Institute of Sustainable Development, Utrecht University, Holland befasst.

## **Mitarbeit und Teilnahme am Task 13 Meeting 1. – 3. April 2014, Fraunhofer ISE, Freiburg i.B., Deutschland**

Anlässlich dieses letzten Experten-Meetings im ersten Teil vom Task 13 wurde der erreichte Stand und die weitere Entwicklung der Performance Database ausführlich diskutiert, auch im Verhältnis zu den komplementären Aktivitäten im Task. Neben der Bearbeitung der anderen Subtask-Aktivitäten war die Frage von Inhalt und Strategie für die Task-Verlängerung ein Schwerpunkt am Treffen in Freiburg.

Zusätzlich wurden verschiedene Dissemination Aktivitäten geplant und festgelegt, zum Teil an der EU PVSEC 2014 in Amsterdam, an der Intersolar in München etc.

## **Report IEA-PVPS T13-05:2014 „Analysis of Long-Term Performance of PV Systems – Differenz Data Resolution For Different Purposes“**

Die Arbeiten an diesem Expertenbericht sind abgeschlossen. Der Bericht wurde von allen Task 13 Experten und dem IEA PVPS ExCo genehmigt und am 12.12.2014 auf der Webseite PVPS aufgeschaltet. Die Veröffentlichung erfolgte mit der Medienmitteilung 19. Januar 2015.

Als Hauptautor war Th. Nordmann verantwortlich für die Koordination und den Gesamtbericht in Zusammenarbeit mit den zwei Co-Autoren aus Holland und Israel sowie Autor für das Kapitel 3 „Database and Analysis of PV Systems“.

### **Englische Zusammenfassung der Publikation:**

This report investigates data supplied from installed operating PV plants in different countries in order to improve understanding of efficiency and reliability issues of current state-of-the-art PV systems.

The first section describes the continued efforts to enrich and maintain the existing online performance database and to add new operational data from existing and new grid-connected PV systems. This activity deals with quality data only, selected and analyzed for usability by experts from each of the contributing countries.

Currently (mid 2014), the PV online performance database contains operational data of nearly 600 PV systems in 13 countries. The spectrum ranges from small installations of less than 1 kWp to power plants of more than 2 MWp. The database includes datasets of PV systems with different cell technologies and type of mounting like flat roof, sloped roof, façade, ground mounted or PV sound barriers. An important function is the possibility to filter the available data within the database. This allows a comparison of the different plant data within the sorted arguments. It is possible to export the data to a spreadsheet application like Microsoft Excel. In this way, it is possible to create own graphs and to analyze the data in more detail.

A complementary approach is described in the second section, attempting to answer the question “How well is PV serving the world”. Therefore, only two parameters from as many PV systems as possible are analyzed:

- Annual yield (kWh per installed kWp)
- Performance ratio PR

Experts of Task 13 have attempted to collect appropriate data for a large amount of PV systems. Notably data from Italy, USA and Australia have been supplied for this. Limited data availability from other participating countries has been addressed by using so-called web scraping techniques that collect and organize performance data automatically in databases.

In order to study correlation between performance and system size, data have been divided into system power classes ranging from <1 kWp to >10 MWp. In addition, performance data can be related to climate zones.

It may be concluded that today’s PV systems are in general “delivering what the salesman says”, with country differences in annual yield that can well be explained by irradiation differences or climate zone differences.

While the first two sections deal with the analysis of PV system efficiency, the third section aims at finding the root cause of faults that lead to system downtime or low efficiency, as expressed by a low overall Performance Ratio.

A study has begun to find correlation between defined faults, either hardware failures or low efficiencies, and the system parameters immediately before the fault as compared to long before the fault. The systems under study were and will be monitored for efficiency. When the efficiency drops or a failure becomes apparent the system parameters will be examined and compared to periods of time past. It is assumed that a correlation between monitored system parameters and specific failures can be found and catalogued. If a statistical correlation can be found between the changing characteristics of specific parameters and specific fault types, these correlations could be used as signs for impending failure. Such correlations could then be used to alert the owner on faults when no Performance Ratio monitoring exists.

The Technical Report can be downloaded from the IEA-PVPS website [www.iea-pvps.org](http://www.iea-pvps.org).

Auszugsweise aus dem Bericht Vergleich der technischen Entwicklung der Photovoltaik Jahre 1983 – 1990 im Vergleich zu 2005 – 2012.

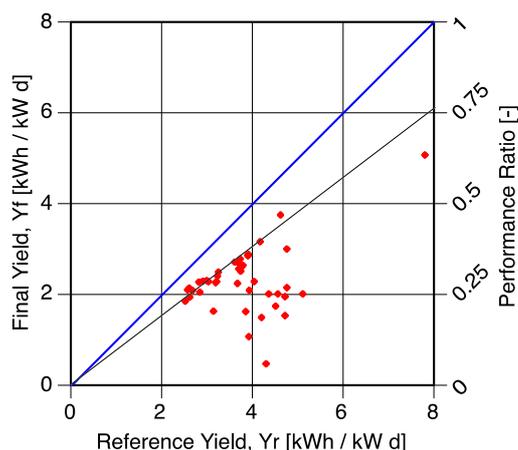


Fig. 1: Final yield vs. reference yield for PV systems installed between 1983 and 1990 (Task 2).

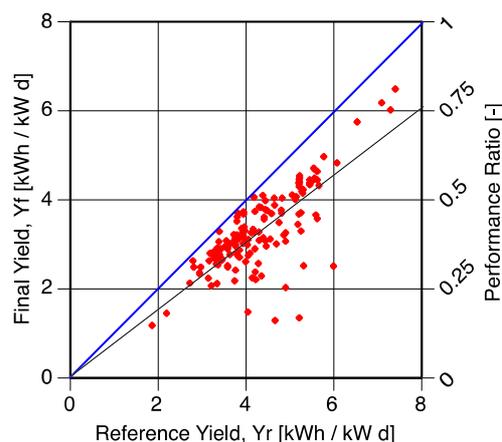


Fig. 2: Final yield vs. reference yield for PV systems installed between 2005 and 2012 (Task 2 & 13).

Figure 1 and Figure 2 show two more graphs of the same PV systems discussed above. Here the final yield is plotted versus the reference yield. Figure 1 shows data for systems installed from 1983 – 1990, Figure 2 shows data for systems installed between 2005 and 2012. The blue line represents a PR of 1, i.e. an ideal PV system without losses under standard test conditions. A constant PR <1 would be represented by a line starting at 0 with slope corresponding to the PR. The further a data point, i.e. the annual final yield is away from the blue PR=1 line the lower the PR of the PV system for the respective year of operation. Comparing the cloud diagrams the data points in Figure 11 are closer to the blue line indicating a higher PR for the more recent PV Installations.

Figure 3 shows the fourth predefined type of graph of the database web application for PV systems in Switzerland (left) and Italy (right). In this graphs the array efficiency  $\eta_A$  is plotted vs. the theoretical array efficiency  $\eta_{A\text{ STC}}$  at standard test conditions. Standard test conditions (STC) are defined by an irradiation of  $1000\text{ W/m}^2$  in the module plane, a module temperature of  $25^\circ\text{C}$  and a light spectrum at air mass (AM) of 1.5. As the charts are based on monthly data it is possible to illustrate and compare the range of the array efficiencies within the monitored years for selected PV systems. A major influence to the array efficiency is the seasonal change of the ambient temperature, which affects directly the temperature of the cells and therefore the cell efficiency. The red line in the diagrams represents an  $\eta_A / \eta_{A\text{ STC}}$  ratio of 1. Although data values above this line are possible for some sites (e.g. a cold and sunny alpine location), the datasets need to be verified carefully to avoid having datasets based on measurement or calculation errors in the database.

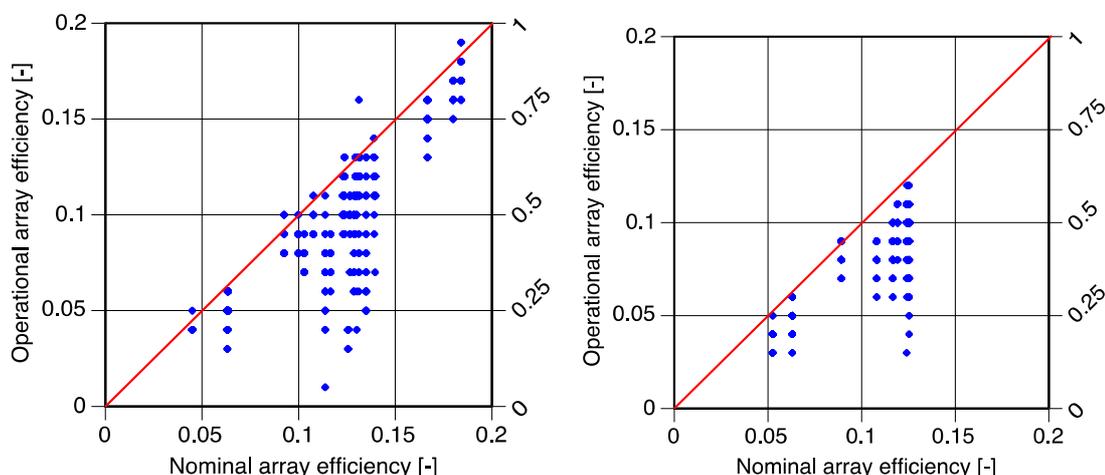


Fig. 3: Monitored array efficiency vs. nominal array efficiency at standard test conditions STC; left: selected PV systems in Switzerland, right: PV systems in Italy.

## Betrieb, Unterhalt und Ergänzung der Web Performance Datenbank

Die Web Performance Datenbank ist auf der Hauptseite [iea-pvps.org](http://iea-pvps.org) mit einem prominenten Link für jedermann direkt zugänglich. Die in der Datenbank enthaltenen Betriebsdaten sind auch Grundlage für Kapitel 3 des IEA PVPS Reports. Seit August 2013 sind für die Datenbank 210 Benutzer aus 60 Ländern registriert. 2014 wurden 21 Anlagen mit 874 Messdatensätzen aus den USA, 5 Anlagen mit 66 Messdatensätzen aus Schweden und 1 Anlage mit 42 Messdatensätzen aus Italien modifiziert und importiert.

Figuren 4a und 4b zeigen aus dem Bericht die Struktur und die zeitliche Abfolge der zusätzlich bereit gestellten Messdatensätze.

Country	PV Systems	P0 (kW)	Systems with Data	Months of Data
AUSTRIA	4	201		
BELGIUM	1	3	1	10
FRANCE	7	21	7	91
GERMANY	7	2,914	7	516
ISRAEL	1	51		
ITALY	31	943	31	1,078
MALAYSIA	1	45	1	12
NORWAY	1	45	1	29
SPAIN	1	14	1	72
SWEDEN	10	322	5	52
SWITZERLAND	11	1,464	10	1,434
UNITED STATES	25	2,464	21	1,349

Fig. 4a: The amount of datasets collected by March 2014 within Task 13.

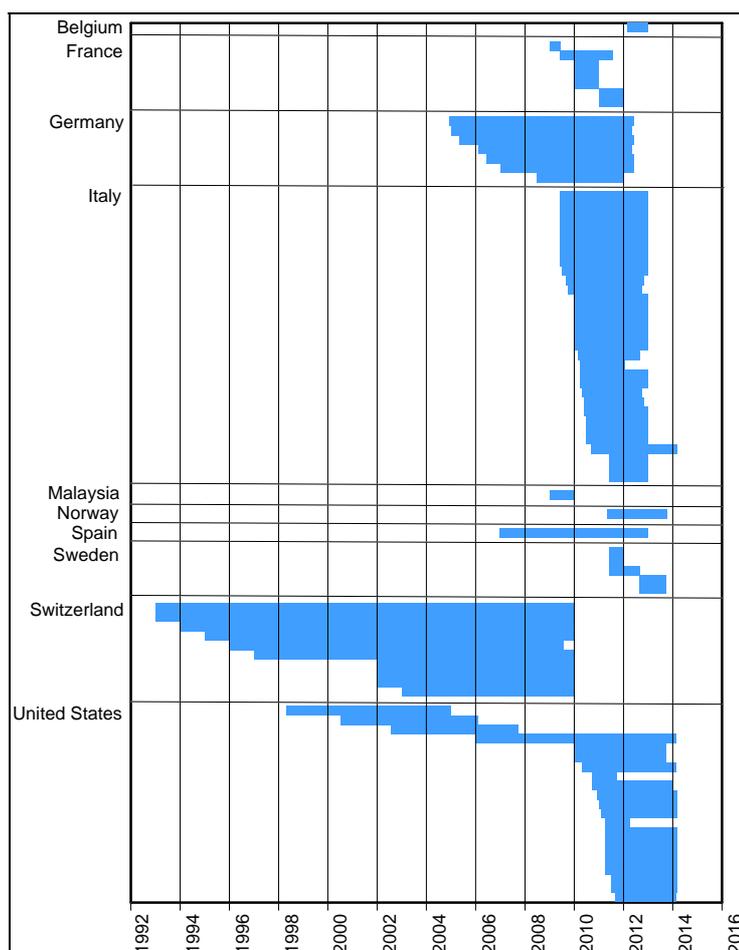


Fig. 4b: Time and country of data collection by March 2014 within Task 13.

Die zusätzlich neuen Anlagen, die in die Datenbank aufgenommen werden, sind noch unter den von den Experten angekündigten Anzahl Anlagen geblieben. Das hat verschiedene Gründe. Zum Teil aufgrund der Geheimhaltung von kommerziellen Anlagebetreibern, zum Teil durch die schwierigen

Marktverhältnisse am Photovoltaikmarkt per se und auch dem Umstand, dass wenige öffentliche Forschungsmittel für die Ausmessung und Analyse solcher Anlagen zur Verfügung steht.

Die Verlängerung des Tasks um weitere drei Jahre erlaubt es, hier die Anstrengungen weiter zu führen und zu verstärken, um noch weitere qualitativ hochwertige Messdaten erhalten zu können.

Der Direktvergleich der Aktivitäten vom Task 2 mit Task 13 zeigt, dass man innerhalb von 8 Jahren (1999 – 2007) im Task 2 18'528 Betriebsmonate an Messdaten bereitstellen konnte. Für den Task 13 (2010 – 2014) sind es rund 9'791 Monate. Das heisst, gemessen an den Datensätzen ist das ein etwa proportionales Resultat.

## **Nationale / internationale Zusammenarbeit**

Task 13 ist Teil der Photovoltaic Power System Vereinbarung der IEA, einer internationalen Zusammenarbeit. Folgende IEA PVPS Länder und Institutionen sind am Task 13 beteiligt:

Austria, Belgium, China, Cyprus, EPIA, France, Germany, Israel, Italy, Japan, Malaysia, Netherlands, Norway, Spain, Sweden, Switzerland, Turkey, UK and USA.

## **Bewertung 2014 und Ausblick 2015**

Im ersten Teil der Arbeiten vom Task 13 konnte TNC die vorgesehenen Aktivitäten erfolgreich durchführen und konsolidieren. Im Einzelnen das elektronische Import-Tool für die Projektdatenbank, die Projektdatenbank selbst aufgesetzt als im Internet vorgehaltene Web-Plattform sowie die Publikation der Erkenntnisse aus dem gesamten Subtask 1. Allerdings ist die Beteiligung der Länder und Experten mit eigenen Projektdatensätzen von mindestens einem Jahr noch deutlich hinter den ursprünglich zugesagten Umfang geblieben. Die verbleibende Task Zeit soll auch dazu genutzt werden, die bestehende Plattform mit weiteren Datensätzen und entsprechender Erfahrung auszurüsten.

Die Auswertung mehrerer 1'000 KEV Betriebsdatensätze mit Hilfe der Daten, wie sie bei Swissgrid für die Abrechnung der KEV vorliegen, hat sich zeitlich verzögert und kann jetzt Anfang 2015 durchgeführt werden. Zusammen mit den anschliessend möglichen retrospektivischen, standortindividuellen Ertragsprognosen kann diese Arbeit 2015 sicher abgeschlossen werden.

## **Referenzen**

- [1] IEA PVPS Performance Database <http://www.iea-pvps.org>
- [2] IEA PVPS Task 13 Performance and Reliability of Photovoltaic Systems, Work Plan 2014 – 2017, April 2014, Final Draft
- [3] Report IEA-PVPS T13-05:2014 „Analysis of Long-Term Performance of PV Systems – Differenz Data Resolution For Different Purposes“



# SCHWEIZER BEITRAG ZU IEA PVPS TASK 13 – 2013/2014

## PERFORMANCE AND RELIABILITY OF PV SYSTEMS

### Annual Report 2014

Author and Co-Authors	Thomas Friesen
Institution / Company	SUPSI – ISAAC
Address	Campus Trevano, 6952 Canobbio
Telephone, E-mail, Homepage	058 666 62 51 / thomas.friesen@supsi.ch / <a href="http://www.supsi.ch/isaac">www.supsi.ch/isaac</a>
Project- / Contract Number	2014.02 / IEA PVPS Pool
Duration of the Project (from – to)	2013 – 2014
Date	10.12.2014

#### ABSTRACT

The goal of this project was the collaboration in the IEA PVPS Task 13 „Performance and Reliability of PV Systems“. Our institute contributes with our research experience to the preparation of two important IEA reports, the first on the failure analysis of PV modules and the second on the characterization of thin film modules. Further we collaborate on the topic of power stabilization of PV modules and comparison of energy production in different climate.

## Einführung

Das Institut ISAAC hat 2010 bis 2014 am Projekt der IEA PVPS Task 13 „Performance and Reliability of PV Systems“ teilgenommen.

Ziel dieses Projektes war, die Leistung und die Zuverlässigkeit der PV Systeme besser zu verstehen und damit die Prognose des Energieertrages zu verbessern. Das Projekt wurde in die folgenden Arbeitspakete (ST) aufgeteilt:

- ST 1 Statistical System Performance Analysis
- ST 2 Analytical PV System Assessment
- ST 3 Module Characterization and Reliability Assessment
- ST 4 Dissemination

Schwerpunktmäßig hat unser Institut am Arbeitspaket ST 3 teilgenommen und aktiv mit Daten und Berichten zu den Arbeitspaketen ST 1 und ST 4 beigetragen.

## Projektmeetings

Für die Durchführung des Projektes waren halbjährliche Meetings vorgesehen, welche in folgender Tabelle aufgeführt sind:

Jahr	Ort	Teilnahme (Anzahl Teilnehmer SUPSI)
2010	Köln – <b>Start Up meeting</b>	JA (2)
2010	Chamberry	JA (1)
2011	Madrid	JA (2)
2011	Dead Sea	JA (1)
2012	Bruxelles	JA (2)
2012	Denver	JA (1)
2012	Rotterdam	JA (3)
2013	Kuala Lumpur	NEIN
2014	Freiburg – <b>Abschlussmeeting</b>	JA (2)

Im Rahmen der finanziellen Möglichkeiten haben wir versucht, an allen Meetings teilzunehmen und damit eine Kontinuität unseres Beitrages zu geben. Einige Meetings mit speziellen fachlichen Argumenten wurden auch von den involvierten Mitarbeitern besucht.

## Ergebnisse der Zusammenarbeit

Generell war die Teilnahme am Projekt für die Entwicklung der Kenntnisse an unserem Institut sehr hilfreich und einige Ergebnisse sind in Projekte am ISAAC eingeflossen. Zudem hat die regelmäßige Teilnahme an Meetings die Zusammenarbeit mit anderen Instituten von Weltruf wie z.B. NREL, ISE, TÜV Rheinland und ECN, wesentlich verbessert und vertieft. Auch die persönliche Beziehung zwischen den einzelnen Projektteilnehmern hat sich durch das über 4 Jahre laufende Projekt positiv entwickelt und weitere Gespräche über eine Zusammenarbeit in anderen Projekten ermöglicht.

Die Weiterführung des Projektes mit unserer tatkräftigen Unterstützung bestätigt, dass der Beitrag des ISAAC von den Projektpartnern geschätzt wurde.

Die Zusammenarbeit hat zu zwei öffentlichen Berichten von IEA PVPS mit unseren Beiträgen geführt.

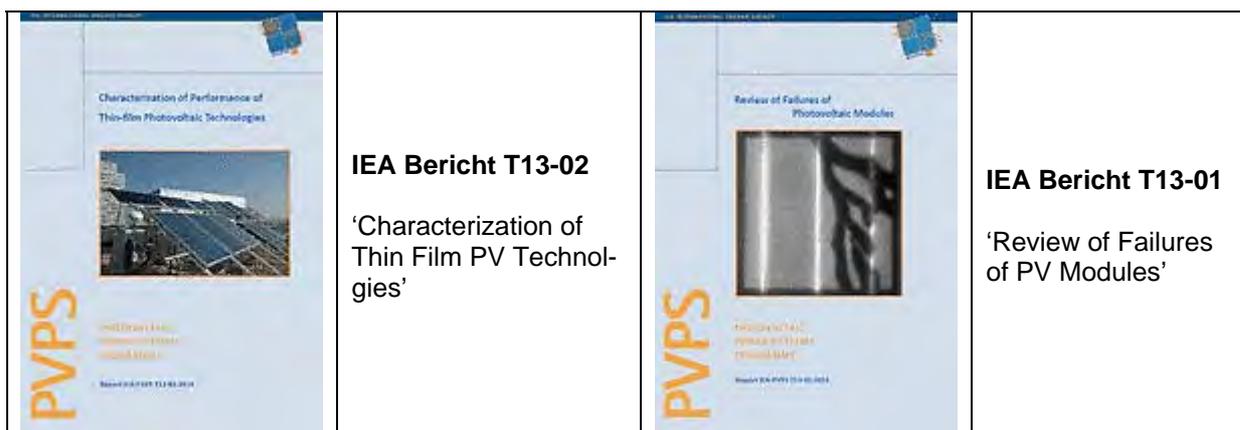
### **Solar simulator and field PV module performance measurements**

In diesem Arbeitspaket hat das Institut an der Verfassung des Berichtes, 'Characterization of Thin Film PV Technologies' beigetragen. Der erste Teil behandelt die Indoor-Messung von Dünnschichtmodulen mit Sonnensimulatoren und die damit verbundenen Problematiken, wie Leistungsstabilisierung der Module und kapazitive sowie spektrale Einflüsse auf die Messergebnisse. Der zweite Teil deckt die Outdoor-Messungen ab. Hier werden metastabile Effekte der Dünnschichtmodule im Feld und deren Auswirkung auf die Ergebnisse der Energieertragsmessungen behandelt. Auf Basis dieser Erkenntnisse wird eine neue Methode für die Auswertung der Outdoor-Messungen vorgestellt, welche die Vergleichbarkeit der Messdaten aus verschiedenen Klimaregionen und Modultechnologien ermöglichen sollte.

### **Characterizing and classifying failures of PV modules**

In enger Zusammenarbeit mit einigen Projektpartnern wurde der Bericht 'Review of Failures of PV Modules' verfasst. Im ersten Teil werden die Messmethoden für die Fehlererkennung und im zweiten Teil, die im Feld auftretenden Modulfehler im Detail beschrieben. Der dritte Teil behandelt neue Messverfahren wie die Elektrolumineszenz Aufnahmen und neue mechanische Prüfverfahren, um die im Feld häufig auftretenden Defekte zu simulieren.

Durch den intensiven Erfahrungsaustausch mit den Mitverfassern sind die Erkenntnisse und Erfahrungen auch in unseren Beurteilungsmethoden für PV Module eingeflossen.



Die Teilnahme am Projekt war auch für weitere Argumente, welche am ISAAC bearbeitet werden, wichtig, wie:

- Neue Methoden für die Stabilisierung von Dünnschichtmodulen
- Die Auswertungsmethoden von PV Systemen wurde vom ISE - Fraunhofer der Messdaten in unserer Datenbank implementiert

### **Referenzen**

- [1] **Characterization of Performance of Thin-film Photovoltaic Technologies**, IEA PVPS Task 13, Subtask 3.1, Final Report IEA-PVPS T13-02:2014, May 2014
- [2] **Review of Failures of Photovoltaic Modules**, IEA PVPS Task 13, Subtask 3.2, External final report IEA-PVPS T13-01:2014, March 2014



# IEA PVPS TASK 14 – HIGH PENETRATION OF PV SYSTEMS IN ELECTRICITY GRIDS

## SWISS CONTRIBUTION

Annual Report 2014

Author and Co-Authors	Planair SA: Davy Marcel, Lionel Perret Basler&Hofmann AG: Christof Bucher Meteotest: Jan Remund
Institution / Company	Planair SA
Address	Crêt 108a, 2314 La Sagne
Telephone, E-mail, Homepage	+41 32 933 88 40, <a href="mailto:pierre.renaud@planair.ch">pierre.renaud@planair.ch</a> , <a href="http://www.planair.ch">www.planair.ch</a>
Project- / Contract Number	2011.01 / IEA PVPS Pool II
Duration of the Project (from – to)	March 2010 - March 2015
Date	December 9, 2014

### ABSTRACT

The main purpose of Task 14 is to analyze the role of grid connected PV as an important source in electric power systems on high penetration level where additional efforts may be necessary to integrate the dispersed generation in an optimum manner. The aim of these efforts is to reduce the technical barriers to achieve high penetration levels of distributed renewable systems on the electric power system.

The Swiss team is a collaboration group constituted of employees from the companies Planair, Meteotest and Basler Hofmann. This year, the following activities have been performed by the swiss team and shall be mentioned:

- Two reports have been finalized: "Network driven Demand Side Management" (Subtask 1.2) and "characterization of the spatio-temporal variations of solar radiation and PV" (Subtask 1.3).
- Several contributions have been made reports for Subtasks 2, 3 and 4.
- The 9th workshop of IEA PVPS Task 14 has been organised in Geneva (May 2014) and Jan Remund was present in Kyoto for the 11th workshop to represent Switzerland (November 2014).
- A case study has been performed in the context of an industrial zone of Geneva to determine PV integration local limits, using "Power Factory" software for modeling and power flow calculation (similar purpose to 2013 Zurich's Luchswiesenstrasse case study but with different means and methods).

## Buts du projet

Les buts **spécifiques** de notre contribution à la IEA PVPS Task 14 en 2014 ont été les suivants:

- Apporter des réponses concrètes en Suisse à la thématique de l'intégration du photovoltaïque dans les réseaux électriques dans de grandes proportions, avec une attention particulière sur :
  - la gestion locale de l'énergie photovoltaïque et des opportunités liées à la maîtrise de la consommation,
  - la simulation des impacts potentiels dans les réseaux et la sélection des bonnes mesures de régulation permettant de profiter des opportunités de services auxiliaires au réseau du photovoltaïque,
  - la simulation du mix énergétique Suisse et la simulation des besoins de régulation et de stockage à l'échelle nationale,
  - l'adaptation des normes et des recommandations au niveau de l'intégration dans les réseaux des onduleurs photovoltaïques afin d'éviter des problèmes rencontrés dans d'autres pays européens.
- Disséminer les informations et les bonnes pratiques internationales afin de faciliter l'intégration du photovoltaïque dans les réseaux électriques en Suisse.

## Brève description du projet

Afin de répondre aux objectifs 2014 décrits ci-dessus, la **démarche** suivante a été suivie:

- **Direction et réalisation du rapport (draft) de: IEA PVPS Task 14 Subtask 1 D1.2** [1]. L'auteur principal de ce rapport est Davy Marcel (Planair) et nous avons sollicité les représentants internationaux de la IEA PVPS Task 14 pour apporter des cas d'études indépendants.
- **Direction et réalisation du rapport de: IEA PVPS Task 14 Subtask 1.3** [2]. Les auteurs principaux de ce rapport sont Catarina Calhau et Jan Remund (Meteotest) et plusieurs représentants internationaux de la IEA PVPS Task 14 ont apporté des cas d'études. Des modèles théoriques de variabilité du rayonnement solaire, développés par SUNY/Albany (Hoff and Perez, 2011) ont été validés par Jan Remund (Meteotest) en utilisant des mesures réelles au sol sur 6 régions tests dans le monde. Ces équations permettent de déterminer la variabilité de la puissance PV à grande échelle, ce qui permet d'alimenter des modèles d'études de forte pénétration d'énergie PV dans le réseau. La vitesse et la taille de déplacement des nuages est le paramètre le plus influent de cette variabilité. A l'échelle de la seconde, la variabilité est déjà très mal corrélée entre deux points distants de 100m l'un de l'autre. A l'échelle de la minute, cette limite est plutôt de 1-3km et à l'échelle de l'heure, cette limite est d'environ 150km (voir également [3])
- **Réalisation d'une étude de cas suisse et contributions dans le cadre de la: IEA PVPS Task 14 Subtask 2** [4] Un cas d'étude, réalisé par Christof Bucher (Basler & Hofmann), portant sur l'intégration de PV au réseau sur la zone de "Luchswiesenstrasse" à côté de Zurich a été synthétisé afin d'apporter une contribution au rapport. Un cas d'étude [5] utilisant des outils et des méthodes différentes, et appliqué à une zone industrielle de Genève, a été réalisé par Davy Marcel (Planair) et pourra être intégré dans un rapport de la IEA PVPS Task 14 au besoin.
- **Réalisation d'une étude de cas suisse et contribution dans le cadre de la: IEA PVPS Task 14 Subtask 3** "High penetration solutions for central PV generation scenarios" (intégration dans les réseaux de transmission). Le cas d'étude [6] réalisé par Jan Remund (Meteotest) a été synthétisé afin d'apporter une contribution à un rapport de la IEA PVPS Task 14 Subtask 3 (en cours d'édition).
- **Organisation du 9<sup>ème</sup> séminaire de la IEA PVPS Task 14 à Genève** [7]. Cet événement international en Suisse à Genève a été géré par la «swiss team ».
- **Réalisation d'un document de commentaires et de propositions** d'amélioration de l'exigence technique de raccordement en cours d'édition "Recommandation pour le raccordement au réseau des installations de production d'énergie" (document VSE/AES).

## Travaux effectués et résultats acquis

### Etude sur l'intégration du photovoltaïque en corrélation avec la demande

Le rapport [1], dirigé et réalisé dans sa majorité par Planair a principalement permis de mettre en évidence les points suivants concernant les mécanismes de DSM (« Demand Side Management », que l'on peut traduire par la « gestion de la consommation électrique »):

- Nous pourrions exploiter des performances de contrôle en fréquence et contrôle en puissance active au niveau d'une maison, pour répondre à des besoins de stabilité statique de la fréquence sur le réseau de transport, et à des besoins de stabilité statique de la tension sur les réseaux de transport et de distribution. La coordination des contrôles entre gestionnaires de réseaux de transport et de distribution est primordiale, de même que la description technique des besoins et des performances attendues. Des propositions de performances et de processus de décisions sont présentées.
- L'analyse de profils de consommation type de différents ménages dans le monde nous a permis d'étudier la capacité intrinsèque d'une installation PV et/ou de système de stockage à augmenter le niveau d'autoconsommation d'un ménage. Nous avons mis en évidence les différences importantes de capacité des ménages à atteindre des niveaux d'autoconsommation, en fonction des pays du monde, notamment en raison de profil de charge standard différent selon les pays et des profils de production photovoltaïque type. Le rapport compare notamment les performances atteintes en fonction de profils standards en Allemagne, en Suisse, aux Etats-Unis, ainsi qu'au Danemark et au Portugal.
- Un cas d'étude en Allemagne, réalisé par l'IWES, apporte des chiffres supplémentaires quant à la capacité d'un système PV et/ou de stockage à augmenter le niveau d'autoconsommation d'un ménage.

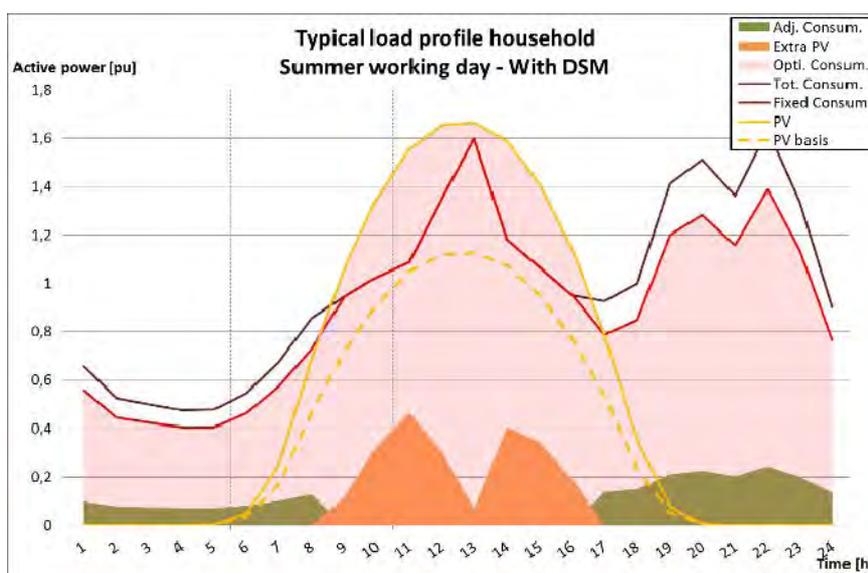


Figure 1 : Illustration des besoins moyens en déplacement de charge basés sur les profils de consommation-type de ménages et des profils de production d'énergie PV type (ici la Suisse).

Le rapport [1], en cours de publication au sein de la IEA PVPS, est disponible sur demande.

## Etude de cas pour l'intégration du photovoltaïque dans les réseaux de distribution

- Au cours de l'année 2013, une étude d'intégration électrique a été réalisée par Christof Bucher (Basler Hofmann) dans le cadre du développement électrique d'une zone résidentielle à Zurich. La zone, nommée « Luchswiesenstrasse » comprend notamment la présence d'environ 1550 ménages réparties sur le réseau BT et a consisté à déterminer les limites d'intégration d'énergie photovoltaïque. L'étude a permis, à partir d'une modélisation du réseau électrique réalisée sous le logiciel NEPLAN et d'une analyse des flux de puissance réalisée sous MATLAB, de mettre en évidence le rôle que peuvent jouer différentes stratégies de fonctionnement sur une amélioration de l'intégration du photovoltaïque. Les résultats principaux de cette étude de cas sont disponibles dans le rapport [4], sur le site web du IEA PVPS ("High penetration of PV in local distribution grids, Report IEA PVPS T14-02 :2014", pages 145 à 159).
- Au cours de l'année 2014, nous avons également réalisé des études d'intégration électrique d'un lot de parcs photovoltaïques totalisant environ 5MW sur une zone industrielle en périphérie de Genève (« ZI Bois de Bay » area). Pour réaliser cette étude [5], nous avons modélisé le réseau électrique de la zone et une fois créé, lancé des calculs afin d'analyser les limites locales d'intégration d'énergie photovoltaïque.

L'outil principal utilisé, à la fois pour la modélisation et pour les études de flux de puissance, a été le logiciel Power Factory de DigSilent. Ce projet, basé sur des informations réelles depuis l'évaluation du potentiel de puissance PV en fonction de la surface disponible des toits de la Zone Industrielle, jusqu'aux caractéristiques du réseau électrique utilisé pour la modélisation, nous a permis de mettre en évidence les points suivants :

- nous pourrions utiliser les capacités en puissance réactive des onduleurs PV classiques, pour des contrôles en cos phi ou en tension, au bénéfice du Gestionnaire de Réseau,
- une seconde opportunité est d'utiliser le PV par le « producteur-consommateur » pour compenser son facteur de puissance,
- le comportement électrique en cas de court-circuit peut être modifié avec la contribution en courant de court-circuit des installations photovoltaïques (risque à mitiger).

Le rapport « Etudes d'intégration au réseau d'un parc photovoltaïque sur une zone industrielle », publié le 8 juillet 2014, est disponible sur demande. Il est prévu que le rapport puisse être utilisé pour contribution et diffusion dans un rapport de la IEA PVPS Task 14.

En 2014, Christoph Bucher a également apporté une contribution au sujet "DSO as a service provider to the TSO", suite à une discussion préalable avec Swissgrid.

## Etude de cas pour l'intégration du photovoltaïque dans les réseaux de transmission

L'étude de cas [6], réalisée par le bureau d'étude Meteotest, a consisté à évaluer les besoins de stockage nécessaires à l'échelle fédérale, principalement à partir de données météorologiques provenant de Swissmetnet, mais également à partir de données de consommations électriques provenant de Swissgrid. Les principales conclusions du rapport sont les suivantes :

- le pompage turbinage et le parc hydroélectrique actuel pourraient nous aider à intégrer jusqu'à 25% de notre mix énergétique par de l'énergie photovoltaïque, en compensant les variations journalières et saisonnières de puissance,
- un bridage de la puissance max générée par l'énergie photovoltaïque est très recommandée à une échelle nationale afin d'optimiser le fonctionnement du futur mix électrique,
- une gestion de l'orientation des panneaux PV à l'échelle nationale ne semble pas pertinent pour optimiser le stockage nécessaire.

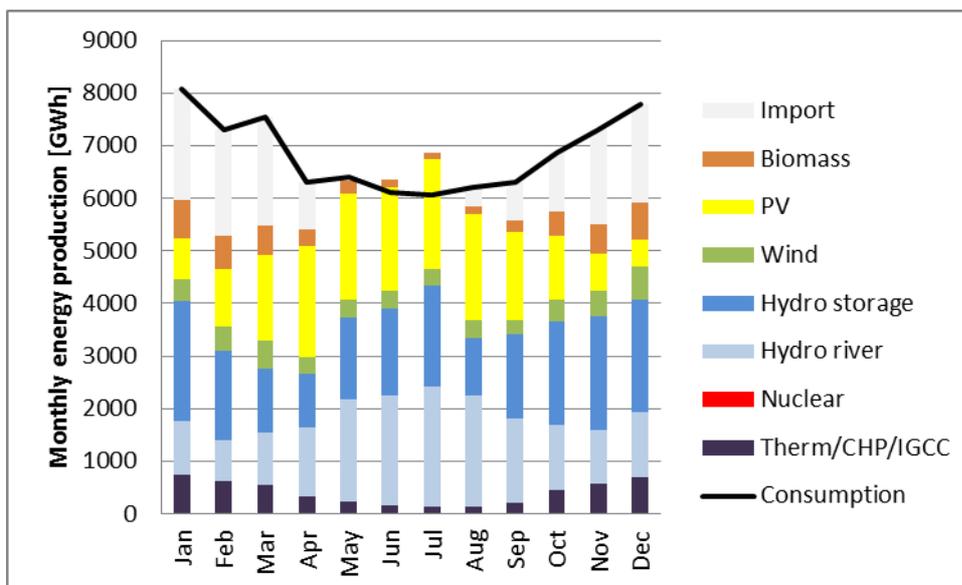


Figure 2 : Production et consommation mensuelle dans le scénario 1 (le plus ambitieux vis-à-vis des énergies renouvelables) (2050)

Le rapport est disponible sur demande et sera diffusé dans le cadre d'un rapport de la IEA PVPS Task 14, Subtask 3 ("Power system operation planning with PV integration").

### Recommandations pour les normes relatives aux réseaux

Les exigences techniques de raccordement électrique des nouvelles sources électriques renouvelables sont un aspect primordial du développement du photovoltaïque. En Suisse, c'est principalement au sein de l'AES (Association des Entreprises Electriques Suisses) que les exigences techniques les plus importantes et influentes sont rédigées.

Durant l'été 2014, les représentants de l'industrie photovoltaïque suisse ont dans ce cadre été consultés pour la création du document «Recommandation pour le raccordement au réseau des installations de production d'énergie – Spécifications techniques du raccordement et de l'exploitation parallèle pour les NR 3 à 7 », et nous avons en tant que bureau d'ingénieurs, apporté nos commentaires et nos suggestions de modifications.

Notre réponse à l'AES est disponible sur demande.

Au jour de l'édition de ce rapport, et à notre connaissance, le document de l'AES est toujours en cours d'édition.

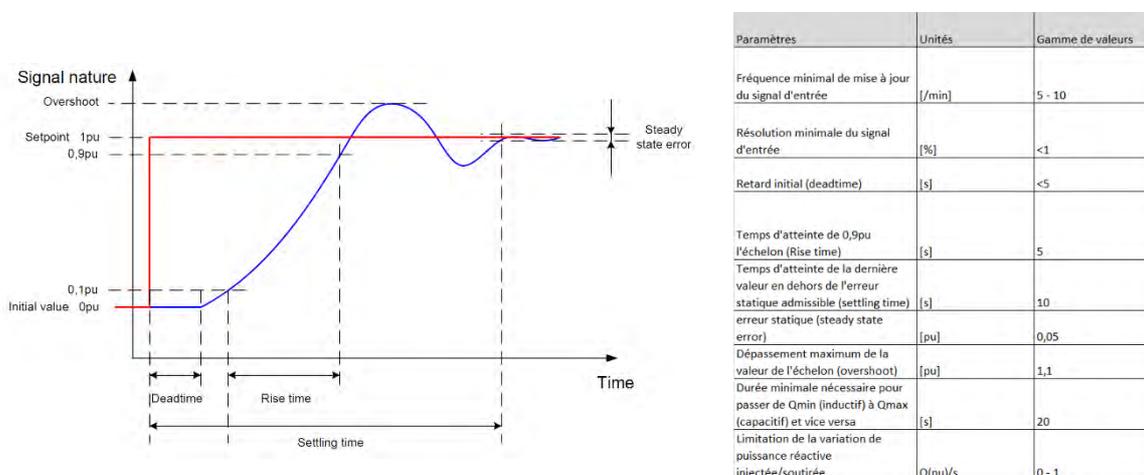


Figure 3 : Exemple de propositions chiffrées de performances électriques de l'énergie photovoltaïque, ici les performances statiques de contrôle de la puissance réactive, avec un exemple d'illustration proposée pour le "grid code" Suisse (recommandations de l'AES).

Christoph Bucher (Basler & Hofmann) participe également en permanence le développement de la norme "IEC TC 82 - Systèmes de conversion photovoltaïque de l'énergie solaire" et du sous-comité "TC 8a – Grid Integration of Large-capacity Renewable Energy (RE)".

### Organisation d'un meeting international en Suisse

Le 31 mars 2014, nous avons organisé, en partenariat avec Meteotest et Basler & Hofmann, le 9<sup>ème</sup> séminaire de la IEA PVPS Task 14 concernant l'intégration du PV aux réseaux, qui a réuni les principaux représentants de l'énergie photovoltaïque de l'Agence Internationale de l'Energie, avec les industriels de l'énergie photovoltaïque en Suisse [7].

Cet évènement, qui a réuni 36 personnes [8] à l'Hepia à Genève, a permis de créer des rencontres et favoriser des échanges entre professeurs du monde académiques, fabricants d'onduleurs, bureaux d'ingénieurs et représentants de gestionnaires de réseaux de distribution suisses.

Lors de la présentation de bienvenue, nous avons mentionné oralement le fait que nous n'aurions pas pu réaliser cet évènement sans l'aide des SIG. La semaine s'est clôturée par un « guided tour » qui a consisté en une visite accompagnée du pavillon énergie SIG à Verbois et de l'usine hydroélectrique du site, ainsi qu'une visite de la soufflerie du CMEFE de l'Hepia à Pont-Butin, et enfin des laboratoires de l'HEPIA [9].

Le programme de la journée, ainsi que la liste des personnes présentes sont disponibles sur demande. Les présentations sont par ailleurs disponibles sur le site de la IEA PVPS ci-après <http://www.iea-pvps.org/index.php?id=272>.



Figure 4 : Picture of the main international representatives of IEA present during the 9<sup>th</sup> Task 14 workshop

### Collaboration nationale et internationale

La participation suisse à la IEA PVPS Task 14 consiste en un groupe collaboratif constitué des entreprises Planair SA, with Basler & Hofmann AG et Meteotest, que l'on nomme dans ce document la "Swiss team".

Dans le cadre de toutes les activités mentionnées dans ce document, une collaboration a eu lieu avec les représentants internationaux de la IEA PVPS Task 14.

La "Swiss team" était intégralement présente lors du séminaire de mai 2014 à Genève, et Meteotest a représenté la Suisse durant le IEA PVPS Workshop @ WCPEC-6, Kyoto, 25 November 2014.

Basler & Hofmann est impliqué dans l'IEC TC82 et maintient la communication entre la IEA PVPS Task 14 et l'IEC.

## Évaluation de l'année 2014 et perspectives pour 2015

L'année 2014 a été riche en activités et en production de rapports ou autres cas d'études, et l'organisation du séminaire en Suisse a été une opportunité pour la Suisse d'affirmer sa visibilité au sein de la IEA-PVPS.

Il est d'ores et déjà prévu par la IEA-PVPS des extensions de Subtasks et notre participation au-delà de mars 2015 dépendra largement du financement.

Le prochain séminaire aura lieu en mai en Autriche (18-22 mai 2015) durant la semaine du smart grid à Vienne. Cette réunion serait une bonne opportunité pour disséminer et échanger les connaissances acquises jusqu'à présent par la swiss team.

## Références

- [1] D.Marcel, J. Fahmi, L.Perret, J. Von Appen, D.Hidalgo : Draft (not yet delivered for approval to the ExCo due February 2016), IEA PVPS Task 14 Subtask 1, D 1.2 **"Network driven demand side management and storage in households"** (by02/2016)
- [2] C.Calhau,J.Remund, L.Perret, D.Marcel : Report of IEA PVPS Task 14 Subtask 1.3 **"Characterization of the spatio-temporal variations and ramp rates of solar radiation and PV"**, T14-05:2015, August 2015
- [3] J.Remund: IEA SHC Task 46 – **"Solar Resource assessment and forecasting"**, 2014, IEA SHC Task 46,
- [4] Many authors from 11 countries incl D.Marcel and C.Bucher for Switzerland: Report of IEA PVPS Task 14 Subtask 2 **"High Penetration of PV in Local Distribution Grids: Subtask 2: Case Study Collection"**, T14-02:2014, September 2014
- [5] D.Marcel, J.M. Aeschlimann, L.Perret,: **"ZI Bois de Bay, SIG - Etudes d'intégration au réseau d'un parc photovoltaïque sur une zone industrielle"**, Juin 2014, Planair,
- [6] J.Remund, D.Klauser, R.Cattin : **"Daily and seasonal storage needs for four renewable energy scenarios"**, January 2013, Meteotest
- [7] K.Allenbach, J.Remund, D.Marcel,: **"IEA PVPS Task 14 – High Penetration PV Workshop"**, Geneva, March 31, 2014
- [8] D.Marcel: **"Participation List, IEA PVPS Task 14 – High Penetration PV Workshop "**, Geneva, Switzerland, March 31 2014
- [9] D.Marcel: **"Participation List, 9th Task 14 Experts Meeting "**, Verbois, 1-2 April 2014



## IEA SHC TASK 46

# SOLAR RESOURCE ASSESSMENT AND FORECASTING

## Annual Report 2014

Author and Co-Authors	Jan Remund
Institution / Company	Meteotest
Address	Fabrikstrasse 14, 3012 Bern
Telephone, E-mail, Homepage	<a href="mailto:Jan.remund@meteotest.ch">Jan.remund@meteotest.ch</a> , <a href="http://www.meteotest.ch">www.meteotest.ch</a>
Project- / Contract Number	SI/500184 / SI/500184-05
Duration of the Project (from – to)	1.1.2011 – 30.6.2016
Date	Dezember 2014

### ABSTRACT

The IEA SHC Task "Solar Resource Assessment and Forecasting" will provide the solar energy industry, the electricity sector, governments, and renewable energy organizations and institutions with the means to understand the "bankability" of data sets provided by public and private sectors.

A major component of the task is to provide this sector with information on how accurately solar resources can be forecast in the near future (sub-hourly, 1-6 hours, and 1-3 days) so that utilities can plan for the operation of large-scale solar systems operating within their systems. Another major component of the task is understanding short-term (1-minute or less) resource variability associated with cloud passages that cause power "ramps", an important concern of utility operators with large penetrations of solar technologies in their system. Although solar heating and cooling technologies are not, in themselves, "grid-tied" systems, the use of these technologies also impacts grid operations since they offset the use of conventional fuels or electricity.

## Project goals

The major goal of IEA SHC Task 46 is to provide the solar energy industry, the electricity sector, governments, and renewable energy organizations and institutions with the means to understand the “bankability” of data sets provided by public and private sectors. A major component of the task is to provide this sector with information on how accurately solar resources can be forecast in the near future (sub-hourly, 1-6 hours, and 1-3 days) to support utilities in the operation of large-scale solar systems operating within their systems. Another major component of the task is to understand short-term (1-minute or less) resource variability associated with cloud passages that cause power “ramps”, an important concern of utility operators with large penetrations of solar technologies in their system.

There are four main Subtasks to achieve this goal:

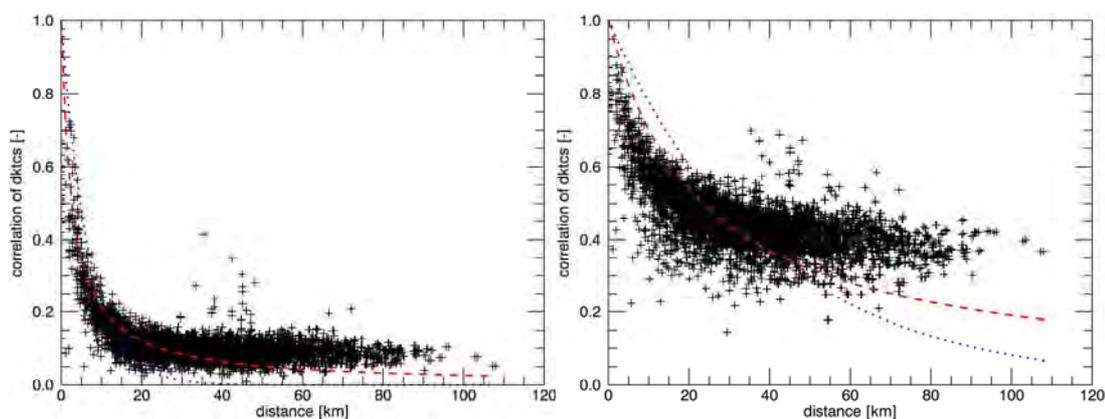
- Subtask A: Solar Resource Applications for High Penetration of Solar Technologies
- Subtask B: Standardization and Integration Procedures for Data Bankability
- Subtask C: Solar Irradiance Forecasting
- Subtask D: Advanced Resource Modeling

IEA SHC Task 46 continues the status of “Minimal Collaboration” with the PVPS and SolarPACES Implementing Agreements that was established earlier under Task 36. In particular, Task 46 maintains close collaboration with IEA PVPS Task 14. Jan Remund serves as the Task 46 Representative to Task 14. We envision the main areas of collaboration to be in solar resource forecasting and variability analysis leading toward products that are used to improve the operation of high penetrations of grid-tied solar technologies.

## Completed tasks and achieved results

Our last Task Experts Meeting was held on 15-16 April 2014 in St. Pierre, La Réunion Island (France) hosted by the Laboratory PIMENT of the University of La Reunion. Since that time, Task 46 participants have been busy presenting their work at a number of conferences and preparing technical reports and journal papers.

In **Subtask A**, a report on temporal and spatial solar resource variability is under development by SUNY/Albany (USA). Jan Remund of Meteotest showed the validity of the variability models developed by SUNY/Albany (Hoff and Perez, 2011) at six test regions worldwide based on ground measurements within an upcoming report of the linked IEA PVPS Task 14 (Calhau et al., 2015) (Figure 1). Those equations can be used to determine the spatial and temporal smoothing effects and therefore also the fleet variability of PV installations, which is needed for grid modelling with high penetration of PV.



**Figure 1:** Correlation coefficients of relative ramp rates (“dktps”) vs. distance for production data of 90 PV installations in the Canton of Berne (Source: Energiepool Switzerland / “KEV” installations). Left: 15 minute resolution, right: 1 hour resolution. Dashed and pointed lines: theoretical values based on Hoff and Perez.

Within this report adequate spatial and temporal resolutions have been calculated. The temporal and spatial variability are mainly linked to the cloud size and speed. As cloud sizes and speed lay within some typical ranges, the variability and smoothing show also typical values. Using one second data two stations are very low correlated already at a distance of 100 m. Using one minute data this limit is typically in the range of 1-3 km and using one hour data this limit is reached with a distance of 150 km.

A variety of activities are underway in **Subtask B**, which focuses on ways of improving data quality and the presentation of data, such as measurement best practices, improved Typical Meteorological Year data sets, and methods for merging satellite data with ground data to produce bankable solar resource information. Key achievements during this reporting period include further progress on development measurement best practices guidelines for the use of Rotating Shadowband Irradiometers for obtaining high quality Direct Normal Irradiance and Global Horizontal Irradiance measurements, which has led to the preparation of a chapter to be included in an upcoming Task 46 interim deliverable. Also in Subtask B key studies have been published showing the importance of using recent data, rather than long-term historical data, for developing typical meteorological year data sets for use in the accurate evaluation solar system performance.

**Subtask C** continues to study and benchmark various solar resource forecasting methodologies over different timelines (hour-ahead, day-ahead) using techniques such as all-sky cameras, satellite cloud motion vectors, and Numerical Weather Prediction models combined with high-resolution mesoscale models. At the PVSEC Conference in the Netherlands in September the results of a national short-term forecasting study in Germany were presented by the University of Oldenburg, showing that 0-6 hour forecasts are typically much more accurate when aggregated over large areas, and when combinations of methodologies (such as cloud motion vector analysis along with the application of Numerical Weather Prediction Models) are used (Lorenz et al., 2014). Meteotest presented at the same conference, their validation of the shortest term forecast CloudMove (Müller and Remund, 2014).

Meteotest is part of a new international benchmark study, which is led by University of Oldenburg. Meteotest will compare their shortest term forecasts (0 – 6 h) “CloudMove” at 12 Swiss meteo locations with the forecasts of different providers. In a second benchmark Meteotest takes part with its own “Solar Forecast” (<https://solarforecast.meteotest.ch/>) for German locations. This 5 day forecast is based on Model Output Statistics (MOS) and GFS model. First results of the German comparison are looking promising. The GFS MOS shows the same uncertainty levels as the state of the art model IFS of ECMWF. The relative rmse lie at 35-40% for 24 hours forecasts for German locations with one year of data. The results of the benchmark study will be reported in 2015.

**Subtask D** continues to investigate ways to improve satellite-derived solar resource models, especially by taking into consideration 3-dimensional cloud information and improved aerosol data. A key publication developed by a number of Task 46 participations titled “Direct Normal Irradiance Related Definitions and Applications: The Circumsolar Issue” has been published shortly in Solar Energy Journal (Blanc et al., 2014), addressing the importance of understanding the role of circumsolar radiation in the immediate vicinity of the solar disk in accurately representing DNI measurements for concentrating solar power applications.

## National and international cooperation

The work was done in the framework of IEA Solar Heating and Cooling Task 46. From Switzerland there is also University of Geneva part of the task team. The results are exchanged with the COST action ES1002 (“wire”). Task 46 will continue with a level of minimal collaboration with SolarPACES. Task 46 is closely related to Task 14 in the PVPS (Jan Remund of Meteotest serves as task liaison).

Task 46 also maintains collaboration with the Global Earth Observation System of Systems (GEOSS) Programme, and the IRENA Global Atlas.

## Outlook 2015

The task will go on next year. The team will meet presumably twice with a first meeting end of January at Almeria (DLR, Plataforma Solar). The benchmark studies of different forecasts products will be finalized and published in 2015.

The U.S. Department of Energy has made the decision to withdraw its participation from the IEA/SHC Implementing Agreement, effective March 2015. At its 76th Meeting in Beijing in October, the IEA/SHC Executive Committee determined that, due to the minimal collaboration status that Task 46 has with

both the IEA/PVPS and IEA/SolarPACES Programs, the current U.S. participations can continue their work on the Task though its completion in June 2016, although they will no longer have official participation status. Steps are being taken to identify a new country to support the Operating Agent, with the goal of allowing the current OA to continue his work through the end of the Task. A final decision on the OA situation will be made at the 77th IEA/SHC Executive Committee meeting in the Netherlands in June 2015.

## References

- [1] P. Blanc, B. Espinar, N. Geuder, C. Gueymard, R. Meyer, R. Pitz-Paal, B. Reinhardt, D. Renné, M. Sengupta, L. Wald and S. Wilbert, "Direct Normal Irradiance Related Definitions and Applications: The Circumsolar Issue", *Solar Energy*, Vol. 110, pp. 561-577, 2014.
- [2] C. Calhau, J. Remund, L. Perret, D. Marcel, "Characterization the spatio-temporal variations of solar radiation and PV", report of subtask 1 of the IEA PVPS Task 14, in review, IEA PVPS, 2015.
- [3] T. E. Hoff and R. Perez, "Modeling PV Fleet Output Variability," *Solar Energy*, Vol. 86, pp. 2177-2189, 2011.
- [4] S. Müller and J. Remund, "Satellite based shortest term solar energy forecast system for entire Europe for the next hours", *Proceedings of the 29th EU PVSEC*, 22-26 Sept. 2014, Amsterdam.
- [5] E. Lorenz, J. Kühnert, B. Wolff, A. Hammer, O. Kramer and D. Heinemann, "PV power predictions on different spatial and temporal scales integrating PV measurements, satellite data and numerical weather predictions", *Proceedings of the 29th EU PVSEC*, 22-26 Sept. 2014, Amsterdam.



# PHOTOVOLTAISCHE SOLARENERGIE- SYSTEME

## Annual Report 2014

Author and Co-Authors	Peter Toggweiler
Institution / Company	Basler und Hofmann AG
Address	Forchstrasse 395, 8032 Zürich
Telephone, E-mail, Homepage	044 387 11 22, <a href="mailto:peter.toggweiler@baslerhofmann.ch">peter.toggweiler@baslerhofmann.ch</a> , <a href="http://www.baslerhofmann.ch">www.baslerhofmann.ch</a>
Project- / Contract Number	SWISSOLAR - 17967
Duration of the Project (from – to)	2008 - .....
Date	January 2015

### ABSTRACT

Das IEC-TC82 hat im Jahr 2014 vier neue Normen und zwei TS (Technical Specifications) publiziert, dazu eine kleine Ergänzung zu einer bestehenden Norm. Zusätzlich hat Cenelec/TC82 drei eigene Normen neu in Kraft gesetzt. Das IEC/TC 82 tagte im Juni in Busan und diverse Arbeitsgruppenmeetings fanden anfangs Dezember in Wels(A) statt. Das CES/TK 82 hatte zwei Sitzungen. Es besteht gegenwärtig aus 24 Mitgliedern und mehrere davon nahmen an internationalen Arbeitsgruppenmeetings teil. Insgesamt wurden 132 Dokumente behandelt, zu 63 davon wurde abgestimmt, und es wurden 17 Dokumente kommentiert. Nationale Schwerpunkte bildeten die Revision des Kapitel 7.12 in der NIN zur Photovoltaik und die Revision der Brandschutzvorschriften. Ergänzend zum neuen Brandschutzmerkblatt "Solaranlagen" wurde das "Stand der Technikpapier" von Swissolar aktualisiert. Die Auslegung und Praxisanwendung der Normen führte verschiedentlich zu Unklarheiten bei der Kontrolltätigkeit durch das ESTI. Mit einem regelmässigen gegenseitigen Informationsaustausch soll dies inskünftig verbessert werden.

Neu besteht eine koordinierte Zusammenarbeit mit dem CES/TK 8, Cenelec/TC8 und dem IEC/TC8 (Systems aspects for electrical energy supply). Gemeinsame Themen sind die Anschlussbedingungen für dezentrale PV-Anlagen und Smart Grid. Für den Netzschluss von dezentralen Stromerzeugern hat Cenelec ein TS publiziert. Wesentliche Inhalte daraus wurden in ein entsprechendes VSE-Dokument aufgenommen. Die Photovoltaikbranche ist mit dem Inhalt des TS nicht ganz zufrieden und strebt Verbesserungen an. Betreffend Normen für die Gebäudeintegrierte Photovoltaik ergab sich ein nachträglicher Koordinationsbedarf mit ähnlichen Aktivitäten des ISO TC 160, wo eine DIS 18178 mit dem Titel "Glass in building — Laminated solar PV glass" in Bearbeitung ist. Die Schweiz hat dazu zahlreiche Kommentare eingereicht. Aus Sicht Schweiz soll zum Thema PV Fassaden zuerst das laufende CENELEC-Projekt prEN 50583 "Photovoltaics in Buildings" abgeschlossen werden. Innerhalb IEC wurde das BIPV-Vorhaben zurückgezogen, stattdessen hat Korea ein Vorschlag für die "PV Curtain Wall" eingebracht.



# SOLAR-ERA.NET

## ERA-NET ON SOLAR ELECTRICITY FOR THE IMPLEMENTATION OF THE SOLAR EUROPE INDUSTRY INITIATIVE

### Annual Report 2014

Author and Co-Authors	<sup>1</sup> S. Nowak, <sup>1</sup> M. Gutschner <sup>2</sup> S. Oberholzer
Institution / Company	<sup>1</sup> NET Nowak Energy & Technology Ltd <sup>2</sup> Bundesamt für Energie (BFE)
Address	<sup>1</sup> Waldweg 8, 1717 St.Ursen <sup>2</sup> 3063 Ittigen (Bern)
Telephone, E-mail, Homepage	<sup>1</sup> 026 494 00 30, <a href="mailto:stefan.nowak@netenergy.ch">stefan.nowak@netenergy.ch</a> , <a href="http://www.netenergy.ch">www.netenergy.ch</a> <sup>2</sup> 031 325 89 20, <a href="mailto:stefan.oberholzer@bfe.admin.ch">stefan.oberholzer@bfe.admin.ch</a> , <a href="http://www.bfe.admin.ch">www.bfe.admin.ch</a>
Project- / Contract Number	FP7 321571 / SOLAR-ERA.NET
Duration of the Project (from – to)	01.11.2012 – 31.12.2016
Date	December 2014

#### ABSTRACT

SOLAR-ERA.NET is a network that brings together more than 20 RTD and innovation programmes in the field of solar electricity technologies (photovoltaics and concentrating solar power) in the European Research Area.

The network of national and regional funding organisations has been established in order to increase transnational cooperation between RTD and innovation programmes and to contribute to achieving the objectives of the Solar Europe Industry Initiative (SEII) through dedicated transnational activities, especially joint transnational calls.

SOLAR-ERA.NET is an EU funded FP7 project running from 2012 to 2016. Through the support of the funding organisations, more than 100 MEUR shall be mobilised for transnational RTD and innovation projects in PV and CSP fields.



## Aims of the project / network

The overarching objective of SOLAR-ERA.NET is to effectively implement the Solar Europe Industry Initiative. On this purpose, SOLAR-ERA.NET needs also to:

- build a strong network involving key stakeholders of national and regional RTD and innovation programmes relevant for solar energy (PV and CSP)
- create critical mass and mobilise resources for accelerated technology development and deployment
- apply an efficient and coherent approach for effective transnational collaboration
- support concrete joint activities and projects

If the SOLAR-ERA.NET is effectively implemented, it will:

- contribute to Europe's leading position in solar technologies and sustainable development
- enhance coherency and durable cooperation in ERA

## Description of the project

SOLAR-ERA.NET is a FP7 funded European network of national and regional funding organisations and RTD and innovation programmes in the field of solar electricity generation, i.e. photovoltaics (PV) and concentrating solar power (CSP) / solar thermal electricity (STE).

### **SOLAR-ERA.NET consortium members (organisations participating):**

- NET Nowak Energy & Technology, Switzerland (coordinator)
- Federal Department for Environment, Transports, Energy and Communication, Switzerland
- Forschungszentrum Jülich, Germany
- Teknologian Ja Innovaatioiden Kehittaemiskeskus (TEKES), Finland
- Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME), France
- Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT), Spain
- Service Public de Wallonie (SPW), Belgium
- Agentschap voor Innovatie door Wetenschap en Technologie (IWT), Belgium
- Narodowe Centrum Badan i Rozwoju (NCBR), Poland
- Turkiye Bilimsel ve Teknolojik Arastirma Kurumu (TUBITAK), Turkey
- Ministerie van Economische Zaken, Landbouw en Innovatie / NL Agency, The Netherlands
- Kentro Ananeosimon Pigon ke Exikonomisis Energeias (CRES), Greece
- The Technology Strategy Board (TSB), United Kingdom
- Research Promotion Foundation (RPF), Cyprus
- Regione Puglia, Italy
- Regione Sicilia, Italy
- Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie (BMVIT), Austria
- Klima- und Energiefonds, Austria
- Swedish Energy Agency, Sweden

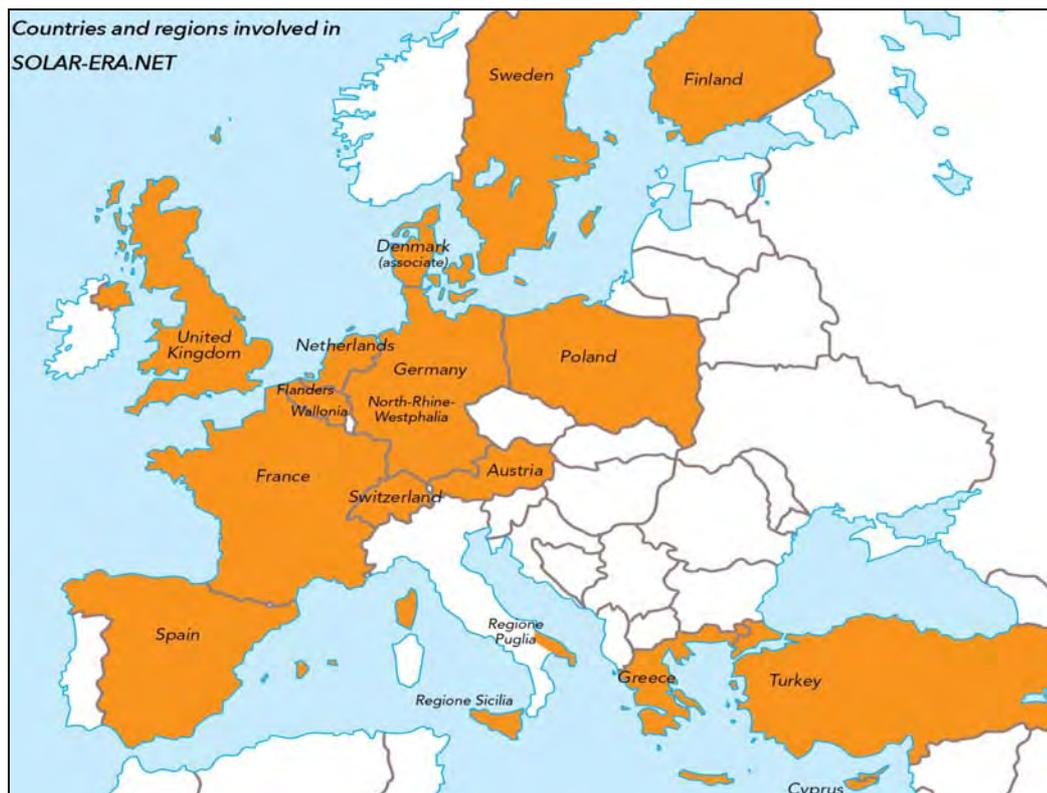
SOLAR-ERA.NET has a double mission:

- I) as a network in the ERA-NET scheme, it shall improve coordination and cooperation between national / regional RTD and innovation programmes and
- II) as a network in the context of the European Strategic Energy Technology Plan (SET-Plan) and Solar Europe Industry Initiative (SEII), it shall implement the SEII on the transnational level (complimentary to actions taken on national and EU level).

Altogether SOLAR-ERA.NET shall contribute to reaching the objectives of the Solar Europe Industry Initiative (SEII) by carrying out the coordination and support actions for the implementation of the SEII between national and regional RTD and innovation programmes.

The SEII is embedded in the European Strategic Energy Technology Plan (SET-Plan) which aims to increase, coordinate and focus EU support on key low-carbon energy technologies in order to achieve Europe's 2020 energy objectives in the future. The SEII is a joint initiative of the industry sector, EC and member states. The objective of the SEII is to boost the development of the PV and CSP sector beyond "business-as-usual" in the areas of Research and Development, Demonstration and Deployment. For the concerned solar electricity technologies Implementation Plans have been developed setting out priorities for RTD in Europe.

Key activities of SOLAR-ERA.NET are to undertake joint strategic planning, programming and activities for RTD and innovation in the area of solar electricity generation. Joint activities, namely joint calls, are defined for key topics and priorities in accordance with the SEII. Four transnational calls are planned (one per year) that shall mobilise 50 MEUR of public funding and, in total, 125 MEUR for industry-led RTD and innovation projects.



*Figure 1: Map with countries and regions involved in SOLAR-ERA.NET*

## **Work carried out and results achieved**

The network started in November 2012. Two sets of transnational joint calls have been carried out so far. 15 countries and regions participated in the first set of transnational joint calls, launched in March 2013, covering 5 PV and 3 CSP topics. The number of countries and regions increased to 17 in the second set of transnational joint calls launched in January 2014. The portfolio of the second joint call grew up to 7 PV and 4 CSP topics.



**Figure 2:** At the last SOLAR-ERA.NET Meeting held in London mid-October 2014, a list of projects suggested for funding was set up and the third set of transnational calls PV3 and CSP3 was prepared.

Call topics in photovoltaics (PV) and concentrating solar power (CSP) are commonly defined by the SOLAR-ERA.NET consortium and adopted by the participating programmes and countries according to their national / regional priorities.

The SOLAR-ERA.NET transnational call PV2 covered the following 7 topics:

- PV2.1 Innovative processes for inorganic thin-film cells & modules
- PV2.2 Dedicated modules for BIPV design and manufacturing
- PV2.3 Grid integration and large-scale deployment of PV
- PV2.4 High-efficiency PV modules based on next generation c-Si solar cells
- PV2.5 Solar glass and encapsulation materials
- PV2.6 Concentrator PV technology
- PV2.7 Si feedstock, crystallization and wafering

Another topic “Organic solar cells, perovskites and other emerging concepts” was added for the third joint call.

The SOLAR-ERA.NET transnational call CSP2 covered the following 4 topics:

- CSP2.1 Cost reduction and efficiency increase in components
- CSP2.2 Dispatchability through storage and hybridisation
- CSP2.3 New fluids for CSP plants
- CSP2.4 Innovative thermodynamic cycles

The transnational call is based on a 2-step/stage- procedure with i) a preproposal and ii) a full proposal stage. Preproposals are checked according to the national / regional regulations and then discussed in the SOLAR-ERA.NET consortium setting up lists of preproposals recommended respectively not recommended for stepping on to the full proposal phase.

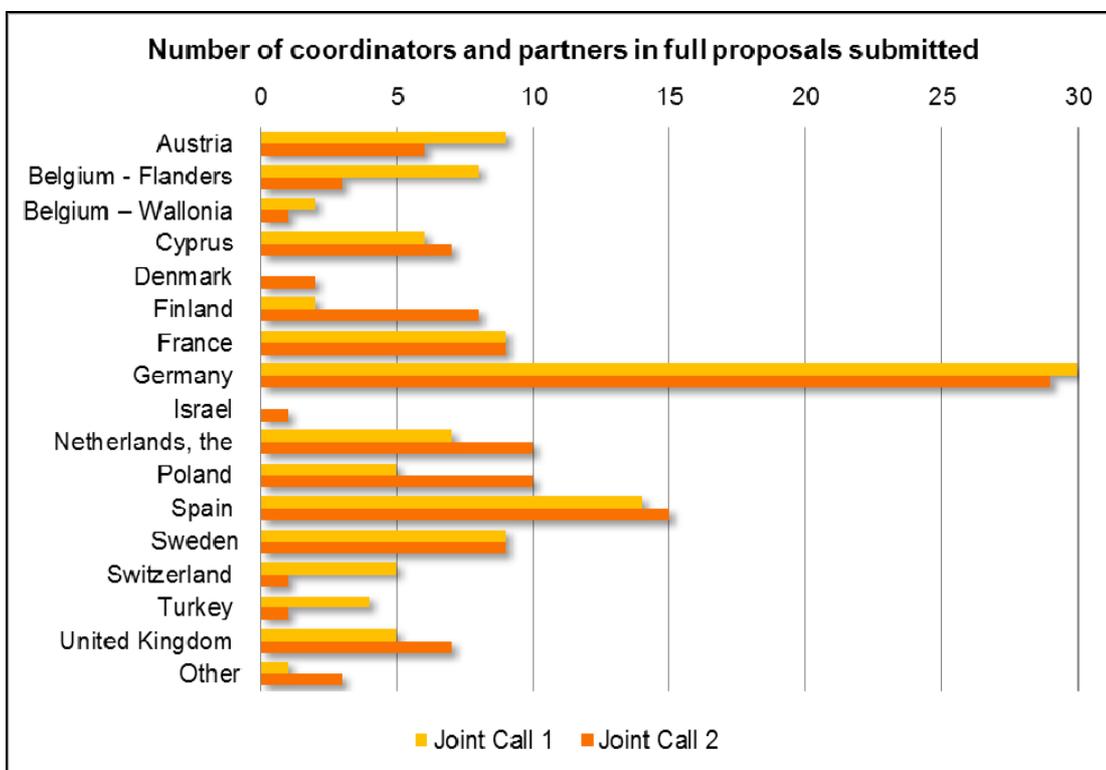
Once the full proposals are evaluated by independent international experts as well as by national experts, SOLAR-ERA.NET partners discuss the proposals and agree on a list of projects suggested for funding. The ultimate funding decisions are however taken by the national agencies / ministries.

The transnational SOLAR-ERA.NET joint calls are each allocated with a total public funding budget of approximately 12 million euros provided by the participating national and regional programmes and agencies. The joint call consortium is mainly composed of SOLAR-ERA.NET partners but can be extended by associate partners (like Denmark and Israel in the second set of transnational joint calls). Applicants may also come from other countries (like Ireland and Norway in the second set of transnational joint calls) but they do have to provide their own funding for their participation in the projects.

The two transnational SOLAR-ERA.NET calls found good interest in the solar power industry sector and research community. Some 109 preproposals were submitted involving 478 partners from 18 countries. 45 full proposals were submitted.

In the second call, 24 full proposals (21 full proposals submitted in first joint call in 2013) with a total project volume of 24,5 million euros were submitted by the deadline set (15 September 2014). Out of the 24 full proposals submitted, 22 were for PV topics and only 2 for CSP topics.

122 potential project partners (114 potential project partners in first joint call in 2013) can be counted from 18 different countries and regions (15 different countries and regions in first joint call in 2013). Figure 3 shows the number of coordinators and partners in the full proposals submitted by country / region.



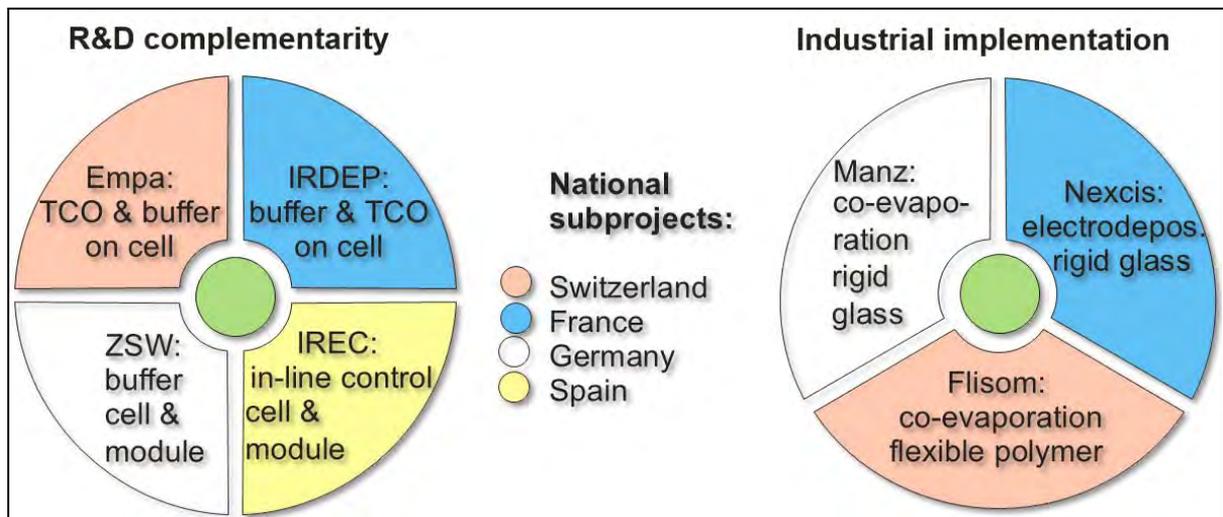
**Figure 3:** Number of coordinators and partners in full proposals submitted according to the countries / regions participating in the transnational SOLAR-ERA.NET calls PV2 and CSP2

### National and international cooperation

International cooperation is in the very core of SOLAR-ERA.NET with the goal to enhance coordination and collaboration between more than 20 RTD and innovation programmes from 18 countries and regions.

The Swiss participation in the first set of transnational calls was good with 10 organisations involved in 8 preproposals and, at the second stage, 5 organisations involved in 4 full proposals projects. The Swiss participation then dropped down to one project in the second set of transnational calls.

A good example with Swiss participation is reflected in the figure below showing transnational complementarity for R&D and industrial implementation.



**Figure 4:** A project funded within SOLAR-ERA.NET with Swiss participation: „NovaZolar“ – All-non-vacuum processed ZnO-based buffer and window layers for CIGS solar cell technology.

## Evaluation 2014 and outlook 2015

The current situation and competition in the PV and CSP industry sector can be characterised as harsh and presents a challenging context as well for SOLAR-ERA.NET. SOLAR-ERA.NET strives to cope best with these challenges and translate them in opportunities for both Europe as a whole and the participating states individually.

The first set of transnational joint calls PV1 and CSP1 resulted in a list of 13 projects being suggested for funding. Although this list is a result out of common discussions, it is not a legally binding document for all national and regional funding agencies. Applicants do have to fulfil all national and regional requirements as well and some projects find themselves on a waiting list because of oversubscription of initial funding budgets available in some countries or regions.

First projects could already start in spring 2014 and currently 8 projects have green light from all national and regional agencies. Another 2 projects are still awaiting the final positive funding decisions about to be taken by all agencies involved. These 11 projects request a total funding of approx. 10 MEUR. Three projects got stranded, one of which was the largest project that finally cannot take off due to insolvency of one of the partners. This case reflects the harsh economic situation for the solar sector in general and in some countries in particular. Some delays were caused by longer / late parallel national calls and budget reservation procedures as well as due to shifts of responsibilities from one ministry to another.

For the second set of transnational joint calls, different measures were taken to further improve the procedures in the countries having encountered delays. By the time of writing this contribution, a list of 16 projects suggested for funding was transmitted to the different national /regional agencies for their funding decisions.

In parallel, the third set of transnational joint calls PV3 and CSP3 was launched – preproposals can be submitted by end of March 2015.

With respect to the successful projects from the transnational joint calls, relevant information is provided on the solar-era.net website.

## Bibliography

Information can be found on the network's website [www.solar-era.net](http://www.solar-era.net).

CSP Implementation Plan for 2013 – 2015

PV Implementation Plan for 2013 - 2015



# SWISS INTERDEPARTMENTAL PLATFORM FOR RENEWABLE ENERGY AND ENERGY EFFICIENCY PROMOTION IN INTERNATIO- NAL COOPERATION (REPIC)

## Annual Report 2014

Author and Co-Authors	S. Nowak, A. Mastronardi, S. Gnos
Institution / Company	NET Nowak Energie & Technologie AG
Address	Waldweg 8, CH-1717 St. Ursen
Telephone, E-mail, Homepage	+41 (0) 26 494 00 30, info@repic.ch, http://www.repic.ch
Project- / Contract Number	SECO UR-00123.04.01
Duration of the Project (from – to)	01.01.2011 – 31.12.2017
Date	Mai 2015

### ABSTRACT

The Swiss State Secretariat for Economic Affairs (SECO), the Swiss Agency for Development and Cooperation (SDC) and the Swiss Federal Office of Energy (SFOE) have been operating the interdepartmental platform for the promotion of renewable energy and energy efficiency in international cooperation since 2004.

In 2014, there was more intensive focus on REPIC projects' impact factors. Therefore, data from hands-on experience was systematically collected, tailor-made coaching was offered and communication measures were strengthened, in order to disseminate the accumulated know-how and to increase the network.

The REPIC Platform contributes to the implementation of global climate protection agreements and to a sustainable energy supply in developing and transition countries. The activities represent an important part in the implementation of the Swiss policy for sustainable development on the international level. The REPIC Platform thereby contributes to the creation of a coherent policy and strategy in Switzerland, for the promotion of renewable energy in international cooperation. The specific goals of the REPIC-Platform in relationship with renewable energy in international cooperation are:

1. Project promotion and project realization
2. Information and communication
3. Coordination

## Einleitung / Projektziele

Die seit 2004 bestehende REPIC-Plattform ist eine gemeinsame Initiative des Staatssekretariates für Wirtschaft (SECO), der Direktion für Entwicklung und Zusammenarbeit (DEZA) sowie des Bundesamtes für Energie (BFE) zur Förderung der erneuerbaren Energien und der Energieeffizienz in der internationalen Zusammenarbeit – Renewable Energy and Energy Efficiency Promotion in International Cooperation.

Die REPIC-Plattform setzt seit zehn Jahren eine interdepartementale Zusammenarbeit um. Während früher die einzelnen an der Plattform beteiligten Ämter in der Regel individuell und punktuell Projekte mit erneuerbaren Energien und Energieeffizienz in der internationalen Zusammenarbeit gefördert haben, erfolgt heute ein koordinierter Ansatz zur Förderung solcher Projekte. Damit werden ein besser abgestimmtes und einheitlicheres Vorgehen sichergestellt, Doppelspurigkeiten können vermieden und Synergien zu bestehenden Programmen genutzt werden. Die Plattform wirkt subsidiär zu bestehenden Instrumenten der beteiligten Ämter.

Die REPIC-Plattform leistet einen wichtigen Beitrag zur Umsetzung einer kohärenten Politik und Strategie der Schweiz zur Förderung der erneuerbaren Energien und der Energieeffizienz in der internationalen Zusammenarbeit. Sie trägt zur Umsetzung der globalen Klimaschutzvereinbarungen und zur Förderung einer nachhaltigen Energieversorgung in Entwicklungs- und Transitionsländern bei und ist damit ein wertvoller Bestandteil der Umsetzung der schweizerischen Politik im Bereich der nachhaltigen Entwicklung auf internationaler Ebene. Der vorliegende elfte Jahresbericht beschreibt die Aktivitäten, Resultate und Erfahrungen im elften Jahr der Plattform.

REPIC versteht sich in ihrem Aufgabengebiet als marktorientiertes Dienstleistungszentrum. Unter Berücksichtigung der vorhandenen Erfahrungen kann diese Plattform Anschubfinanzierungen für neue konkrete Projekte mit vielversprechendem Multiplikationspotential im Bereich der erneuerbaren Energien und Energieeffizienz leisten. Ein wichtiges Ziel ist der Wissens- und Technologie-Transfer von Schweizer Unternehmen und Organisationen in Entwicklungs- und Transitionsländer. Die REPIC-Plattform baut dazu ihr Netzwerk zur Information und Sensibilisierung interessierter Kreise laufend aus, pflegt den Erfahrungsaustausch zwischen verschiedenen Akteuren und fördert die Kenntnis von lokalen Rahmenbedingungen und Projektmöglichkeiten. Zusätzlich wirkt die REPIC-Plattform in internationalen Netzwerken mit.

Die REPIC-Plattform umfasst die folgenden Arbeitsebenen:

1. Strategische Leitung, gebildet durch die Direktoren der beteiligten Bundesämter
2. REPIC-Steuergruppe, gebildet durch Vertreter der beteiligten Bundesämter
3. REPIC-Sekretariat, bei NET Nowak Energie & Technologie angesiedelt

## Schwerpunkte 2014, durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

Das übergeordnete Ziel der REPIC-Plattform ist der Wissens- und Technologietransfer zur Verbreitung der erneuerbaren Energien und der Energieeffizienz in Entwicklungs- und Transitionsländern.

Die Schwerpunkte der REPIC-Plattform 2014 lauteten wie folgt:

- Projektbezogene Aktivitäten
- Information und Kommunikation
- Koordination innerhalb der Trägerschaft, mit einschlägigen Finanzorganisationen und mit internationalen Netzwerken

## Projektbezogene Aktivitäten

Im Jahr 2014 erhielt das REPIC-Sekretariat 53 Projektanfragen, es wurden 27 Skizzen und 12 Gesuche behandelt, gesamthaft konnten 11 Projekte genehmigt werden. Die Anfragen lagen vermehrt in den Bereichen Photovoltaik und Diverse, wobei vermehrt Ansätze mit kombinierten Systemen vorgeschlagen wurden. Die genehmigten und laufenden Projekte liegen zu grossen Teilen in den Bereichen der Biomasse und der Energieeffizienz, sowie zu einem kleineren Teil in der Photovoltaik.

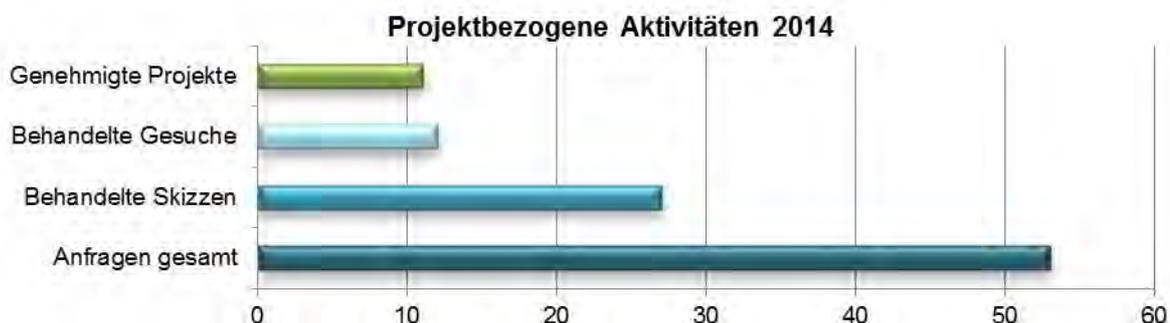


Abb. 1: Im Jahr 2014 wurden rund 20% der Anfragen genehmigt. Zu berücksichtigen ist, dass gut 49% der Anfragen nicht mit REPIC weiterverfolgt wurden, nachdem erste Abklärungen erfolgt sind. Dies weist auf ein reges Interesse einer breiten Interessensgruppe hin, die von REPIC nicht abgedeckt werden kann. Von den eingereichten Projekten konnten 40% genehmigt werden.

Rückblickend auf die letzten vier Jahre ist erkennbar, dass von der Gesamtzahl der Anfragen (184), die im REPIC-Sekretariat eintreffen, rund ein Drittel nicht mit REPIC weiterverfolgt wird. Von den Anfragen, die das zweistufige Genehmigungsverfahren durchlaufen, konnten 42% genehmigt werden. Von der Gesamtzahl an Anfragen sind dies 29% genehmigte Projekte.



Abb. 2: Durchschnittliches Verhältnis in den letzten vier Jahren der nicht weitergeführten Anfragen, der genehmigten und der nicht genehmigten Projekte an der Gesamtzahl an erfolgten Anfragen. Von den eingereichten Projekten konnten 42% genehmigt werden.

Die REPIC-Plattform stösst auf reges Interesse, jedoch werden mit dem Fokus auf den Schnittstellenbereich der Entwicklungszusammenarbeit und der Erneuerbaren Energien sowie der Energieeffizienz hohe Ansprüche gestellt. Das Projektteam sollte über gute lokale Kenntnisse verfügen, einen Wissens- und Technologietransfer aus der Schweiz ermöglichen, das Projekt in eine Umsetzungs- und Multiplikationsphase führen und gleichzeitig starke Fähigkeiten im Projektmanagement vorweisen können. Entsprechend wichtig sind gute Partnerschaften.

Das Verfahren der Projektbearbeitung und -genehmigung funktioniert gut, auf die Vielfalt der Projektanfragen wird eingegangen und die Projektierenden werden entsprechend beraten. Vorhandenes Verbesserungspotential wird regelmässig geprüft und Massnahmen dazu umgesetzt. Bei der Mehrzahl der Projekte kann das Verfahren effizient und wirksam abgewickelt werden.

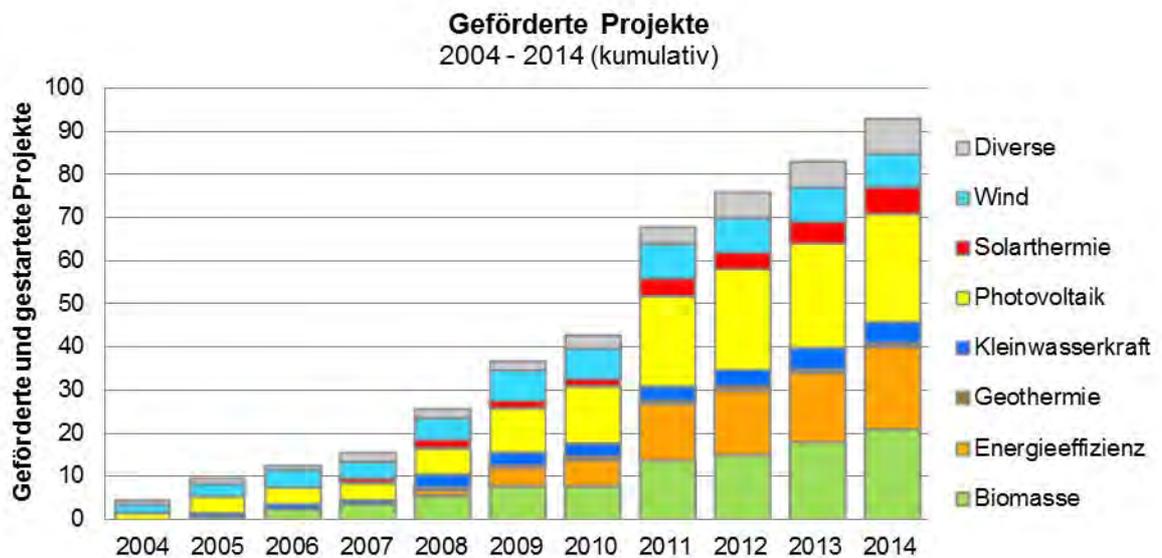


Abb. 3: Kumulative Darstellung der seit 2004 geförderten und gestarteten Projekte, farblich nach Technologiebereich unterschieden. Seit 2008 wurden auch Projekte im Bereich der Energieeffizienz gefördert. Ein stetiger Anstieg ist insbesondere im Bereich Biomasse, Energieeffizienz und in kombinierten Systemen (Diverse) ersichtlich.

Von 2004 bis Ende 2014 konnte die REPIC-Plattform 98 Projekte genehmigen, wovon bis Ende 2014 93 Projekte gestartet wurden. Im Anhang werden sämtliche im Jahr 2014 laufenden und abgeschlossenen Photovoltaik Projekte ausführlicher erläutert. Die gesamte Anzahl an geförderten Projekten ist auf der REPIC-Website aufgeschaltet. Die Projektbeschreibungen beinhalten das Projektportrait, Angaben zur Institution und zur Kontaktperson sowie bei abgeschlossenen Projekten die wichtigsten Resultate und Erkenntnisse. Für weiterführende Informationen ist der Schlussbericht zur Dokumentation hochgeladen und frei zugänglich.

Zur geographischen Verteilung auf die verschiedenen Länder gibt Abb.4 einen Überblick über die geförderten Projekte, davon darstellungsbedingt ausgenommen die internationalen Projekte.

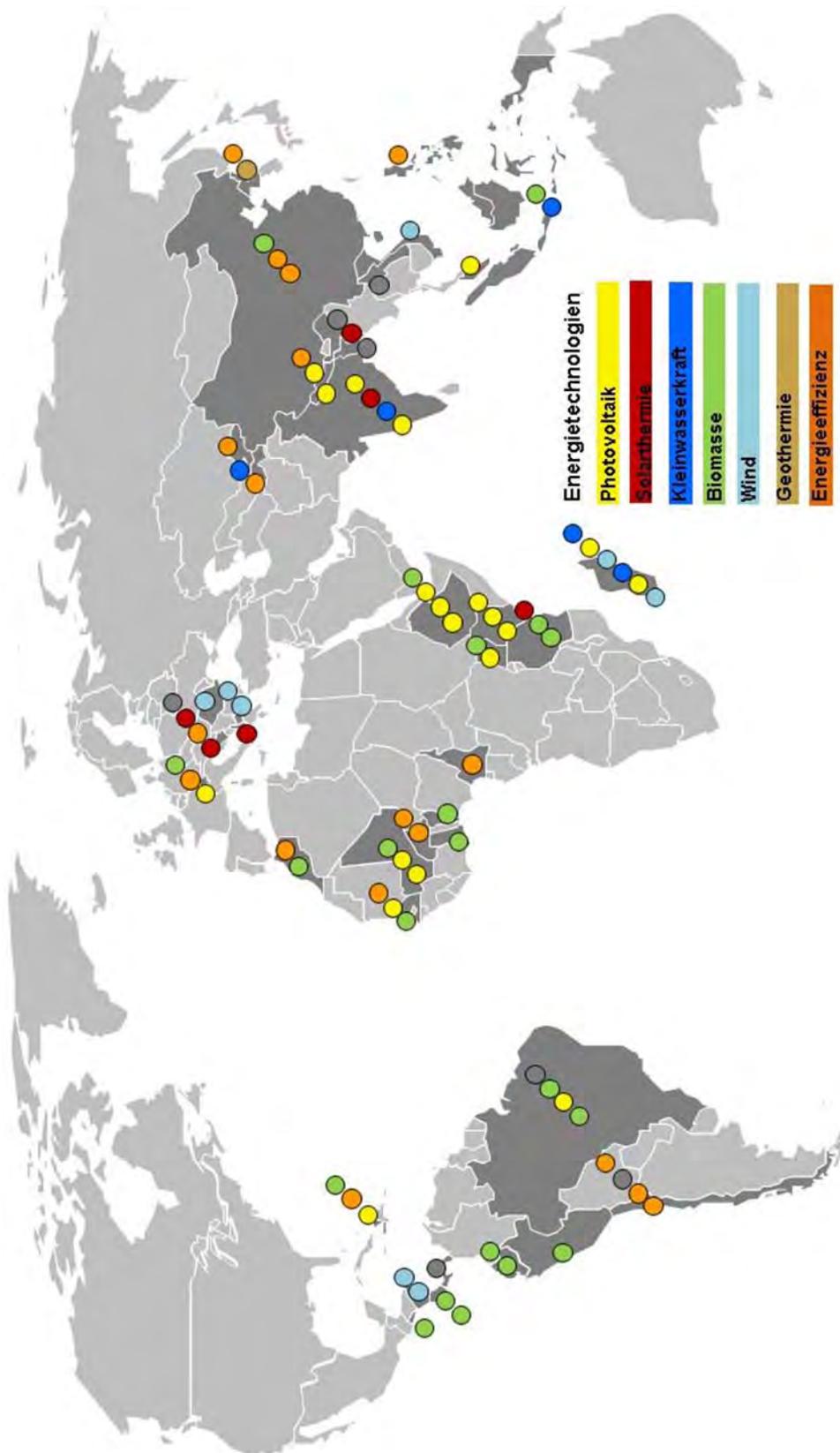


Abb. 4: Verteilung der unterstützten Projekte bis Ende 2014 nach Region und Technologiebereich, ohne die internationalen Projekte, die nicht standortbezogen sind.

## Information und Kommunikation

Am 4. November 2014 hat REPIC eine Fachveranstaltung in Freiburg zum Thema „Erfahrungen aus 10 Jahren REPIC Projekten,“ mit einer ersten Projektbörse [1, 2] organisiert. Der Anlass bot rund 70 Teilnehmerinnen und Teilnehmern gute Austauschmöglichkeiten.



Abb. 5: Projektpräsentationen im Plenum mit gut 70 Teilnehmerinnen und Teilnehmern



Abb. 6: Zeit für Erfahrungsaustausch und um neue Kontakte zu knüpfen während dem Stehlunch

Die Rückmeldungen zu dieser Veranstaltung waren sehr positiv, die Gesamtbeurteilung fiel gut bis sehr gut aus, die bewusst langen Pausen und der ausreichende Begegnungsraum für Gespräche wurden begrüßt. Auch konstruktive Kritik wurde eingebracht, so wird die Projektbörse weiterentwickelt und die Thematik der Finanzierungsinstrumente vertieft.



Abb. 7: Der Anlass entsprach bei 61% der Teilnehmerinnen und Teilnehmern den Erwartungen, bei 39% weitgehend.

Die bisherigen REPIC-Kommunikationsaktivitäten wurden weitergeführt. Die Website ([www.repic.ch](http://www.repic.ch)) wurde laufend aktualisiert und die neuen Vorlagen und Kriterien hochgeladen.

Zudem fand eine Umfrage zum Jahresbericht 2013 statt, der Gesamteindruck ist sehr positiv, am meisten werden die Informationen zu den geförderten Projekten und zu den Veranstaltungen geschätzt. Hinweise hinsichtlich einer Auflockerung der Darstellung und einzelne Zusatzinformationen zu den Projekten wurden aufgenommen, auch in den Folgejahren werden diese Hinweise in die Weiterentwicklung miteinbezogen.

## Koordination innerhalb der Trägerschaft, mit einschlägigen Finanzorganisationen und mit internationalen Netzwerken

Die REPIC-Plattform wurde auch 2014 intensiv genutzt, um Informationen zu den Tätigkeiten der beteiligten Bundesämter im Bereich der erneuerbaren Energien und der Energieeffizienz in der internationalen Zusammenarbeit auszutauschen und Aktivitäten bei Bedarf abzusprechen. REPIC hat sich noch stärker mit bestehenden Programmen vernetzt. Um den Projektierenden bei den Schwierigkeiten der Folgefinanzierung Hilfestellung bieten zu können und verstärkt in eine Multiplikation und Replikation zu gelangen, wurde laufend das Netzwerk mit Finanzierungsinstitutionen, Förderinstrumenten, erfahrenen Projektierenden und Experten erweitert. Der Kontakt mit diesem Netzwerk wird während relevanten Tagungen und Workshops aktiv gesucht, Publikationen werden in diesem Netzwerk verteilt und Vertreter werden an REPIC-Veranstaltungen eingeladen.

## **Stand der bewilligten REPIC-Projekte mit Bezug zur Photovoltaik im Jahr 2014**

### **Neu abgeschlossene Projekte**

- Swiss Fresh Water, Senegal: Pilotprojekt eines low-cost und dezentralen Entsalzungssystems im Sine Saloum Delta in Senegal
- SUPSI-ISAAC, Nepal: Netzgekoppelte PV-Pilotanlage
- Stiftung Solarenergie, Äthiopien: Sun-Control - Pilotprojekt zum Einsatz verbesserter Technik zur Handhabung und Finanzierung von Solar-Home-Systemen

### **Projekte in Abschlussphase**

- Muntwyler Engineering, Indien: Demonstrationsprojekt Solare Elektrofahrzeuge im öffentlichen Verkehr in Clean Air Island
- entec AG, International: Schweizer Beitrag im Projekt „IEA PVPS Task 9: Photovoltaic Services for Developing Countries (Photovoltaik)“, aktuelle Arbeitsperiode in Abschlussphase.

### **Projekte laufend, in Ausführungsphase**

- Berner Fachhochschule, Indien: Mikro-Unternehmen und Kleinbäuerinnen im ländlichen Indien: Innovation durch nachhaltige Energietechnologien mit der „Swiss Solar Water Pump“
- Antenna, Uganda: OOLUX – Field Test of an Advanced Solar Power Kit in Uganda

## Pilotprojekt eines low-cost und dezentralen Entsalzungssystems im Sine Saloum Delta in Senegal

---

<b>Projektart :</b> Pilotprojekt	<b>Technologie :</b> Photovoltaik
<b>Land :</b> Senegal	<b>Projektstatus :</b> Abgeschlossen
<b>Projektstart :</b> Juni 2011	<b>Projektende :</b> Oktober 2014
<b>Partner :</b> Swiss Fresh Water, Lausanne, <a href="http://www.swissfreshwater.com">www.swissfreshwater.com</a> , Renaud de Watteville	

---



© Swiss Fresh Water



© Swiss Fresh Water

### Schweizer Beitrag

Swiss Fresh Water ist ein neues Start-up-Unternehmen der ETH Lausanne. Die Leiter weisen breite Erfahrung im Projektmanagement und der Wasserbehandlung auf. Das Projekt wird in enger Zusammenarbeit mit der Firma Impact Finance aus Genf durchgeführt. Sie ist auf die Entwicklung und Finanzierung von Projekten in Entwicklungsländern spezialisiert.

### Portrait

Swiss Fresh Water (SFW) entwickelte ein low-cost Entsalzungssystem für Salz- und Brackwasser, welches die Aufbereitung von sauberem Trinkwasser erlaubt. Das System wurde für eine einfache Benutzung entwickelt, es ist einfach im Unterhalt und konsumiert wenig Energie. SFW hat entschieden, ein Pilotprojekt im Sine Saloum Delta durchzuführen, in dem 225'000 Menschen leben. Ausserhalb der Regenzeit, d.h. ca. 8-9 Monate des Jahres, trinkt die Bevölkerung vor allem Wasser aus Brackwasser-Bohrungen. Dieses Wasser ist stark Fluor-belastet und bewirkt ernsthafte Gesundheitsprobleme. Das Projekt von SFW will dazu beitragen, die Auswirkungen der Wasserversorgung auf die Gesundheit und den Bedarf an Zeit, Geld und Energie (Transport) zu verringern.

### Resultate

Nach einem ersten Jahr erfolgreichen Betriebs hat das Pilotprojekt grosse Erwartungen bei der Bevölkerung ausgelöst. Daher wurde das Projekt verlängert. Das Businessmodell wurde weiterentwickelt um die Replikation innerhalb Senegals und darüber hinaus zu ermöglichen. Ende 2013 sind 20 Maschinen in Betrieb und mehr als 35'000 Personen erhielten neu Zugang zu Trinkwasser erstklassiger Qualität.

### Wirkung

Die Wirkung des Projekts kann bereits bei Abschluss des Projekts als nachhaltig bezeichnet werden. Es sind weniger Bootstransporte für den Einkauf von Wasser nötig und Diesel wird eingespart. Die Gesundheit wird längerfristig verbessert, bestehende soziale Strukturen wurden mit dem Projekt genutzt und gestärkt. Die verbesserten Lebensbedingungen vor Ort reduzieren die ländliche Abwanderung und pro System werden mind. 1-2 Arbeitsplätze geschaffen.

### Dokumentation

Schlussbericht „Système de désalinisation à bas coûts et décentralisé dans le delta du Sine Saloum au Sénégal“ [6] verfügbar auf [www.repic.ch](http://www.repic.ch).

Kurzfilme <http://vimeo.com/38299791> und <http://www.rts.ch/emissions/court-du-jour/5644491-lavie-qui-change-senegal.html> .

## Netzgekoppelte PV-Pilotanlage in Nepal

---

<b>Projektart :</b> Pilotprojekt	<b>Technologie :</b> Photovoltaik
<b>Land :</b> Nepal	<b>Projektstatus :</b> Abgeschlossen
<b>Projektstart:</b> September 2011	<b>Projektende:</b> November 2014
<b>Partner :</b> SUPSI-ISAAC, Canobbio, <a href="http://www.isaac.supsi.ch">www.isaac.supsi.ch</a> , Domenico Chianese, Roman Rudel	

---



© ISAAC



© ISAAC

### Schweizer Beitrag

Das Institut ISAAC (Istituto sostenibilità applicata all'ambiente costruito) der SUPSI (Scuola universitaria professionale della Svizzera italiana) bringt breite Erfahrung im Bereich netzgekoppelter Photovoltaik und Ausbildung mit.

### Portrait

Dieses Projekt basiert auf den ermutigenden Resultaten einer bereits durchgeführten REPIC-Machbarkeitsstudie zu netzgekoppelter Photovoltaik in Nepal. Die aktuell unzuverlässige Stromversorgung der Nutzer (kleine und mittlere Unternehmen, Bevölkerung) soll durch eine dezentrale und partiell autonome Stromversorgung verbessert werden.

Das Pilotprojekt sieht den Bau und das Monitoring einer netzgekoppelten 1 kWp PV-Anlage mit Back-Up-System vor. Ein wichtiger Bestandteil des Projekts besteht in der Demonstration der technischen Lösungen und der Verbreitung der gewonnen Erkenntnisse.

### Resultate

Weil im Verlauf des Projekts zusätzliche finanzielle Mittel gefunden wurden, konnten statt der geplanten einen Anlage gleich fünf Anlagen erfolgreich realisiert, betrieben und überwacht werden. Die Messungen zeigen die Grenzen des lokalen Netzes auf. Häufige Netzausfälle und grosse Spannungs- und Frequenzschwankungen sind eine Herausforderung für die Netzeinspeisung. Nach Anpassung der Wechselrichter-Parameter laufen die Anlagen mit einer hohen Verfügbarkeit. Mit verschiedenen Informationsveranstaltungen wurden Vertreter von Regierungsstellen, von Universitäten, Netzbetreiber, verschiedene Organisationen sowie viele Fachleute umfassend informiert. Durch die zukünftig geplanten Aktivitäten der SUPSI mit den verschiedenen Projektpartnern in NEPAL werden die gewonnen Erkenntnisse auch in Zukunft genutzt und weitergegeben.

### Wirkung

Die Arbeiten verbesserten auf der einen Seite die Photovoltaik-Kenntnisse der diversen Veranstaltungsteilnehmer. Auf der andern Seite hatte der gute Austausch mit Netzbetreibern und Behörden einen positiven Einfluss auf neu erlassene Zulassungs- und Förderbedingungen von Photovoltaikanlagen in Nepal. Der Prozess ist noch im Gang und ein mögliches Förderprogramm für kleine netzgekoppelte Anlagen in Diskussion.

### Dokumentation

Schlussbericht „PV Grid-Connected Pilot Plant in Nepal“ [7] verfügbar auf [www.replic.ch](http://www.replic.ch).

## Sun-Control: Verbesserte Technik zur Handhabung und Finanzierung von Solar-Home-Systemen in Äthiopien

---

<b>Projektart :</b> Pilotprojekt	<b>Technologie :</b> Photovoltaik
<b>Land :</b> Äthiopien	<b>Projektstatus :</b> Abgeschlossen
<b>Projektstart:</b> Juli 2012	<b>Projektende:</b> März 2014
<b>Partner :</b> Stiftung Solarenergie, Zürich, <a href="http://www.stiftung-solarenergie.ch">www.stiftung-solarenergie.ch</a> , Harald Schützeichel	

---



© Stiftung Solarenergie



© Stiftung Solarenergie

### Schweizer Beitrag

Die Stiftung Solarenergie hat mit REPIC-Unterstützung bereits verschiedene Solar-Center, welche Solartechniker-Ausbildungen anbieten, aufgebaut und diese anschliessend weitergeführt und ausgebaut. Sie verfügt über sehr viel Erfahrung in Äthiopien im Bereich Solarenergie.

### Portrait

Im vorliegenden Pilotprojekt sollen in Äthiopien 500 neuartige Solar-Home-Systeme eingesetzt und getestet werden. Diese werden vor Ort zusammengebaut und verkauft, während der Pilotphase jedoch noch mit Subventionierung. Die neuartigen Solar-Home-Systeme sollen die Verbreitung der Solartechnik erleichtern, indem sie einen neu entwickelten Laderegler einsetzen. Damit sollen die Nutzer bessere Informationen über den Zustand des Solar-Home-Systems erhalten inklusive der verbleibenden Nutzungsdauer. Ein integriertes Prepayment System soll die Finanzierung in Raten erleichtern.

### Resultate

Die lokalen Techniker wurden für Zusammenbau, Programmierung und Wartung der Laderegler erfolgreich geschult. Die 500 Systeme wurden vor Ort zusammengebaut und haben alle Qualitätstests bestanden. Alle Solar Home Systeme wurden bis Ende Oktober 2013 installiert, in Betrieb genommen und funktionieren einwandfrei. Die eingesetzten 1W LED Lampen erreichen mit gemessenen 116 Lumen hervorragende Helligkeitswerte.

### Wirkung

Aufgrund von neuen Auflagen der Behörden konnte das Prepayment-System nicht wie geplant umgesetzt werden, womit nur ein Teil der erwarteten Wirkungen erzielt werden konnten. Durch die neue Anzeige der Restenergiedauer ist die Nutzung der Systeme deutlich einfacher und besser planbar.

Mit 500 baugleichen Systemen in Kenia konnte ausserhalb dieses Projekts die tadellose Abwicklung der Mikrofinanzierung mittels der neuen CODE-Technologie belegt werden. Dies bewirkte, dass in Kenia eine Rückzahlungsquote von 100% erreicht wurde. Die Stiftung Solarenergie erwartet, 2014 in Äthiopien, Kenia und den Philippinen insgesamt 5'000 Solarsysteme dieses Typs installieren zu können.

### Dokumentation

Schlussbericht „Sun Control: Pilotprojekt zum Einsatz verbesserter Technik zur Handhabung und Finanzierung von Solar-Home-Systemen“ [8] verfügbar auf [www.replic.ch](http://www.replic.ch).

## Demonstrationsprojekt Solare Elektrofahrzeuge im öffentlichen Verkehr in Clean Air Island, Mumbai

---

<b>Projektart :</b> Pilotprojekt	<b>Technologie :</b> Photovoltaik
<b>Land :</b> Indien	<b>Projektstatus :</b> In Abschlussphase
<b>Projektstart :</b> August 2009	<b>Projektende :</b> Geplant 2015
<b>Partner :</b> Ingenieurbüro Muntwyler und Berner Fachhochschule, Technik und Informatik, Burgdorf, <a href="http://www.ti.bfh.ch">www.ti.bfh.ch</a> , Urs Muntwyler	

---



### Schweizer Beitrag

Der Schweizer Experte bringt mit seinen umfassenden Erfahrungen sowohl im Bereich der Solarenergie als auch im Bereich der Elektrofahrzeuge eine optimale Kombination von Kenntnissen mit, um dieses Projekt zu unterstützen. Weitere Schweizer Technologiepartner werden nach Bedarf einbezogen.

### Portrait

Die indische Partnerorganisation Clean Air Island (CAI) ist seit mehreren Jahren bestrebt, die Lebensqualität im Stadtzentrum Mumbais zu verbessern. Ihre Aktivitäten stützen sich dabei hauptsächlich auf die drei Aktionsbereiche Begrünung von Strassen und Parks, Kompostierung von organischen Abfällen und Einsatz von Elektrofahrzeugen.

Im Rahmen dieses Demonstrationsprojekts sollen Elektrofahrzeuge im öffentlichen Verkehr zum Einsatz kommen, deren Batterien mit Solarstrom gespeist werden. Der elektrische Bus (30 Personen) und das elektrische Sammeltaxi (10 Personen) sollen auf einem Rundkurs zwischen zwei Bahnhöfen und dem Geschäftsviertel Nariman Point verkehren und damit einen Teil der tausenden von Pendlern in diesem Gebiet transportieren. Auf dem Dach des Busdepots soll die Photovoltaikanlage installiert werden. Die Fahrzeuge können dort jeweils ihre Batterien mit Hilfe eines Schnelladesystems aufladen oder leere Batterien gegen eine geladene austauschen.

### Resultate

Trotz starken Verzögerungen u.a. durch technische Änderungen des Ladekonzepts, Finanzierungsfragen, Partner- und Standortwechsel konnten schrittweise einige wichtige Resultate erzielt werden:

Das Demonstrationsprojekt wird nun in einem kleineren Rahmen als geplant im Bereich einer Universität (Indian Institute of Technology, Bombay) umgesetzt, dort wird die Ladestation mit Photovoltaikanlage installiert und der Rundkurs auf dem Campus durchgeführt. Nach Aufnahme des Testbetriebs wird der Kontakt zwischen der Berner Fachhochschule und dem Indian Institute of Technology weiter aufrechterhalten und die Ergebnisse laufend weiterverfolgt.

## Schweizer Beitrag im IEA PVPS-Projekt Task 9 Photovoltaic Services for Developing Countries (PVSDC)

---

<b>Projektart :</b> Netzwerk	<b>Technologie :</b> Photovoltaik
<b>Land :</b> Internationales Projekt	<b>Projektstatus :</b> In Abschlussphase
<b>Projektstart:</b> Aktuelle Arbeitsperiode im August 2013	<b>Projektende:</b> Aktuelle Arbeitsperiode geplant 2015

---

**Partner :** entec AG, St. Gallen; [www.entec.ch](http://www.entec.ch), Alex Arter, Thomas Meier

---



© IEA PVPS



© IEA PVPS

### Schweizer Beitrag

Die Schweizer Erfahrung in der internationalen Zusammenarbeit und das bei entec verfügbare Know-how aus einem verwandten Gebiet (Kleinwasserkraft) stellen wesentliche Beiträge zu diesem Projekt dar, insbesondere auch in Bezug auf die Übertragbarkeit der Resultate auf andere Technologien.

### Portrait

Gestützt auf die umfangreichen weltweiten Erfahrungen mit Photovoltaik Anlagen in Entwicklungsländern strebt dieses Netzwerk die Erhöhung von erfolgreich und nachhaltig betriebenen Anlagen dieser Art für unterschiedliche Zwecke an. Die internationale Expertengruppe umfasst auf diesem Gebiet eine breite Projekterfahrung und konzentriert ihre Arbeit insbesondere auf die nicht-technischen Aspekte dieser Anwendungen. Durch den Status eines internationalen Netzwerkprojektes ist die Expertengruppe in permanentem Kontakt mit zahlreichen internationalen Entwicklungsorganisationen.

Dieses Netzwerkprojekt startete 1999 und wird in verschiedene Arbeitsperioden gegliedert. Seit 2010 ist das Thema Photovoltaik und Wasserpumpen ein Schwerpunkt, welcher von der Schweiz koordiniert wird. Hauptanliegen ist die Verbreitung der Erkenntnisse aus diesem Netzwerk. Die Arbeitsperiode 2013/14 setzt den Schwerpunkt auf den Aufbau von neuen Partnerschaften mit regionalen und nationalen Organisationen und mit Finanzdienstleistern, um innovative Geschäftsmodelle und Finanzierungsmechanismen für die Verbreitung von PV-Lösungen zu stärken.

### Resultate

Die wichtigsten Resultate der Arbeiten im Rahmen des Schweizer Beitrags im Jahr 2014 sind die Analyse und Vorbereitung der Publikation „Innovative Business Models and Financing Mechanism for PV Deployment in Emerging Regions“ (wird im Frühling 2015 publiziert). Darüber hinaus erfolgte die Dissemination dieser und weiterer IEA PVPS Task 9 Resultate am 4th EEP Mekong Annual Regional Forum in Siem Reap, Kambodscha sowie an der 6th WCPEC World Conference on Photovoltaic Energy Conversion in Kyoto. Die Publikationen zum IEA PVPS Task 9 sind verfügbar unter <http://www.iea-pvps.org/index.php?id=3>. Weitere kürzlich unter Task 9 erfolgte Publikationen:

- PV Systems for Rural Health Facilities in Developing Areas, IEA-PVPS T9-11: 2014
- Pico Solar PV Systems for Remote Homes, IEA-PVPS T9-12:2012
- Rural Electrification with PV Hybrid Systems, IEA-PVPS T9-13: 2013

Im Rahmen der Expertengruppe von IEA PVPS Task 9 werden die aktuell vorrangigen Themen für die Bearbeitung in den folgenden Jahren definiert.

## Mikro-Unternehmen und Kleinbäuerinnen im ländlichen Indien: Innovation durch nachhaltige Energietechnologien, mit der „Swiss Solar Water Pump“

---

<b>Projektart :</b> Pilotprojekt	<b>Technologie :</b> Photovoltaik
<b>Land :</b> Indien	<b>Projektstatus :</b> Laufend
<b>Projektstart :</b> Januar 2012	<b>Projektende :</b> Geplant 2015
<b>Partner :</b> Berner Fachhochschule, Technik und Informatik, Biel, <a href="http://www.bfh.ch">www.bfh.ch</a> , Eva Schüpbach	

---



© BFH



© BFH

### Schweizer Beitrag

Das Labor für Industrieelektronik an der Fachhochschule Bern in Biel hat für die Entwicklung der Wasserpumpe eng mit Fachpersonen der Entwicklungszusammenarbeit wie Caritas und Seecon zusammengearbeitet. Frau Prof. Dr. Eva Schüpbach pflegt im Bereich der globalen Veränderungen die regelmässige Zusammenarbeit mit den indischen Hochschulen.

### Portrait

Das Ziel des Pilotprojekts ist die Einführung einer nachhaltigen Energietechnologie in kleinen indischen Landwirtschaftsbetrieben. Für den Anfang beschränkt sich das Projekt auf die Region Karnataka. Die angewandte Technologie « Swiss Solar Water Pump » ist ein einzigartiges, kleines und günstiges Wasserpumpensystem, welches mit Strom aus 80W Photovoltaikanlagen gespeist wird. Diese Technologie wurde von der Berner Fachhochschule entwickelt. Sie ist flexibel und von langer Lebensdauer und kann lokal produziert und gewartet werden. Die Umsetzungsstrategie des Projekts richtet sich an Frauengruppen und Unternehmerinnennetzwerke. Der Wissenstransfer ist in Form von Seminaren und Arbeitsgruppen vorgesehen, woran auch die Hochschulen und Schweizer sowie Indische Unternehmen teilnehmen werden.

### Resultate

Das Projekt startete im Februar 2012 mit einem Kick-off-meeting in Bangalore und der Installation der ersten 8 Pumpen. Aufgrund der ersten Resultate wurde beschlossen, am System zwei wichtige Anpassungen vorzunehmen. Einerseits werden neu stärkere Pumpen eingesetzt, andererseits wurde das System mit zusätzlichen Wassertanks erweitert, damit die Bewässerung unabhängig vom Betrieb der solaren Wasserpumpen auch in der Nacht stattfinden kann. Im Verlauf des Projekts konnten die Zusammenarbeit mit der Frauenorganisation Kudumbashree verstärkt werden. Dort werden nun sechs weitere Pumpen zusammen mit Sprinkleranlagen oder Drip Irrigation Systemen installiert. Die Bäuerinnen werden in Gruppen angeleitet und die Installationen werden ihnen anschliessend offiziell übergeben. Die Datenerfassung und die Validierung des Geschäftsmodells sind in Vorbereitungen.

## OOLUX – Field Test of an Advanced Solar Power Kit in Uganda

---

<b>Projektart :</b> Pilotprojekt	<b>Technologie :</b> Photovoltaik
<b>Land :</b> Uganda	<b>Projektstatus :</b> Laufend
<b>Projektstart:</b> Mai 2014	<b>Projektende:</b> Geplant 2015
<b>Partner :</b> Antenna Technologies, Genf, <a href="http://www.antenna.ch">www.antenna.ch</a> , Christophe Hug, Berner Fachhochschule, <a href="http://www.bfh.ch/">www.bfh.ch/</a>	

---



© Antenna Technologies



© Antenna Technologies

### Schweizer Beitrag

Die Stiftung Antenna Technologies ist in verschiedenen Entwicklungsländern auf diversen Gebieten von der Landwirtschaft über die Wasserreinigung bis hin zur solaren Beleuchtung tätig. Die Berner Fachhochschule (BFH) bringt für dieses Projekt ihr Know How in den Bereichen der Solarelektronik und Softwareentwicklung ein.

### Portrait

Nach einer ersten Testphase eines OOLUX Prototyps, unterstützt von Caritas Schweiz und der Berner Fachhochschule in den Jahren 2012 – 2013, werden im aktuellen Projekt 400 überarbeitete und verbesserte OOLUX Solar Kits in Uganda pilotmässig eingesetzt. Wichtigste Neuerung ist die zum ersten Mal eingesetzte Smartphone-Applikation zur einfachen Umsetzung verschiedener Geschäftsmodelle (Leasing, Miete, Kauf). Der lokale Partner Agrinet ([www.agrinetug.net](http://www.agrinetug.net)) verfügt über ein umfangreiches Netzwerk in der Landwirtschaft und ist für den Vertrieb der Solar Kits zuständig.

Mit diesem Projekt sollen auf der einen Seite die Tauglichkeit und der marktwirtschaftliche Ansatz der neu eingesetzten Smartphone-Applikation verifiziert werden. Auf der andern Seite soll die Wirtschaftlichkeit des ganzen Solarkits in Hinblick auf die Massenfertigung und Marktumsetzung aufgezeigt werden.

### Resultate

Zur Halbzeit des Projekts wurden alle wichtigen Ziele wie die Entwicklung der Applikation für mobile Geräte, die Produktion der notwendigen OOLUX Kits sowie der Start der Feldtests erreicht. Eine Serie von 500 OOLUX Kits wurde bis Ende Juli 2014 produziert. Der Feldtest wurde nach Plan mit Schwerpunkt in Uganda gestartet. Zusätzlich wird eine kleinere Anzahl an Kits in einem angrenzenden Gebiet in Kenia getestet.

## Beurteilung 2014

Rückblickend auf die letzten vier Jahre entwickelte sich die Plattform mit 53 geförderten Projekten gut. Das ausgelöste Projektvolumen innerhalb dieser Zeitspanne ist gut dreimal grösser als die verpflichteten REPIC-Beiträge und es konnte mit diesen Projekten das gesamte Budget für die Zeit von 2011-2013 verpflichtet werden. Für die Zeitspanne von 2014-2017 wurden weitere Mittel von CHF 6.8 Mio gesprochen, die für die Schwerpunkte der REPIC-Plattform im Bereich der Projektförderung, Information und Kommunikation sowie Koordination innerhalb der Trägerschaft, mit einschlägigen Finanzorganisationen und mit internationalen Netzwerken eingesetzt werden können.

Im Jahr 2014 wurden die operativen Unterlagen begleitend zur Projektförderung überarbeitet. Wichtige Fragestellungen zu Relevanz, Effizienz, Wirksamkeit, langfristig erzielter Wirkung sowie Nachhaltigkeit wurden systematischer in die Vorlagen aufgenommen. Zudem enthalten diese nun einen deutlich stärkeren Fokus auf die lokalen Bedürfnisse. Diese Anpassungen betreffen insbesondere die Vorlagen für Skizzen und Gesuche, Zwischen- und Schlussberichte. Unter anderem bedeutet dies, dass der Bezug zu bestehenden Programmen und Projekten in die Vorlagen integriert wurde, damit eine klare Abgrenzung erfolgt und nach Möglichkeit Synergien geschaffen werden können. Oder dass im Projekt verstärkt Massnahmen für erste Schritte in Richtung Multiplikation und Replikation einzuplanen sind.

Um den Schwierigkeiten bei der Folgefinanzierung entgegen treten zu können, wurde laufend das Netzwerk erweitert und mögliche Lösungsansätze diskutiert. Diese flossen in das individuelle Coaching von Projektierenden ein. Eine Gesamtlösung gibt es für die Vielzahl an Projektansätzen nicht, umso wichtiger sind das Aufrechterhalten dieses Schwerpunktes und die Pflege des Netzwerkes mit Finanzierungsinstitutionen, Förderinstrumenten, erfahrenen Projektierenden und Experten.

Die REPIC-Plattform ist unter den relevanten Akteuren gut bekannt. Sie ist etabliert und spielt im schweizerischen Kontext eine wichtige Rolle. Entsprechend wird die Plattform aktiv genutzt, was sich unter anderem an den seit 2004 insgesamt bereits 98 geförderten Projekten zeigt. Ein wichtiges Element spielen dabei auch die Teilnahme an Tagungen und Workshops und die Organisation von eigenen Veranstaltungen bezüglich relevanten und aktuellen Themen im REPIC-Netzwerk.

Es kann festgestellt werden, dass die Plattform zum Austausch und zur Koordination rege genutzt wird. Die Qualität der Projektförderung wird mit dem zweistufigen Verfahren und den gut begründeten Entscheiden gesichert. Der Kontakt mit den Kooperationsbüros ist im Genehmigungsprozess der REPIC-Projekte integriert, so wird ein intensiverer lokaler Austausch in den Zielländern gesucht und Doppelspurigkeiten mit anderen Programmen oder Projekten konnten vermieden werden. Beschreiben Sie (falls zutreffend) die nationale und die internationale Zusammenarbeit mit Forschungsinstituten, der Privatwirtschaft und weiteren Institutionen sowie die Zusammenarbeit im Rahmen von internationalen Programmen.

## Ausblick 2015

Auch im 2015 werden die Massnahmen in der Projektförderung mit intensiviertem Monitoring und systematischem Erfassen der Erfahrungen aus der Praxis, dem auf den Bedarf zugeschnittenen Coaching und den verstärkten Kommunikationsmassnahmen umgesetzt.

- Die REPIC-Projekte werden verstärkt hinsichtlich deren Relevanz, der Effizienz, der Wirksamkeit, der langfristig erzielten Wirkung, sowie in Bezug auf deren Nachhaltigkeit abgeklärt.
- Um die Projekte weit möglichst in eine eigenständige Folgephase führen zu können, werden diese individuell beraten und mit relevanten Akteuren vernetzt. Mittels Koordinationstreffen und Veranstaltungen wird das Netzwerk weiter ausgebaut, insbesondere mit weiteren Finanzierungspartnern und anderen Initiativen in der Entwicklungszusammenarbeit.
- Massnahmen in der Kommunikation (Website, Presse) sollen diese Coaching-Massnahmen stützen, die Bekanntheit der REPIC-Plattform vergrössern und zu einem zusätzlichen Wissensaustausch unter den Projektierenden führen.

Für 2015 ist erneut eine Veranstaltung vorgesehen, welche Hindernisse in der erfolgreichen Projektumsetzung anspricht und Raum bietet um mit erfahrenen Projektierenden und Experten mögliche Lösungswege zu diskutieren.

## Referenzen / Publikationen

- [1] REPIC Fachveranstaltung vom 4.11.2014 „Erfahrungen aus 10 Jahren REPIC Projekten,, mit einer ersten Projektbörse, Programm
- [2] REPIC Fachveranstaltung vom 4.11.2014 „Erfahrungen aus 10 Jahren REPIC Projekten,, mit einer ersten Projektbörse, Präsentationen
- [3] E4tech, Lausanne, Centre de séchage du bois au Chili, Schlussbericht
- [4] Agape international, Zürich, Energy Efficient Construction in Rural Areas and Cities, Schlussbericht
- [5] IDE-E, Arlesheim, MENA Energy Award Maroc – cycle pilote (2012-2014), Schlussbericht
- [6] Swiss Fresh Water, Lausanne, Système de désalinisation à bas coûts et décentralisé dans le delta du Sine Saloum au Sénégal, Schlussbericht
- [7] SUPSI-ISAAC, Canobbio, PV Grid-Connected Pilot Plant in Nepal, Schlussbericht
- [8] Stiftung Solarenergie, Zürich, Sun Control: Pilotprojekt zum Einsatz verbesserter Technik zur Handhabung und Finanzierung von Solar-Home-Systemen, Schlussbericht
- [9] WaterKiosk Foundation, Zürich, Sustainable Implementation of Solar Thermal Pasteurization Systems in Rural Areas of Bangladesh, Schlussbericht
- [10] SPF, Rapperswil, Solambara, Schlussbericht

Alle Publikationen sind unter <http://www.repic.ch> zu beziehen.