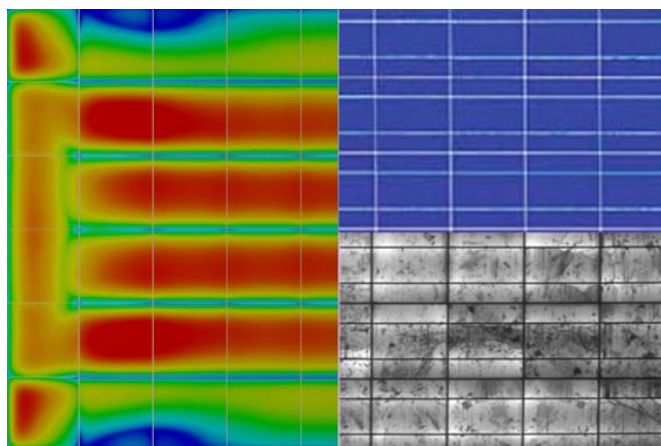


## ANALISI DELLA TECNOLOGIA:

### MODULI FOTOVOLTAICI



Smart  Energy

La presente relazione è stata realizzata nell'ambito del progetto  
»Smart Energy – Network of Excellence, Nr. 5403«,  
Programma Interreg IV Italia– Austria 2007 - 2013.

Progetto co-finanziato dall'Unione europea e dal Fondo europeo per lo sviluppo regionale.

#### Autori:

Dr. Christina Hirschl  
CTR Carinthian Tech Research AG  
Europastraße 4/1  
Technologiepark Villach  
A - 9524 Villach / St. Magdalen





## Indice

1	Motivazioni alla base della ricerca nel settore del fotovoltaico .....	3
2	Struttura base dei moderno moduli fotovoltaici .....	4
3	L'etilene vinil acetato (EVA), materiale di inglobamento delle celle solari .....	5
4	Controllo di qualità dei moduli fotovoltaici .....	7
5	Processi di degenerazione nei moduli fotovoltaici e ruolo del materiale di inglobamento	8
6	Letteratura.....	<b>Fehler! Textmarke nicht definiert.</b>



## 1 MOTIVAZIONI ALLA BASE DELLA RICERCA NEL SETTORE DEL FOTOVOLTAICO

A livello regionale, nazionale e globale, la garanzia di un approvvigionamento continuo mediante energie accessibili per il funzionamento dell'economia come anche per il mantenimento del tessuto di una società moderna è di vitale importanza. Di conseguenza, la sicurezza dell'approvvigionamento energetico sostenibile per l'Europa e per l'Austria rappresenta per la Commissione europea, come anche per il governo austriaco, una sfida centrale per gli anni e i decenni futuri.

Nell'ambito del pacchetto climatico ed energetico UE 2009 (2009/28/CE) è stato concordato un risparmio a livello europeo entro il 2020 pari al 20% del consumo energetico complessivo con contemporaneo incremento della percentuale di energie rinnovabili che prevede il passaggio dall'attuale 8,5% al 20%. In base a questa decisione, la percentuale di energie rinnovabili rispetto al consumo finale di energia lordo in Austria passerà nel 2020 dall'attuale 23% circa a una percentuale minima pari al 34% (2009/28/CE, Allegato 1; Liebel et al. 2009). Partendo dalla percentuale già elevata di energie rinnovabili presenti e dalla disponibilità pubblica ad accettare metodi diversi per la produzione di energia, il maggiore potenziale a disposizione per l'Austria sarà realisticamente attribuito a un maggiore impiego del fotovoltaico (Bliem et al. 2011). Mentre la quantità di corrente prodotta dagli impianti fotovoltaici austriaci nel 2011 ammontava a 174,1 GWh, con un ulteriore ampliamento entro il 2020 sarebbe possibile incrementare la produzione di corrente di un ordine di grandezza superiore a circa 2,7 TWh (Biermayr et al. 2012; Bliem et al. 2011).

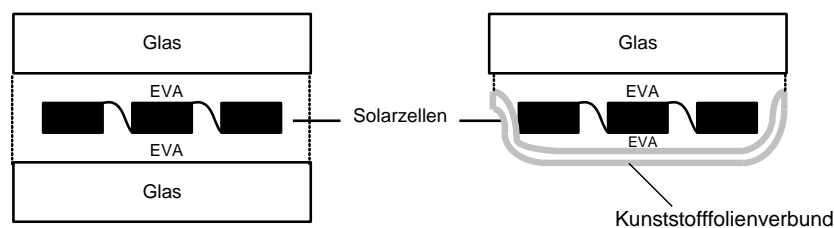
Per risultare accettabile dal punto vista sociale e finanziario, un ampliamento di questo tipo richiederebbe tuttavia necessariamente una migliore commerciabilità della produzione fotovoltaica, ovvero la capacità di produrre energia solare a prezzi competitivi. Ne consegue in particolare la necessità di

- una **riduzione dei costi di produzione e di acquisizione** degli impianti fotovoltaici **mantenendo allo stesso tempo immutati gli standard qualitativi**, ma anche
- un **aumento della durata operativa** degli impianti fotovoltaici per il periodo di produzione della corrente (EPIA et al. 2011).



## 2 STRUTTURA BASE DEI MODERNI MODULI FOTOVOLTAICI

Con una quota di mercato pari all' 85% circa, l'attuale stato dell'arte dominante nell'ambito del fotovoltaico è rappresentato dai moduli a celle solari in silicio cristallino (*Jäger-Waldau 2009*). Il resto del mercato si suddivide in diverse tecnologie a film sottile (a-Si, CdTe, CIS/CIGS) e celle solari organiche. Per l'integrazione delle celle in silicio cristallino nei moduli fotovoltaici esistono due strutture modulari principali: vetro/vetro e vetro/plastica (cfr. Fig. Fig. 2.1).



**Fig. 2.1:** Rappresentazione grafica dell'incapsulamento vetro/vetro (sinistra) e vetro/plastica (destra) nei moduli fotovoltaici (*Plessing, 2003*)

Il lato anteriore in vetro assicura una protezione altamente trasparente alla luce dagli agenti atmosferici, riduce la percentuale di raggi UV del sole e funge da rinforzo meccanico del modulo; il vetro rappresenta in questo senso una barriera praticamente impermeabile. Il lato posteriore, realizzabile a scelta in vetro o in plastica (integrato), combina isolamento termico, stabilizzazione meccanica e protezione dagli agenti atmosferici; indipendentemente dal materiale impiegato, qui è possibile impostare a piacere la diffusione attraverso il lato posteriore (*Klemchuk et al. 1996*).

Nel caso dell'incapsulamento vetro/plastica, il vantaggio è rappresentato dalla maggiore rapidità della procedura di incapsulamento, dal risparmio in termini di peso e dalla conseguente semplificazione del montaggio. Il bordo aperto tra vetro e plastica risulta inoltre inferiore rispetto alla soluzione che si ottiene con l'incapsulamento vetro/vetro. I moduli vetro/vetro rappresentano ancora un mercato di nicchia e vengono impiegati principalmente nell'integrazione degli edifici. Al netto di tali considerazioni, entrambi i sistemi costruttivi necessitano di un materiale di inglobamento che raccordi le celle solari in spessore con il vetro o il film posteriore in plastica. Tale materiale di inglobamento è quindi una componente essenziale dei moduli fotovoltaici.



### **3 L'ETILENE VINIL ACETATO (EVA), MATERIALE DI INGLOBAMENTO PER LE CELLE SOLARI**

Le funzioni principali dei materiali di inglobamento per i moduli fotovoltaici sono il raccordo meccanico - a chiusura ermetica - delle celle solari con il vetro anteriore e il lato posteriore, l'isolamento elettrico dall'ambiente e la protezione fisica delle celle solari dai carichi termomeccanici (Czanderna et al. 1995). A causa di sostanziali differenze nella dilatazione termica dei singoli componenti modulari, nel corso del ciclo termico giorno/notte si formano tensioni residue che possono arrivare persino a causare la rottura delle fragili celle solari. Per evitare questo tipo di danni, il materiale di inglobamento deve essere in grado di compensare a lungo termine i carichi termomeccanici senza comportare la formazione di crepe o delaminazione. Tali requisiti possono essere soddisfatti in maniera ottimale da un elastomero con basso modulo elastico. Sulla base di queste specifiche, alla fine degli anni Settanta Jet Propulsion Laboratory (JPL) ha sviluppato un etilene vinil acetato trasparente e strutturato con percentuale di acetato di vinile pari al 33%, in commercio dal 1981 e che rappresenta, non fosse altro per motivi economici, il materiale attualmente d'elezione per l'inglobamento delle celle solari (Czanderna et al. 1995).

In fase di produzione dei moduli fotovoltaici, le celle solari vengono collocate insieme ai cavi elettrici tra due fogli di etilene vinil acetato termoplastici, a loro volta laminati con il lato anteriore in vetro e il lato posteriore (in vetro o plastica) ad ottenere il modulo finito. Durante la laminazione, il materiale viene fuso e va quindi ad "avvolgere" le celle solari inglobandole. L'iniziale termoplastico etilene vinil acetato acquisisce le caratteristiche elastomeriche mediante reticolazione radicale ottenuta tramite apposito additivo – ad attivazione termica – nel corso della laminazione. L'obiettivo della reticolazione chimica è innanzitutto l'incremento della stabilità termica a temperature  $> 60^{\circ}\text{C}$  che possono verificarsi sul campo. È inoltre solo grazie alla reticolazione che vengono assicurate le caratteristiche termomeccaniche necessarie per l'assorbimento delle tensioni nel materiale senza rottura o delaminazione (basso modulo elastico, elevato ammortizzamento) per un'ampia gamma di temperatura e prolungata durata di funzionamento.

Questo processo di fusione e reticolazione è il fattore critico limitante per la produzione dei moduli e quindi l'elemento primario per l'ottimizzazione temporale ed energetica del processo. La laminazione, che viene eseguita a temperatura pari a circa  $150^{\circ}\text{C}$  a vuoto, può durare, in base al materiale impiegato, fino a 30 minuti per modulo. Per aumentare il flusso e ridurre pertanto i costi di produzione sono stati sviluppati sistemi a reticolazione rapida e ultrarapida (es. Vistasolar® 486, 496 e 520, Etimex Primary Packaging GmbH, D; Photocap® 15295P, 15420P e 15435P, Specialized Technology Resources Inc., USA) che riducono considerevolmente il tempo necessario per portare a termine la lavorazione (Mei et al., 2001). Nel settore industriale vengono oggi adottati di preferenza sistemi di questo tipo.



La caratteristica sostanziale per definire la qualità della laminazione dei moduli fotovoltaici è il cosiddetto grado di reticolazione. Il grado di reticolazione è un parametro quantitativo per la caratterizzazione di reti polimeriche, calcolato come il rapporto tra la quantità di elementi reticolati rispetto alla quantità di elementi presenti in totale in questa rete macromolecolare. Viene espresso come numero adimensionale o sotto forma di percentuale (percentuale di quantità di materia). Il grado di reticolazione dei fogli di etilene vinil acetato nei moduli fotovoltaici in seguito alla laminazione dovrebbe risultare superiore all'80% al fine di garantire una conformità affidabile delle caratteristiche termomeccaniche determinate dal grado di reticolazione ai requisiti di qualità richiesti.

L'interconnessione delle singole celle solari avviene mediante bus bar (collegamenti elettrici tra le celle) che vengono di prevalenza saldati. Negli ultimi anni si è puntato anche sui bus bar incollati che consentono di ridurre le tensioni causate dalle temperature elevate prodotte durante la saldatura. In fase di produzione dei moduli fotovoltaici, le celle solari vengono collocate insieme ai cavi elettrici tra due fogli di inglobamento, a loro volta laminati con il lato anteriore in vetro e il lato posteriore in plastica ad ottenere il modulo finito. Durante la laminazione, il materiale viene fuso e va quindi ad "avvolgere" le celle solari inglobandole. I parametri di processo della laminazione variano in maniera considerevole in base al materiale di inglobamento impiegato. Per questa ragione, in considerazione del materiale utilizzato, è necessario ottimizzare anche il processo di laminazione in termini di pressione, temperatura e successione temporale delle fasi di lavorazione.



CARINTHIAN TECH RESEARCH

## 4 CONTROLLO DI QUALITÀ DEI MODULI FOTOVOLTAICI

La certificazione del tipo di moduli fotovoltaici in base a IEC 61215 e IEC 61646 prevede, tra gli altri, i seguenti test standard per la valutazione dell'invecchiamento dei moduli fotovoltaici e dei componenti modulari: esposizione ai raggi UV, variazioni di temperatura, umidità/gelo, umidità/calore, prova d'urto con grandine e verifica della resistenza meccanica. I citati processi di invecchiamento entrano in gioco spesso anche per la verifica dei materiali. L'esperienza ha dimostrato che nel corso delle verifiche del tipo in base a IEC 61215, solo il 50% circa dei controlli preliminari ha superato con successo il test. Oltre la metà dei tipi di moduli difettosi veniva scartato automaticamente già per danni visibili, come per esempio la formazione critica di bolle, decolorazioni o delaminazioni nel corso dei test climatici (Damp Heat, Thermal Cycling, Humidity Freeze) (*Zamini et al. 2009*). Altri difetti ricorrenti sono le fratture delle celle e dei connettori delle celle causate da tensioni termiche e/o meccaniche nel materiale di inglobamento. Nella maggior parte dei casi tali problemi possono essere ricondotti al processo di laminazione e quindi al materiale di inglobamento. Le cause dei difetti sono spesso parametri di processo errati, materiali e accoppiamento di materiali non corretti, come anche difetti di fabbricazione, dimensionamento errato dei componenti e, non da ultimo, l'utilizzo di componenti difettosi in seguito a controlli carenti delle merci in arrivo. I test effettuati nell'ambito della verifica del tipo assicurano quindi in maniera realistica solo se un modulo fotovoltaico del tipo costruttivo corrispondente funziona correttamente e senza cali di prestazioni all'inizio del rispettivo periodo di impiego; lo stesso non vale tuttavia necessariamente per l'intero periodo di impiego superiore a 25 anni.

Nel corso del funzionamento dei moduli fotovoltaici con celle cristalline si verificano diversi altri processi di degenerazione che potrebbero comportare la riduzione del grado di efficienza. In seguito alla limitata degradazione iniziale, nel corso della vita del modulo si osserva un'ulteriore degradazione progressiva per valori tipici pari allo 0,2 - 0,7% annuale. Nei casi più gravi, i processi di degenerazione possono causare, oltre alla riduzione del grado di efficienza, persino il guasto completo del modulo.



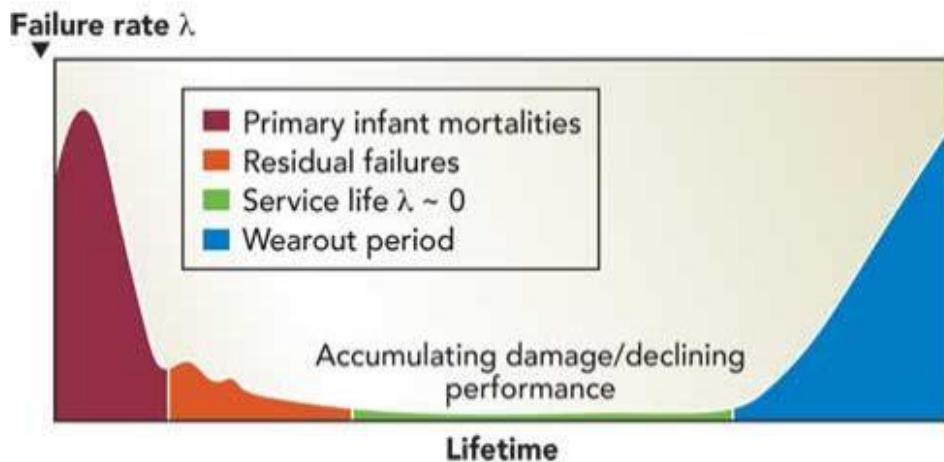


## 5 PROCESSI DI DEGENERAZIONE NEI MODULI FOTOVOLTAICI E RUOLO DEL MATERIALE DI INGLOBAMENTO

I test effettuati nell'ambito della verifica del tipo assicurano in maniera realistica solo se un tipo di modulo fotovoltaico funziona correttamente e senza cali di prestazioni all'inizio del suo periodo di impiego (primary infant mortalities, cfr. Fig. 5.1); lo stesso non vale tuttavia necessariamente per l'intero periodo di impiego superiore a 25 anni.

Nel corso del funzionamento dei moduli fotovoltaici con celle cristalline si verificano diversi altri processi di degenerazione che potrebbero comportare la riduzione del grado di efficienza. In seguito alla limitata degradazione iniziale del grado di efficienza che arriva fino all'1%, nel corso della vita del modulo si osserva un'ulteriore degradazione progressiva per valori tipici pari allo 0,2 - 0,7% annuale. Nei casi più gravi, i processi di degenerazione possono causare, oltre alla riduzione del grado di efficienza, persino il guasto completo del modulo.

Assolutamente indesiderabili sono anche modificazioni visibili del modulo fotovoltaico, come decolorazioni, bolle, delaminazioni, ecc., anche nel caso in cui causino solo cali ridotti in termini di prestazioni, es. per elementi a parete fotovoltaici.



**Fig. 5.1:** Frequenza di irregolarità rispetto a durata di un modulo fotovoltaico (Zielnik 2009; Wohlgemuth 2008)

Le cause di tali degenerazioni sono molteplici. Formazione di sporco o corrosione degli strati di copertura, corrosione delle celle e dei connettori e il decadimento della sigillatura della scatola di connessione possono causare un calo delle prestazioni. I processi di degenerazione in rapporto diretto con il materiale di inglobamento e relativo corretto processo di lavorazione sono la delaminazione e l'ingiallimento dei materiali di inglobamento, come anche la rottura delle celle causata da stress termici e/o meccanici.





Il materiale di inglobamento assume di conseguenza un ruolo centrale per l'affidabilità del modulo fotovoltaico per un periodo di utilizzo superiore a 25 anni. Se, come nella stragrande maggioranza dei casi, viene impiegato l'EVA come materiale di inglobamento, la corretta reticolazione dell'EVA in fase di laminazione del modulo fotovoltaico determina in misura sostanziale la qualità del prodotto, anche in relazione alle primary infant mortalities e alla progressiva degradazione nel corso della durata di impiego.



## 6 LETTERATURA

2009/28/ce: direttiva 2009/28/EG del Parlamento europeo e del Consiglio del 23 aprile 2009 sulla promozione dell'uso dell'energia da fonti rinnovabili, recante modifica e successiva abrogazione delle direttive 2001/77/CE e 2003/30/EG, Gazzetta ufficiale L 140/16, 2009

Biermayr, P., Eberl, M., Ehrig, R., Fechner, H., Kristöfel, C., Eder-Neuhauser, P., Prügler, N., Sonnleitner, A., Strasser, C., Weiss, W., Wörgetter, M., *Innovative Energietechnologien in Österreich – Marktentwicklung 2011: Biomasse, Photovoltaik, Solarthermie und Wärmepumpen*, 2012  
[http://www.nachhaltigwirtschaften.at/nw\\_pdf/1212\\_marktstatistik\\_2011\\_kurzfassung.pdf](http://www.nachhaltigwirtschaften.at/nw_pdf/1212_marktstatistik_2011_kurzfassung.pdf)

Bliem, M., Friedl, B., Balabanov, T., Zielinska, I., *Energy [R]evolution 2050 – Der Weg zu einer sauberen Energie-Zukunft für Österreich*, 2011;  
[http://www.wege-aus-der-krise.at/fileadmin/dateien/downloads/HINTERGRUNDMATERIAL/Studie\\_Energie\\_Devolution\\_2050.pdf](http://www.wege-aus-der-krise.at/fileadmin/dateien/downloads/HINTERGRUNDMATERIAL/Studie_Energie_Devolution_2050.pdf)

Czanderna, A.W., Pern, F.J., *Encapsulation of PV modules using ethylene vinyl acetate copolymer as a pottant: A critical review*, Solar Energy Materials and Solar Cells 43, 101, 1995

EPIA and A.T. Kearney, *Solar Photovoltaics competing in the Energy Sector – On the Road to Competitiveness*, September 2011;  
<http://www.epia.org/publications/epiapublications/solar-photovoltaics-competing-in-the-energy-sector.html>

Jäger-Waldau, A., *PV Status Report 2009: Research, Solar Cell Production and Market Implementation of Photovoltaics*, European Commission, DG Joint Research Centre, Institute for Energy, Renewable Energy Unit, Ispra, 2009

Klemchuk, P., Ezrin, M., Lavigne, G., Holley, W., Galica, J., Agro, S., *Investigation of the degradation and stabilization of EVA-based encapsulant in field-aged solar energy modules*, Polymer Degradation and Stability 55, 347, 1996

Liebel, G., Schuster M., *Erneuerbare Energien 2020: Potentiale und Verwendung in Österreich*, 2009  
[http://www.energiestrategie.at/images/stories/pdf/02\\_bmlfuv\\_09\\_erneuerbare2020.pdf](http://www.energiestrategie.at/images/stories/pdf/02_bmlfuv_09_erneuerbare2020.pdf)

Mei, Z., Pern, F.J., Glick, S.H., *Modified EVA Encapsulant Formulations for Low Temperature Processing*, Proc. „NCPV Program Review Meeting”, Lakewood, USA, 2001

Plessing, A.K., *Einkapselung von Solarzellen*, Proc. Polymeric Solar Materials, (Wallner, G. M. und Lang, R. W., Hrsg.) pp. XII1-XII8, Polymer Competence Center Leoben, 2003

Wohlgemuth J., *Reliability of PV Systems*, Proc. SPIE 7048, 704802-1, 2008

Zamini S., Krametz, Th., Leidl, R., Berger, K., Hribernik, W., *Reliability, Characterisation, and Performance of Photovoltaic Modules*, e&i - Elektronik & Informationstechnik 126/9, 2009

Zielnik, A., *PV Durability and Reliability Issues*, Photovoltaics World Magazine 1(5), 2009