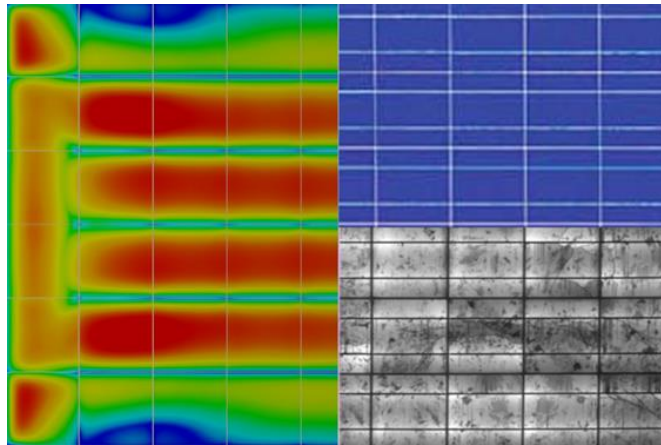


TECHNOLOGIE-ANALYSE: PHOTOVOLTAIK-MODULE



Smart  Energy

Dieser Bericht wurde im Rahmen des folgenden Projektes erstellt:
»Smart Energy – Network of Excellence, Nr. 5403«
Interreg IV Programm Italien – Österreich 2007 – 2013

Mit EU-Mitteln kofinanziertes Projekt,
Europäischer Fonds für regionale Entwicklung

Autor:

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





Inhalt

1	Motivation für Forschung im Bereich Photovoltaik	3
2	Prinzipieller Aufbau moderner PV-Module	4
3	Ethylen/Vinylacetat (EVA) als Solarzellen-Einbettungsmaterial	5
4	Qualitätsprüfung von PV-Modulen	7
5	Degenerationsprozesse in PV-Modulen und die Rolle des Einbettungsmaterials	8
6	Literatur	10



1 MOTIVATION FÜR FORSCHUNG IM BEREICH PHOTOVOLTAIK

Regional, national wie global ist die dauerhafte, zuverlässige Versorgung mit leistbarer Energie für das Funktionieren der Wirtschaft wie auch die Aufrechterhaltung des sozialen Gefüges einer modernen Gesellschaft von essentieller Bedeutung. Folgerichtig zählen für die Europäische Kommission wie auch für die österreichische Bundesregierung die Sicherstellung einer nachhaltigen Energieversorgung für Europa bzw. Österreich zu den zentralen Herausforderungen der kommenden Jahre und Jahrzehnte.

Im Rahmen des EU Klima- und Energiepakets 2009 (2009/28/EG) wurde bis 2020 eine europaweit 20%ige Einsparung des Gesamt-Energieverbrauchs bei gleichzeitiger Erhöhung des Anteils an erneuerbaren Energien von derzeit 8,5% auf 20% vereinbart. Basierend auf diesem Beschluss ist der Anteil erneuerbarer Energien am Brutto-Endenergieverbrauch in Österreich im Jahr 2020 von dzt. ~ 23% auf mindestens 34% zu steigern (2009/28/EG, Anhang 1; Liebel et al. 2009). Ausgehend von dem bereits hohen Anteil erneuerbarer Energiequellen und der öffentlichen Akzeptanzbereitschaft unterschiedlicher Methoden zur Energiegewinnung wird für Österreich der verstärkten Nutzung der Photovoltaik (PV) das größte realistischer Weise erschließbare Potenzial zugeschrieben (Bliem et al. 2011). Während die in österreichischen Photovoltaikanlagen produzierte Strommenge 2011 174,1 GWh betrug, könnte durch einen weiteren Ausbau bis zum Jahr 2020 die Stromproduktion um mehr als eine Größenordnung auf ~ 2,7 TWh gesteigert werden (Biermayr et al. 2012; Bliem et al. 2011).

Um gesellschaftlich und finanziell akzeptabel zu werden, würde ein derartiger Ausbau allerdings zwingend eine verbesserte Marktfähigkeit der photovoltaischen Energieproduktion, d.h. die Fähigkeit, Solar-Strom zu wettbewerbsfähigen Preisen erzeugen zu können, erfordern. Daraus resultiert insbesondere ein Bedarf nach

- einer **Senkung der Produktions- und somit Anschaffungskosten** von PV-Anlagen bei gleichzeitiger **Beibehaltung hoher Qualitätsstandards**, sowie
- eine **Steigerung der operativen Lebensdauer** von PV-Anlagen um den Zeitraum der Stromproduktion zu verlängern (EPIA et al. 2011).



2 PRINZIPIELLER AUFBAU MODERNER PV-MODULE

Mit einem Marktanteil von etwa 85% derzeit vorherrschender Stand der Technik in der Photovoltaik sind Module mit kristallinen Si-Solarzellen (*Jäger-Waldau 2009*). Der Rest des Markts verteilt sich auf verschiedene Dünnschichttechnologien (a-Si, CdTe, CIS/CIGS) und organische Solarzellen. Zur Integration kristalliner Silizium-Zellen in PV-Module existieren dabei zwei vorherrschende Modulaufbauten: Glas/Glas und Glas/Kunststoff (s. Abb. 2.1).

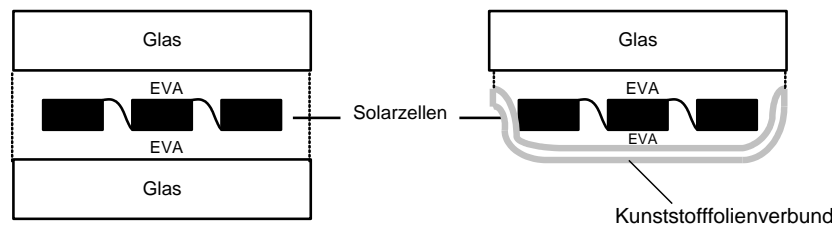


Abb. 2.1: Schematische Darstellung der Glas/Glas- (links) bzw. der Glas/Kunststoff-Einkapselung (rechts) in PV-Modulen (*Plessing, 2003*)

Die Glas-Vorderseite dient als hochgradig lichttransparenter Schutz gegen Umwelteinflüsse, reduziert den UV-Anteil des einfallenden Sonnenlichtes und wirkt als mechanische Verstärkung des Moduls; das Glas stellt dabei eine praktisch impermeable Barriere dar. Die Rückseite, wahlweise aus Glas oder einem Kunststoff(verbund), bewirkt gleichfalls eine elektrische Isolation, eine mechanische Stabilisierung und einen Schutz vor Umwelteinflüssen; abhängig vom eingesetzten Werkstoff kann hier das Diffusionsverhalten durch die Rückwand variabel gestaltet werden (*Klemchuk et al. 1996*).

Bei der Glas/Kunststoff-Einkapselung sind der einfachere und schnellere Einkapselungsprozess, die Gewichtseinsparung und die damit verbundene leichtere Montage von Vorteil. Zudem ist die offene Kante zwischen Glas und Kunststoff kleiner als bei der Glas/Glas-Einkapselung. Glas/Glas-Module stellen jedoch nach wie vor einen Nischenmarkt dar und werden hauptsächlich in der Gebäudeintegration verwendet. Unabhängig davon wird bei beiden Aufbautypen ein Einbettungsmaterial benötigt, das die Solarzellen dicht mit dem Glas bzw. dem rückseitigen Kunststofffolien-Verbund verbindet. Dieses Einbettungsmaterial stellt somit eine essentielle Komponente von PV-Modulen dar.



3 ETHYLEN/VINYLACETAT (EVA) ALS SOLARZELLEN-EINBETTUNGSMATERIAL

Hauptaufgaben von Einbettungsmaterialien für PV-Module sind die – hermetisch dichte – mechanische Verbindung der Solarzellen zum Frontglas und zur Rückseite, die optische Verbindung zum Glas, die elektrische Isolation gegen die Umgebung und ein physikalischer Schutz der Solarzellen vor thermisch-mechanischen Lasten (Czanderna et al. 1995). Aufgrund wesentlicher Unterschiede im Wärmeausdehnungsverhalten der einzelnen Modulkomponenten entstehen durch den Tag/Nacht-Temperaturzyklus Eigenspannungen, die bis zum Bruch der spröden Solarzellen führen können. Um derartige Beschädigungen zu verhindern, muss das Einbettungsmaterial in der Lage sein, diese thermisch-mechanischen Lasten ohne Bildung von Rissen oder Delaminationen dauerhaft auszugleichen. Diese Anforderungen werden am besten von einem Elastomer mit niedrigem E-Modul erreicht. Aufgrund dieser Spezifikationen wurde vom Jet Propulsion Laboratory (JPL) Ende der 1970er Jahre ein transparentes, vernetztes Ethylen/Vinylacetat (EVA) mit einem Vinylacetat (VA) Anteil von 33% entwickelt. Dieses ist kommerziell seit 1981 im Einsatz und stellt – nicht zuletzt aus wirtschaftlichen Gründen – den heutzutage dominierenden Werkstoff für die Einbettung von Solarzellen dar (Czanderna et al. 1995).

Während der Herstellung eines PV-Moduls werden die Solarzellen samt den elektrischen Leitungen zwischen zwei thermoplastische EVA-Folien eingelegt, die wiederum mit der Glas-Vorderseite und der (Glas- oder Kunststoff-)Rückseite zum fertigen Modul laminiert werden. Während der Lamination wird das Einbettmaterial aufgeschmolzen, umfließt so die Solarzellen und kapselt sie damit ein. Die elastomeren Eigenschaften erhält das initial thermoplastische EVA dabei durch radikalische Vernetzung durch ein – wärmeaktiviertes – peroxidisches Vernetzungsmittel im Zuge der Lamination. Ziel dieser chemischen Vernetzung ist dabei zunächst eine Erhöhung der thermischen Stabilität bei Temperaturen $> 60^{\circ}\text{C}$, die im Feld durchaus vorkommen können. Zudem werden erst durch die Vernetzung die für die Aufnahme der Spannungen im Material ohne Zellbruch oder Delamination notwendigen thermo-mechanischen Eigenschaften (niedriger E-Modul, hohe Dämpfung) über einen weiten Temperaturbereich und eine lange Betriebsdauer gewährleistet.

Dieser Schmelz- und Vernetzungsprozess ist der geschwindigkeitsbestimmende Schritt der PV-Modulherstellung, und damit der primäre Anknüpfungspunkt für zeitliche und energetische Prozessoptimierungen. Der Laminiervorgang, der bei Temperaturen um $\sim 150^{\circ}\text{C}$ im Vakuum durchgeführt wird, kann je nach Material bis zu 30 Minuten pro Modul dauern. Zur Erhöhung des Durchsatzes und somit der Minderung der Produktionskosten wurden schnellvernetzende und ultra-schnellvernetzende Systeme entwickelt (z.B. Vistasolar® 486, 496 und 520, Etimex Primary Packaging GmbH, D; Photocap® 15295P, 15420P und 15435P, Specialized Technology Resources Inc., USA), die die Laminierzeit wesentlich verringern (Mei et al., 2001). In der Industrie werden heute derartige Systeme bevorzugt.



Die wesentliche Kenngröße zur Bestimmung der Qualität der Lamination von PV-Modulen ist der sogenannte Vernetzungsgrad. Der Vernetzungsgrad ist ein quantitatives Maß zur Charakterisierung von polymeren Netzwerken, berechnet als Verhältnis der Stoffmenge vernetzter Grundbausteine zur Stoffmenge der insgesamt in diesem makromolekularen Netzwerk vorhandenen Grundbausteine. Er wird entweder als dimensionslose Zahl oder in Prozent(Stoffmengenanteil) angegeben. Der Vernetzungsgrad von EVA-Folien in PV-Modulen nach der Lamination sollte bei $> 80\%$ liegen um sicherzustellen, dass die durch den Vernetzungsgrad bestimmten thermo-mechanischen Eigenschaften die an sie gestellten Qualitätsanforderungen für PV-Module zuverlässig erfüllen.

Die Verschaltung der einzelnen Solarzellen erfolgt mit metallischen Busbars (Zellverbinder), die meist gelötet werden. In den letzten Jahren gehen Bestrebungen auch in Richtung geklebter Busbars, da dadurch die Spannungen, die durch die hohen Temperaturen beim Lötten entstehen, reduziert werden. Während der Herstellung eines PV-Moduls werden die Solarzellen samt den elektrischen Leitungen zwischen zwei Einbettungsfolien eingelegt, die wiederum mit der Glas-Vorderseite und der Kunststoffrückseite zum fertigen Modul laminiert werden. Während der Lamination wird das Einbettungsmaterial aufgeschmolzen, umfließt so die Solarzellen und kapselt sie damit ein. Die Prozessparameter bei der Lamination variieren sehr stark mit dem verwendeten Einbettungsmaterial. Je nach Material muss aus diesem Grund auch der Laminationsprozess bezüglich Druck, Temperatur und zeitlicher Abfolge der Bearbeitungsschritte optimiert werden.



4 QUALITÄTSPRÜFUNG VON PV-MODULEN

Die Bauartzertifizierung von PV Modulen nach IEC 61215 bzw. IEC 61646 schreibt unter anderem folgende Standardtests für Alterungsuntersuchungen von PV-Modulen und Modulkomponenten vor: UV-Prüfung, Temperaturwechselprüfung, Feuchte-Frost-Prüfung, Feuchte-Wärme-Prüfung, Hagelprüfung und eine Prüfung der mechanischen Widerstandsfähigkeit. Die genannten Alterungsverfahren werden dabei auch oft zur Materialprüfung herangezogen. Erfahrungsgemäß bestehen bei den Typprüfungen nach IEC 61215 nur etwa 50% der Erstprüfungen erfolgreich den Test. Mehr als die Hälfte der fehlerhaften Modultypen scheiden allein schon durch sichtbare Schäden, wie etwa kritische Bildung von Blasen, Verfärbungen oder Delaminationen im Zuge der Klimatests (Damp Heat, Thermal Cycling, Humidity Freeze) aus (*Zamini et al. 2009*). Andere häufige Fehler sind Brüche von Zellen und Zellverbindern durch thermische und/oder mechanische Spannungen im Einbettungsmaterial. In den meisten Fällen kann dieses Versagen auf den Laminiervorgang und somit das Einbettmaterial zurückgeführt werden. Ausfallsursachen sind also häufig falsche Prozessparameter, ungünstige Materialien und Materialpaarungen, sowie Fertigungsmängel, fehlerhafte Bauteildimensionierung und nicht zuletzt die Verwendung fehlerhafter Komponenten infolge fehlender Wareneingangskontrolle. Die Tests im Rahmen der Typenprüfung gewährleisten somit realistischer Weise nur, dass ein PV-Modul des entsprechenden Bautyps zu Beginn seiner Gesamt-Einsatzzeit einwandfrei und ohne Performanceverluste funktioniert; dies gilt allerdings nicht zwingend über den gesamten Einsatzzeitraum von 25+ Jahren.

Während des Betriebs von PV-Modulen mit kristallinen Zellen treten diverse weitere Degenerationsprozesse auf, die zu einer Reduktion des Wirkungsgrades führen können. Nach einer geringen Anfangsdegradation des Wirkungsgrades ist eine über die Lebenszeit der Module weiter fortschreitende Degradation von typischerweise 0,2 - 0,7% p.a. zu beobachten. Im schlimmsten Fall können die auftretenden Degenerationsprozesse neben einer Reduktion des Wirkungsgrads sogar den Komplettausfall eines Moduls bewirken.



5 DEGENERATIONSPROZESSE IN PV-MODULEN UND DIE ROLLE DES EINBETTUNGSMATERIALS

Die Tests im Rahmen der Typenprüfung gewährleisten realistischer Weise nur, dass ein PV-Modultyp am Beginn seiner Gesamt-Einsatzzeit (primary infant mortalities, s. Abb. 5.1) einwandfrei und ohne Performanceverluste funktioniert; dies gilt allerdings nicht zwingend über den gesamten Einsatzzeitraum von 25+ Jahren.

Während des weiteren Betriebs von PV-Modulen mit kristallinen Zellen treten diverse Degenerationsprozesse auf, die zu einer Reduktion des Wirkungsgrades führen können. Nach einer Anfangsdegradation des Wirkungsgrades von bis zu einigen Prozent ist eine über die Lebenszeit der Module weiter fortschreitende Degradation von typischerweise 0,2 - 0,7% p.a. zu beobachten. Im schlimmsten Fall können die auftretenden Degenerationsprozesse neben einer Reduktion des Wirkungsgrads sogar einen Komplett-Ausfall von Modulen bewirken. Zudem sind sichtbare Veränderungen am PV-Modul, wie Verfärbungen, Blasen, Delaminierungen, etc., selbst wenn sie nur zu geringen Performanceverlusten führen, z.B. bei PV-Fassadenelementen absolut unerwünscht.

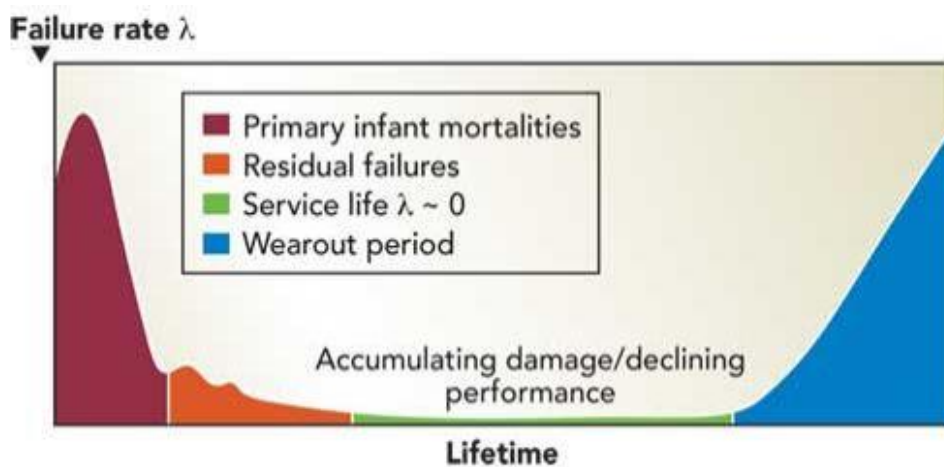


Abb. 5.1: Fehlerhäufigkeit vs. Lebenszeit eines PV-Moduls
(Zielnik 2009; Wohlgemuth 2008)

Die Ursachen für diese Degeneration sind mannigfaltig. So führen u.a. Verschmutzung oder Korrosion der Deckschichten, Korrosion von Zellen und Zellverbindern und ein Versagen der Versiegelung der Anschlussbox zu einem Sinken der Leistung. In direktem Zusammenhang mit dem Einbettmaterial bzw. dessen richtiger Verarbeitung stehende Degenerationsvorgänge sind Delaminationen und Vergilben der Einkapselungsmaterialien sowie Brüche von Zellen durch thermischen und/oder mechanischen Stress.



Dementsprechend spielt das Einbettmaterial eine zentrale Rolle bei der Zuverlässigkeit des PV-Moduls über einen Einsatzzeitraum von 25+ Jahren. Wenn, wie in den meisten Fällen, als Einbettmaterial EVA verwendet wird, definiert somit die richtige Vernetzung von EVA während der Lamination der PV-Module maßgeblich die Produktqualität, sowohl in Bezug auf primary infant mortalities als auch auf die fortschreitende Degradation über die Einsatzdauer.



6 LITERATUR

2009/28/EG: *Richtlinie 2009/28/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. April 2009 zur Förderung der Nutzung von Energie aus erneuerbaren Quellen und zur Änderung und anschließenden Aufhebung der Richtlinien 2001/77/EG und 2003/30/EG*, Amtsblatt L 140/16, 2009

Biermayr, P., Eberl, M., Ehrig, R., Fechner, H., Kristöfel, C., Eder-Neuhauser, P., Prüggl, 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

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

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_bmlfuw_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