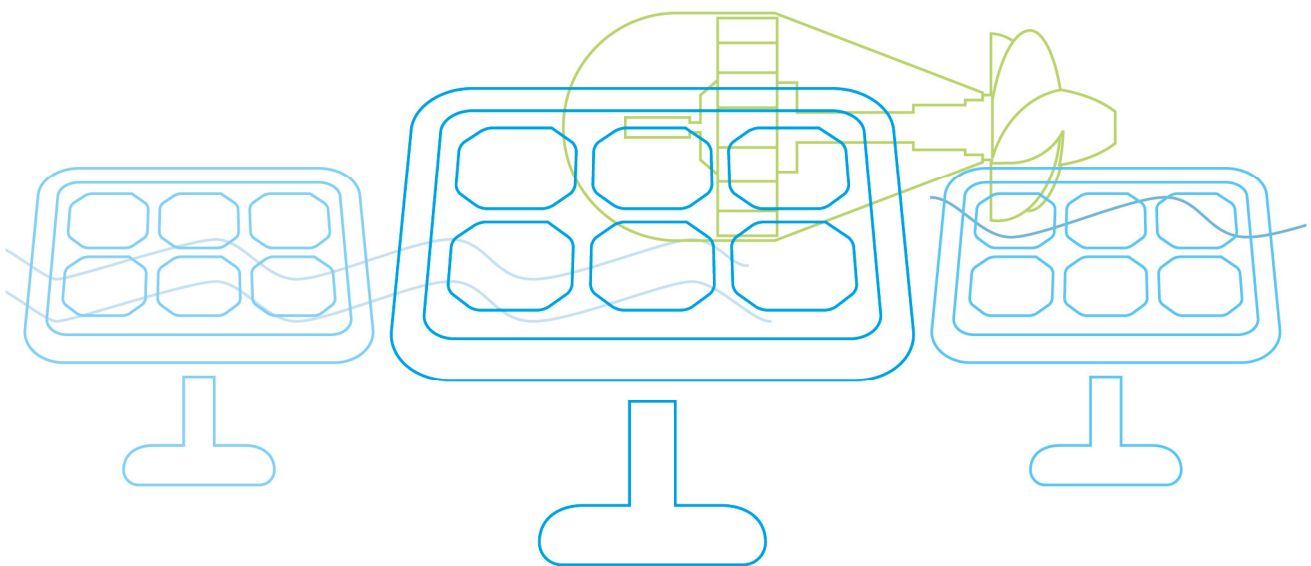




## PV Polymer

Grundlegende Methoden und Untersuchungen zur werkstoffgerechten Entwicklung und Charakterisierung von polymeren Einkapselungsmaterialien für PV Module



## VORWORT

Die Publikationsreihe **BLUE GLOBE REPORT** macht die Kompetenz und Vielfalt, mit der die österreichische Industrie und Forschung für die Lösung der zentralen Zukunftsaufgaben arbeiten, sichtbar. Strategie des Klima- und Energiefonds ist, mit langfristig ausgerichteten Förderprogrammen gezielt Impulse zu setzen. Impulse, die heimischen Unternehmen und Institutionen im internationalen Wettbewerb eine ausgezeichnete Ausgangsposition verschaffen.

Jährlich stehen dem Klima- und Energiefonds bis zu 150 Mio. Euro für die Förderung von nachhaltigen Energie- und Verkehrsprojekten im Sinne des Klimaschutzes zur Verfügung. Mit diesem Geld unterstützt der Klima- und Energiefonds Ideen, Konzepte und Projekte in den Bereichen Forschung, Mobilität und Marktdurchdringung.


Mit dem **BLUE GLOBE REPORT** informiert der Klima- und Energiefonds über Projektergebnisse und unterstützt so die Anwendungen von Innovation in der Praxis. Neben technologischen Innovationen im Energie- und Verkehrsbereich werden gesellschaftliche Fragestellung und wissenschaftliche Grundlagen für politische Planungsprozesse präsentiert. Der **BLUE GLOBE REPORT** wird der interessierten Öffentlichkeit über die Homepage [www.klimafonds.gv.at](http://www.klimafonds.gv.at) zugänglich gemacht und lädt zur kritischen Diskussion ein.

Der vorliegende Bericht dokumentiert die Ergebnisse eines Projekts aus dem Forschungs- und Technologieprogramm „Neue Energien 2020“. Mit diesem Programm verfolgt der Klima- und Energiefonds das Ziel, durch Innovationen und technischen Fortschritt den Übergang zu einem nachhaltigen Energiesystem voranzutreiben.

Wer die nachhaltige Zukunft mitgestalten will, ist bei uns richtig: Der Klima- und Energiefonds fördert innovative Lösungen für die Zukunft!

A stylized, handwritten signature in black ink, consisting of several sweeping, connected strokes.

Ingmar Höbarth  
Geschäftsführer, Klima- und Energiefonds

A handwritten signature in black ink that reads 'Theresia Vogel' in a cursive script.

Theresia Vogel  
Geschäftsführerin, Klima- und Energiefonds

## **2 Einleitung**

### **2.1 Aufgabenstellung**

Die PV Industrie hat in den letzten Jahren ein außerordentlich starkes Wachstum erfahren. Der weltweite Markt für PV-Module wuchs in den letzten Jahren rapide; laut Schätzungen wurden 2010 PV-Module mit einer Leistung von 23 GW produziert, was einer Steigerung um ca. 100% im Vergleich zu 2009 entspricht (s. Abbildung 1, Jäger-Waldau 2011). Dabei wurden ca. 70% der weltweiten PV-Module in Europa installiert, wobei sich dieses starke Marktwachstum vor allem auf die außerordentliche Entwicklung des deutschen und italienischen Marktes zurück-führen lässt, wo 2010 mehr als die Hälfte der weltweit installierten Module in Betrieb gingen. Dieser Trend ist anhaltend; die durchschnittlichen jährlichen Wachstumsraten der europäischen PV-Produktion lagen seit 1999 bei 50%, weltweit lag das Wachstum seit 2003 immer zwischen 40% und 80%, bei Dünnschichttechnologien betrug das durchschnittliche Wachstum sogar mehr als 90% p.a. (Jäger-Waldau 2011). Damit wächst die Photovoltaik wesentlich schneller als die Gesamtwirtschaft, und nur wenige andere Technologien weisen derartige Wachstumsraten auf. Die kumulierte weltweit installierte Leistung betrug 2010 um die 40 GW. Auch in Zukunft ist mit vergleichbaren Wachstumsraten zu rechnen, und bereits für 2012 wird eine weltweite Produktionskapazität von 80 GW prognostiziert.

In Österreich wurden bis Ende 2011 insgesamt 183 MW an PV-Leistung installiert (Biermayr et al. 2012). Allein 2011 wurden etwa 91 MW installiert, was eine Verdoppelung der gesamten vorher installierten Leistung bedeutete. Trotz eines kleinen und instabilen Heimmarktes hat sich die PV-Industrie in Österreich in den letzten Jahren sehr gut entwickelt; derzeit sind in Österreich etwa 2000 Personen in der PV-Industrie und Forschung beschäftigt. In Österreich existieren derzeit 5 nennenswerte Modulhersteller, mit einer geschätzten Gesamtkapazität von 200 MW, und zahlreiche weitere österreichische Unternehmen sind als Zulieferer von Komponenten für PV-Module tätig. In einigen PV-Marktnischen (z.B. Wechselrichter, Rückseitenfolienverbunde, Zellverbinder, Sputtertargets, Dünnglas) befinden sich österreichische Unternehmen in internationalen Spitzenpositionen. Nichtsdestotrotz ist die österreichische PV-Industrie bei Exportraten von > 90% sehr von der Entwicklung des internationalen, vor allem des deutschen Marktes abhängig.

Wenn dieses rasante Wachstum fortgesetzt werden soll, sind zur Erschließung neuer Märkte und Anwendungsbereiche umfangreiche Forschungs- und Technologieentwicklungsaktivitäten erforderlich. Um in Zukunft die Netzparität zu erreichen und damit signifikante Beiträge zum Gesamtstrombedarf beizutragen, ist vor allem eine beträchtliche Kostenreduktion anzustreben. Diese Kostenreduktion lässt sich nicht nur durch verstärkte Massenproduktion und Scale-Up Effekte erreichen, sondern vor allem auch durch Verringerung der Kosten der PV Modul Einkapselung.

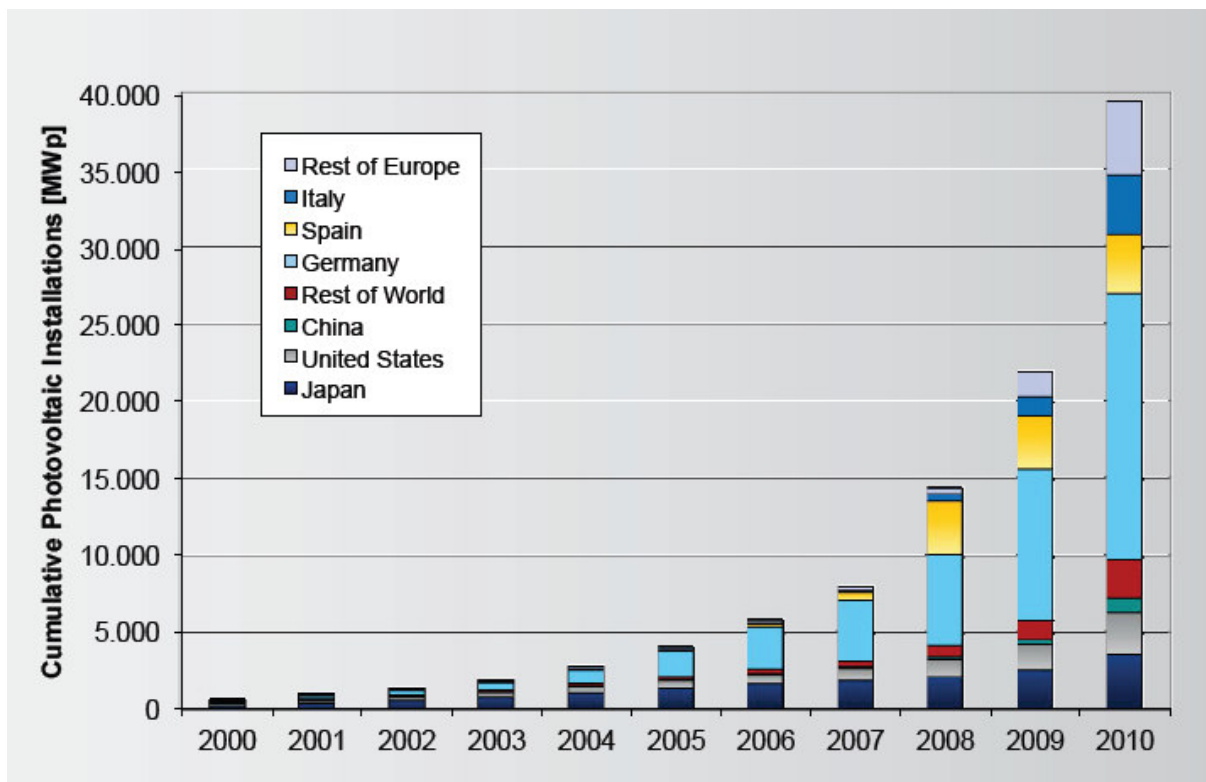


Abbildung 1: Kumulierte weltweite PV Installationen von 2000 bis 2010 (Jäger-Waldau, 2011)

Im Rahmen des Projektes „PV Polymer“ wurden grundlegende Methoden und Untersuchungen zur werkstoffgerechten Entwicklung und Charakterisierung von polymeren Einkapselungsmaterialien ermittelt. Ein Ziel des Projekts war, ein umfassendes Verständnis der Materialeigenschaften von polymeren Einkapselungsmaterialien während dem PV Modulfertigungsprozess zu gewinnen und damit die Grundlage einer werkstoffgerechten Optimierung des PV Modulherstellungsprozesses zu schaffen. Ein weiteres wesentliches Ziel war die Entwicklung und Implementierung von Methoden zum Screening und zur Qualifizierung neuer Materialien für die PV Moduleinkapselung. Schließlich wurde das Langzeitverhalten neuartiger PV Einkapselungsmaterialien untersucht.

Um diese Ziele zu erreichen, wurde in AP1 zuerst eine intensive Literatur und Marktrecherche über polymere PV Einkapselungsmaterialien, ihre Eigenschaftsprofile, relevante Charakterisierungsmethoden und den PV Modulherstellungsprozess durchgeführt und eine Materialauswahl getroffen. Insgesamt wurden für das Projekt sechs alternative Einbettungsfolien von fünf Herstellern, drei EVA Folien von 2 verschiedenen Herstellern und dreizehn Rückseitenlamine von acht Herstellern besorgt und in das Prüfprogramm aufgenommen. Anschließend wurden in Methoden zur Bestimmung der wesentlichen thermischen und thermo-mechanischen Eigenschaften ausgelotet und die geeigneten Parameter und Messmodi definiert. Mit den evaluierten Methoden werden in weiterer Folge chemische und physikalische Änderungen in ausgewählten Einkapselungsmaterialien, die während der Modulherstellung auftreten, charakterisiert und Struktur-Eigenschaftsbeziehungen ermittelt. Anhand dieser Struktur-Eigenschaftsbeziehungen wurden Potentiale zur Prozessoptimierung aufgezeigt und diskutiert.

Für die Qualifizierung neuer PV Einkapselungsmaterialien wurden in AP4 zuerst Anforderungsprofile für Einbett- und Rückseitenfolien ermittelt, daraus Degradationsindikatoren bestimmt und ein Prüfprogramm erstellt. Ausgewählte neuartige Einkapselungsmaterialien wurden künstlich bewittert

und anhand des erstellten Prüfprogramms charakterisiert und das Alterungsverhalten beschrieben. Die ermittelten Kennwerte vor und nach der Alterung wurden mit den Resultaten etablierter Einkapselungsmaterialien verglichen und die Eignung der neuen Materialien für die PV Einkapselung bewertet.

## **2.2 Schwerpunkte des Projektes**

Im Rahmen des Projektes „PV Polymer“ wurden Methoden und Untersuchungen zur werkstoffgerechten Entwicklung und Charakterisierung von polymeren Einkapselungsmaterialien ermittelt und erstellt. Dafür können zwei Hauptziele definiert werden. Ein grundlegendes Ziel des Projekt war es, ein umfassendes Verständnis der Materialeigenschaften von polymeren Einkapselungsmaterialien während dem PV Modulfertigungsprozess zu gewinnen und damit die Grundlage einer werkstoffgerechten Optimierung des PV Modulherstellungsprozesses zu schaffen. Das zweite wesentliche Ziel war die Entwicklung und Implementierung von Methoden zum Screening und zur Qualifizierung neuer Materialien für die PV Moduleinkapselung.

In den einzelnen Arbeitspaketen wurden zusätzliche spezielle Ziele definiert. Ziel von Arbeitspaket 1 war es, einen Überblick über gängige und neuartige polymere PV Einkapselungsmaterialien am Markt sowie über bisherige Forschung zum Thema Charakterisierung von neuartigen PV Einkapselungsmaterialien zu gewinnen. Darüber hinaus wurde Materialauswahl für die weiteren Arbeitspakete getroffen. Die Arbeitspakete 2 und 3 hatten die Entwicklung, Implementierung und Evaluierung von fortschrittlichen Methoden zur Bestimmung und Beschreibung

- chemischer Veränderungen durch Vernetzung im Einbettungsmaterial
- physikalischer Eigenschaften und der Morphologie

während der PV-Modulherstellung zum Ziel. Mit Hilfe dieser Methoden wurden relevante thermische und thermo-mechanische Eigenschaften gemessen und Struktur-Eigenschaftsbeziehungen erstellt, mit dem Ziel, eine Qualifizierung der Materialqualität im Modulherstellungsprozess vom Eingang über die Lagerung, die Fertigung bis zum fertigen Modul zu erreichen. Die so ermittelten Kennwerte und Daten sind Grundlage für eine werkstoffgerechte Optimierung des PV-Modulherstellungsprozesses und dienen als Diskussionsgrundlage für den Einfluss physikalischer Änderungen im Polymer auf bekannte Modulversagensmechanismen wie Delamination oder Zellenbruch.

Ziel von Arbeitspaket 4 war die Entwicklung und Evaluierung von Methoden zum Screening und zur Qualifizierung neuartiger PV Einkapselungsmaterialien. Anhand der Anforderungsprofile für Einbett- und Rückseitenfolien wurden Degradationsindikatoren bestimmt und ein Prüfprogramm erstellt.

Die Untersuchung und Beschreibung des Langzeit- und Alterungsverhaltens unter relevanten Bedingungen neuartiger PV Einkapselungsmaterialien und der Vergleich der Resultate mit erprobten Einkapselungsmaterialien und damit eine Aussage über die Eignung der neuen Materialien für die PV Einkapselung zu treffen, war ebenfalls ein essenzieller Punkt in Arbeitspaket 4.

Anhand des gewonnenen Datenmaterials und der evaluierten Methoden konnten Prozessoptimierungspotentiale und mögliche Versagensmechanismen aufgezeigt werden. Damit wurden Erkenntnisse gewonnen und Tools entwickelt, die sowohl der universitären Forschung als auch der Industrie nutzen und die die Einführung, Erforschung und Erprobung neuartiger polymerer PV Einkapselungsmaterialien beschleunigt.

## 2.3 Einordnung in das Programm

### **Themenpunkt: 3.6.2 PV-Module**

#### **Vorhaben: Optimierung der Modulherstellungsprozesse (Moduleinkapselung).**

In den Arbeitspaketen 2 und 3 soll ein besseres Verständnis der Eigenschaften polymerer PV Einkapselungsmaterialien erreicht werden. Durch Entwicklung und Implementierung fortschrittlicher Charakterisierungsmethoden sollen relevante Materialeigenschaften ermittelt werden und die chemischen und physikalischen Änderungen im Polymer während des Modulfertigungsprozesses untersucht werden. Ein umfassendes Wissen über die relevanten thermischen und thermo-mechanischen Eigenschaften der Einkapselungsmaterialien vor und nach der Modulfertigung ist der Grundstein für eine werkstoffgerechte Prozessoptimierung.

### **Themenpunkt: 3.6.2 PV-Module**

#### **Vorhaben: Langzeitverhalten, Wirkungsgrad, Lebensdauer.**

In Arbeitspaket 4 wird ein Anforderungsprofil für neue Einbettmaterialien und Rückseitenfolien erstellt und praktikable Degradationsindikatoren bestimmt. Neben der Entwicklung eines Verfahrens für Screening und Qualifizierung neuer Materialien für die Einkapselung von PV Modulen ist die Charakterisierung der Materialperformance und des Alterungsverhaltens unter relevanten Bedingungen das wesentliche Ziel von AP4. Das Langzeitverhalten, der Wirkungsgrad und die Lebensdauer eines PV Moduls werden sehr stark von den Materialeigenschaften der eingesetzten Polymere bestimmt. So führen alterungsbedingte Veränderungen im Kunststoff unter anderem zu Vergilbung, Trübung, Versteifung, Versprödung und zu Delaminationen. Ein umfassendes Verständnis des Alterungsverhaltens der eingesetzten Materialien und die Auswirkung auf das Langzeitverhalten des PV Modul ist unerlässlich bei der Weiterentwicklung und Optimierung bereits eingesetzter Werkstoffe sowie der Einführung neuer PV Einkapselungsmaterialien.

## 2.4 Verwendete Methoden

Im gegenständlichen Projekt wurden verschiedene gängigen Charakterisierungsmethoden der Kunststofftechnik angewandt. Die ausgewählten Methoden sind in Tabelle 1 dargestellt.

**Tabelle 1:** Tabellarische Darstellung der grundlegenden Materialeigenschaften und Charakterisierungsmethoden (D1.2).

Methode	Proben	Eigenschaft
<b>IR-ATR Spektroskopie</b>	alle	Chemische Struktur, Alterungsverhalten
<b>UV/Vis/NIR Spektroskopie</b>	alle	Optische Eigenschaften, Alterungsverhalten
<b>Differenzial-Thermokalorimetrie (DSC)</b>	alle	Thermische Eigenschaften, Vernetzungsverhalten, Alterungsverhalten
<b>Dynamisch Mechanische Analyse (DMA)</b>	alle	Thermo-mechanische Eigenschaften, Vernetzungsverhalten, Alterungsverhalten
<b>Zugversuch</b>	alle	Mechanische Eigenschaften, Delaminationseffekte, Alterungsverhalten
<b>Gel Content Analyse</b>	EVA	Vernetzungsverhalten

## 2.5 Aufbau der Arbeit

Das Projekt startete in Arbeitspaket 1 mit einer Marktrecherche über gängige und neuartige Polymere für die PV Moduleinkapselung von PV Modulen. Zusätzlich wurde eine umfassende Literaturrecherche zu polymeren PV Einkapselungsmaterialien mit Fokus auf Eigenschaftsprofile, Alterungsverhalten, Charakterisierungsmethoden und PV Modulherstellungsprozess durchgeführt. Basierend auf diesen Recherchen wurde schlussendlich eine Materialauswahl für die darauf folgenden Arbeitspakete getroffen.

In Arbeitspaket 2 wurden die chemischen Änderungen im Einbettungsmaterial (EVA), die durch die Vernetzungsreaktion während des Modulfertigungsprozesses ausgelöst werden, und deren Auswirkungen auf thermische und thermo-mechanische Eigenschaften untersucht. Im ersten Schritt wurden durch Variation der Vernetzungszeit und -temperatur unterschiedlich vernetzte EVA Folien hergestellt. Im Anschluss sind geeignete thermoanalytische Messmethoden ausgelotet, adaptiert und implementiert sowie die wesentlichen Prüfparameter und Messmodi bestimmt worden. Anhand der ausgewählten Methoden wurden die relevanten thermischen und thermomechanischen Eigenschaften ermittelt. Zusätzlich wurde der Vernetzungsgrad der verschiedenen konditionierten EVA Folien mittels der nasschemischen Gel Content Analyse bestimmt. Die Ergebnisse der thermoanalytischen Methoden sind schlussendlich mit dem aus der Gel Content Analyse bestimmten Vernetzungsgrad korreliert worden. Zur Absicherung wurde die Methode mit Hilfe von unterschiedlichen EVA Typen evaluiert. Anhand der erhaltenen Struktur-Eigenschaftsbeziehungen konnten dann Potentiale zur Prozessoptimierung aufgezeigt und diskutiert werden.

Arbeitspaket 4 behandelte die Qualifizierung neuer PV Einkapselungsmaterialien und die Untersuchung des Langzeitverhaltens ebendieser. Zuerst wurden die grundlegenden Eigenschaften von Einkapselungsmaterialien ermittelt und daraus ein Anforderungsprofil für Einbettmaterialien und

Rückseitenfolien abgeleitet. Anschließend wurden in Übereinstimmung mit dem Anforderungsprofil Degradationsindikatoren bestimmt und ein Prüfprogramm erstellt. An den in Arbeitspaket 1 ausgewählten neuartigen PV Einkapselungsmaterialien wurden verschiedene beschleunigte Bewitterungstests (Damp Heat Test (85°C / 85%RH); Xenon Test (UV, Temperatur, Feuchtigkeit); UV Test (UV, Temperatur, Kondensation) durchgeführt, um den Einfluss der Stressparameter Temperatur, Feuchtigkeit und Ultraviolette Strahlung (UV) auf die relevanten Eigenschaften zu untersuchen. Nach der Auslagerung wurden die ungealterten und gealterten Materialien anhand des erstellten Prüfprogramms charakterisiert und das Alterungsverhalten beschrieben. Die ermittelten Kennwerte vor und nach der Alterung wurden mit den Resultaten gängiger Einkapselungsmaterialien verglichen und die Eignung der neuen Materialien für die PV Einkapselung bewertet.

### **3 Inhaltliche Darstellung**

Für die Einkapselung von Solarzellen wird hauptsächlich chemisch vernetzbares EVA eingesetzt. Während der PV Modullamination wird das Einbettmaterial aufgeschmolzen und umfließt so die Solarzellen und kapselt sie damit ein. Anschließend wird das EVA mit Peroxiden chemisch vernetzt. Dieser Schmelz- und Vernetzungsprozess ist der geschwindigkeitsbestimmende Schritt der PV Modul Herstellung und ist damit der Anknüpfungspunkt für eine zeitliche und energetische Prozessoptimierung. Der Vernetzungsgrad sollte nach der Lamination über 80% liegen, damit die thermo-mechanischen Eigenschaften, die durch den Vernetzungsgrad bestimmt werden, die notwendigen Anforderungen erfüllen. Zwar gibt es einige Veröffentlichungen zu thermischen Eigenschaften von unvernetzten und vernetzten EVA Folien (Agroui et al., 2006 und 2007), ohne aber auf die Qualität und eine mögliche Optimierung des Vernetzungsprozesses Bezug zu nehmen. Aber auch die thermo-mechanischen Eigenschaften von EVA und deren Änderungen während des Vernetzungsprozesses, und damit der direkte Anknüpfungspunkt für eine Prozessoptimierung, wurden bis jetzt noch nicht ausreichend untersucht. Ermittelt wird der Vernetzungsgrad in der Regel mit der „Gel Content“ Analyse, einer apparativ aufwendigen und zeitintensiven nasschemischen Methode. Darin wird der unvernetzte Teil bei erhöhter Temperatur aus dem Polymer gelöst, und das Gewicht des nichtlöslichen Anteils in Relation zum Gesamtgewicht ergibt dann den Vernetzungsgrad. Der angestrebte Vernetzungsgrad von 80% ist mehr ein empirischer Erfahrungswert und basiert nicht auf tatsächlichen thermo-mechanischen Eigenschaftswerten vom Einbettungsmaterial.

Bei der PV Modullamination herrschen je nach eingesetzten Materialien Temperaturen bis zu 170°C. Neben den chemischen Änderungen bei Einsatz von EVA, bewirkt die hohe Temperatur auch physikalische Änderungen im Kunststoff. Rückseitenfolienverbunde werden zum Teil über die Glasübergangstemperaturen der einzelnen Materialien erhitzt, wo es dann aufgrund der höheren Beweglichkeit der Polymerketten zu Morphologieänderungen wie Re-orientierungen und zu Nach- und Umkristallisationen kommen kann (Struik, 1978, Oreski und Wallner, 2005). Physikalisch vernetzende Einbettmaterialien schmelzen während des Modullaminationsprozesses vollständig auf, um die Solarzellen vollständig zu umfließen und einzukapseln. Die Morphologie und damit die thermischen und thermo-mechanischen Eigenschaften (u.a. Dichte, Kristallinität, thermische Ausdehnung, Schrumpf, Steifigkeit) der polymeren Einkapselungsmaterialien hängen sehr stark von den Abkühlbedingungen und zum Teil auch von der Modulgeometrie, welche die Wärmeabfuhr definiert, ab. In einigen Untersuchungen wurde die Veränderung der physikalischen Eigenschaften und der Morphologie von verschiedenen polymeren Einkapselungsmaterialien während beschleunigter Alterungstests beobachtet und beschrieben (Oreski und Wallner; 2005, Oreski und Wallner, 2009a und b). Aber die Veränderungen der Morphologie während der PV Modulherstellung und damit die Möglichkeit der Optimierung bestimmter thermischer und thermo-mechanischer



Eigenschaften der Einbettmaterialien und damit auch des Moduls durch den Abkühlprozess wurden bis jetzt noch nicht untersucht. Auch der Einfluss der physikalischen und morphologischen Veränderungen im Polymer auf Modulversagensmechanismen wie Delamination oder Zellenbruch wurde bis jetzt nur im Ansatz diskutiert (Schulze et al., 2008).

Bevor neue oder weiterentwickelte Materialien in Einsatz kommen, müssen Module mit neuen Komponenten nach IEC 61215 (kristalline Siliziumtechnologie) oder IEC 61646 (Dünnschichttechnologie) zertifiziert werden. Diese Zertifizierung ist überaus zeit- und kostenintensiv und zielt vor allem auf die elektrische Sicherheit der Module vor und nach verschiedenen Belastungstests („Damp Heat Test“, UV, „thermal cycling“) ab. Außerdem sollen diese Normen eine Aussage über Modullebensdauer treffen. Prinzipielle Anforderungsprofile, mit Ausnahme der elektrischen Isolierungseigenschaften von Rückseitenlaminaten („Partial Discharge Test“), sowie Methoden zum Screening und zur Qualifizierung von neuen Materialien sind in der Norm allerdings nicht enthalten. Eine Studie am National Renewable Energy Laboratory (NREL, USA) hat gezeigt, dass die in der Norm angeführten Belastungstests nicht zwingend eine Aussage über die Lebensdauer und das Langzeitverhalten von Modulen und den Einkapselungsmaterialien zulassen (Kempe, 2008).

Über das Langzeitverhalten und die Lebensdauer von Modulen, in denen EVA als Einbettmaterial und PVF-PET-PET als Rückseitenlaminat eingesetzt sind, sowie des Alterungsverhaltens der einzelnen Materialien gibt es zahlreiche Publikationen und mehr als 30-jährige Erfahrungswerte (Czanderna und Pern, 1995; Berman et al., 1995; Pern, 1996; Klemchuk et al., 1996; Pern und Glick, 2000; Oreski und Wallner, 2005; Jorgensen et al., 2006; Kempe et al., 2008; Kempe, 2008). Zu neuartigen Materialien wie physikalisch vernetzende Einbettmaterialien und fluorpolymerfreie Rückseitenlamine gibt es hingegen nur sehr wenige Publikationen und kaum Erfahrungswerte. So wurde im Rahmen des seit 2006 laufenden EU Projektes „A science base on PV performance for increased market transparency and customer confidence: PERFORMANCE“ (Integrated Project im 6. FRP der EU) am Polymer Competence Center Leoben das Alterungsverhalten von verschiedenen Ionomeren und einem fluorpolymerfreien Polyesterverbund untersucht (Oreski und Wallner, 2009a; Oreski und Wallner, 2009b). In einer anderen Studie wurde der Einfluss von UV Strahlung auf die optischen Materialien von verschiedenen Einbettmaterialien untersucht (Kempe, 2008). Eine umfassende Studie des Langzeitverhaltens von neuartigen PV Einkapselungsmaterialien wurde bisher noch nicht publiziert.

## **4 Ergebnisse und Schlussfolgerungen**

Im Zuge des Projektes wurden folgende Haupteckkenntnisse gewonnen:

Für den Einsatz neuer Materialien in PV Modulen müssen Module nach der IEC Norm 61215 zertifiziert werden. Diese Norm dient vor allem einer Überprüfung der Leistung und der erforderlichen elektrischen Sicherheit über die Lebensdauer von 20 Jahren. Für die Qualifizierung neuer Materialien in Bezug auf die für Einbettmaterialien und Rückseitenfolien erforderlichen Eigenschaften sowie der Ermittlung des Alterungsverhaltens und der Lebensdauer ist diese Norm nicht geeignet. Auf Basis der Literaturrecherche und vorangegangenen Arbeiten am PCCL konnte folgendes Anforderungsprofil an Einbettungsmaterialien (s. Tabelle 2) und Rückseitenfolien (S. Tabelle 3) erstellt sowie geeignete Methoden (S. Tabelle 1) zur Bestimmung relevanter Degradationsindikatoren ausgewählt und definiert. Die Tabellen 2 und 3 zeigen das Anforderungsprofil an Einbettungsmaterialien und Rückseitenfolien.

**Tabelle 2:** Notwendige Spezifikation und Anforderungen an das Einbettungsmaterial.

<b>Thermo-mechanische Eigenschaften</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Glasübergangstemperatur &lt; -40°C</li> <li>○ Zug-Modul &lt; 20,7 MPa bei 25°C</li> <li>○ Kein Kriechen bis 90°C</li> </ul>
<b>Optische Eigenschaften</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Totale hemisphärische Lichttransmission durch 2 mm dicke Folie integriert über einen Wellenlängenbereich von 400 nm bis 1100 nm &gt; 90%</li> </ul>
<b>Beständigkeit und Alterungsverhalten</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Keine Hydrolyse bei 80°C, 100% RH</li> <li>○ Keine Trübung bei 80°C und 100% RH</li> <li>○ Kein Abbau aufgrund UV-Absorption bei einer Wellenlänge &gt; 300 nm</li> <li>○ Beständigkeit gegenüber thermischer Oxidation bis 85°C</li> <li>○ Wasserabsorption &lt;0,5 wt % bei 20°C/ 100% RH</li> <li>○ Keine chemischen Reaktionen mit Kupfer bei 90°C</li> <li>○ Keine Abgabe von Geruch und Giftstoffen</li> </ul>
<b>Verarbeitbarkeit</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Verarbeitungstemperatur ≤170°C</li> <li>○ Verarbeitungsdruck &lt; 1 atm</li> <li>○ Ausgezeichnete Haftung gegenüber Glas, Silizium Solarzelle und Backsheet (in der Regel Fluorpolymere und Polyester)</li> </ul>

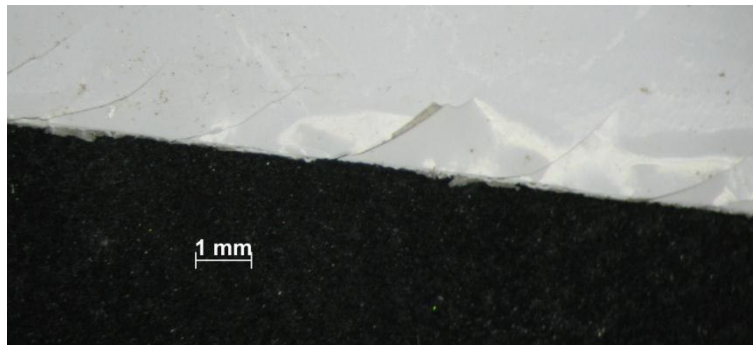
**Tabelle 3:** Notwendige Spezifikation und Anforderungen an das Rückseitenlaminat.

<b>Thermo-mechanische Eigenschaften</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Formstabilität bis Temperaturen ≥ 170°C</li> <li>○ Zug-Modul &gt; 1500 MPa bei 25°C</li> <li>○ Kein Kriechen bis 90°C</li> </ul>
<b>Optische Eigenschaften</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Hoher Reflexionsgrad einen Wellenlängenbereich von 400 nm bis 1100 nm</li> </ul>
<b>Beständigkeit und Alterungsverhalten</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Keine Hydrolyse bei 80°C, 100% RH</li> <li>○ Kein Abbau aufgrund UV-Absorption bei einer Wellenlänge &gt; 300 nm</li> <li>○ Beständigkeit gegenüber thermischer Oxidation bis 85°C</li> <li>○ Wasserabsorption &lt;0,5 wt % bei 20°C/ 100% RH</li> <li>○ Keine Abgabe von Geruch und Giftstoffen</li> <li>○ Keine Delamination des Schichtaufbaus</li> </ul>
<b>Elektrische Eigenschaften</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Hoher Durchschlagswiderstand</li> <li>○ Partial Discharge Test (IEC 60270, IEC 60664-1, IEC 61730-2)</li> </ul>
<b>Barriere Eigenschaften</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Hohe Barrierewirkung gegenüber Sauerstoff und Wasserdampf</li> </ul>
<b>Verarbeitbarkeit</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Ausgezeichnete Haftung gegenüber dem Einbettungsmaterial (in der Regel EVA)</li> <li>○ Muss Verarbeitungstemperaturen bis 170°C standhalten</li> </ul>

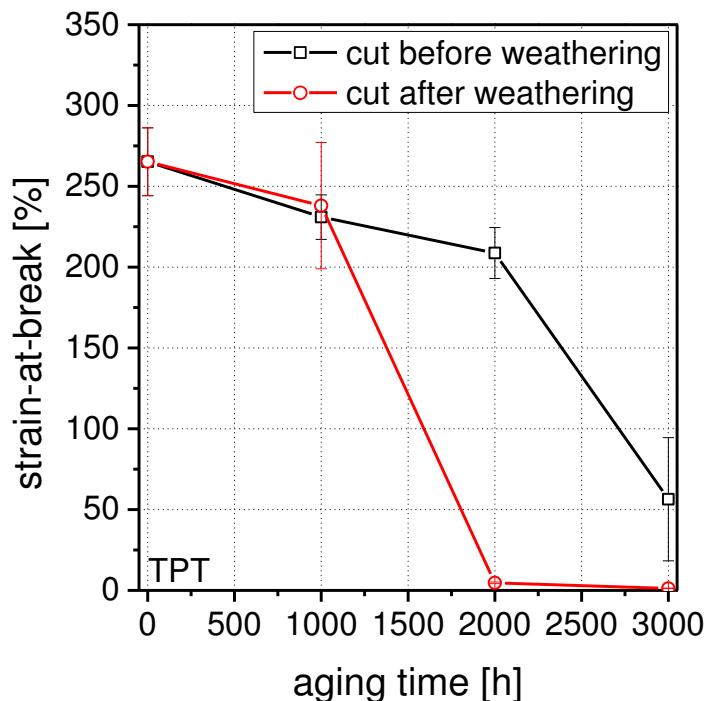
**Dynamisch mechanische Analyse (DMA)** ist eine ausgezeichnete Methode sowohl zur Prozessoptimierung als auch zur Wareneingangsprüfung von Einbettfolien. Die Methode ist sowohl für chemische vernetzende EVA Folien wie auch bei thermoplastischen Materialien verwendbar. So lassen sich bei Messung im Schermodus und der Wahl der richtigen Prüfparameter die thermo-mechanischen Eigenschaften über einen weiten Temperaturbereich sowohl im festen als auch im erweichten, schmelzflüssigen Zustand messen. Anhand der der Schermodul - Temperaturkurve lässt sich damit einerseits der Vernetzungsvorgang von EVA charakterisieren, andererseits den Erweichungspunkt von thermoplastischen Einbettfolien bestimmen. Der Vergleich mit der Gel-Content Analyse zeigte eine ausgezeichnete Korrelation der Ergebnisse. Basierend darauf lassen sich für jeden Werkstoff optimale Prozessparameter – Zeit-Temperatur-Druckprofil – ableiten.

Die Ergebnisse von **Arbeitspaket 4** zeigten, dass Zugversuche die vielseitigste Methode zur Charakterisierung von Alterungserscheinungen sind. Mittels Zugversuche können sowohl chemische als auch physikalische Alterungseffekte bestimmt werden. Zusätzlich lässt sich globaler von lokaler Alterung unterscheiden. Begleitende spektroskopische Methoden wie Infrarot- und UV/Vis/NIR Spektroskopie tragen zur besseren Aufklärung der Alterungsvorgänge bei, sind aber auf chemische Alterungsvorgänge beschränkt. Zusätzlich lässt sich aus den beobachteten Alterungsverläufen keine Korrelation zur Lebensdauer herstellen. Mittels Differenzthermokalorimetrie (DSC) und dynamisch mechanischer Analyse (DMA) lassen sich physikalische Alterungsvorgänge bestimmen. Im Laufe dieses Projektes zeigte sich aber, dass diese Methoden bei Laminaten mit dem Aufbau E-Layer (PE) – PET – Fluorpolymer nur beschränkt einsetzbar sind. Die sogenannten E-Layer bestehen in der Regel aus Polyethylen (PE) oder Polyethylen Copolymeren und dienen der besseren Haftung zwischen Rückseitenfolie und Einbettfolie. Unglücklicherweise überlagert sich der Oxidationsbereich von PE und deren Copolymeren mit dem Schmelzbereich von PET. Somit können Änderungen im Schmelzbereich der PET Lage nicht eindeutig identifiziert werden. Der Schmelzbereich dieser E-Layer liegt je nach Material zwischen 70 und 100°C. Durch die daraus folgende Erweichung können DMA Messungen nur bis zu diesem Temperaturbereich durchgeführt werden, da die Lamine beginnen aus der Einspannung zu rutschen. Dadurch lassen sich Änderungen in den thermo-mechanischen Eigenschaften der PET Mittelschichten oder der Fluorpolymerschichten nicht mehr messen.

Die **Haupterkennnis** von Arbeitspaket 4 ist, dass die **Probenvorbereitung** einen signifikanten Einfluss auf das Alterungsverhalten von Mehrschichtlaminaten hat. Für alle untersuchten Lamine führten unterschiedliche Probekörpergeometrie und Probenvorbereitung zu unterschiedlichen mechanischen Verhalten nach der Auslagerung. So zeigte sich bei allen Proben, die erst nach dem Damp Heat Test zugeschnitten wurden, mit fortschreitender Alterungsdauer eine wesentlich schnellere Abnahme der Bruchdehnungswerte. Dieser Effekt wurde vornehmlich bei Laminaten mit einer dicken PET Mittelschicht beobachtet, nicht aber bei den co-extrudierten Folien. Der Grund hierfür ist die signifikante Hydrolyse der PET Mittelschicht, die in weiterer Folge zu einer starken Versprödung führt. Beim Schneiden der versprödeten Proben bilden sich Risse entlang der Schnittkanten, welche eine nicht mehr zu vernachlässigende Kerbwirkung haben und somit ein frühzeitiges Versagen der Proben im Zugversuch auslösen (siehe Abbildung 2 und 3).



**Abbildung 2:** Schnittkante vom Probekörper, der nach der Dampf Heat Auslagerung zugeschnitten worden sind.



**Abbildung 3:** Bruchdehnungswerte von einem 3-Schicht Laminat mit PET Mittellage in Abhängigkeit der Alterungszeit und Probenvorbereitung

Nach dem Dampf Heat Test konnten für die drei Kategorien in der mechanischen Prüfung unterschiedliche Alterungsvorgänge festgestellt werden. Speziell die Laminare mit PET Mittellage zeigten spezielle Effekte während der mechanischen Prüfung. So zeigten sich bei einigen Materialien bereits nach 2000h Delaminationen an den Kanten. Während der Zugprüfung führte das dann speziell bei THV zu folgenden Verhalten: Zuerst kommt es zu Delamination der einzelnen Schichten von der Kante weg, bis eine Schicht vollständig reißt. Anschließend wird die Zugprüfung bis zum Versagen des Restquerschnittes weitergeführt. In der Regel sind die so gemessenen Bruchdehnungen signifikant höher als beim Versagen des Gesamtlaminats bei früheren Alterungsstufen. Wenn diese Delaminationseffekte nicht berücksichtigt werden entsteht so der Eindruck, dass Alterungseffekte mit fortschreitender Testdauer rückgängig gemacht werden und somit scheinbar die Bewitterungsstabilität steigt.

Bei Verwendung von unterschiedlichen Probekörpergeometrien („dumb bell“, Streifen) zeigten sich klare Unterschiede im mechanischen Verhalten. Interessanterweise ergab sich für alle Laminare mit

PET als Mittelage mit „dumb bell“ Probekörpern ein schnellerer Alterungsverlauf als mit Streifenproben. Zusätzlich traten bei einigen Materialien noch die bereits beschriebenen Delaminationseffekte auf, welche eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu nicht delaminierten Proben unmöglich macht. Interessanterweise zeigte sich bei einem Material eine Abhängigkeit des Auftretens dieser Delaminationseffekte von der Probekörpergeometrie. So kam es bei „dumb bell“ Prüfkörpern schon nach 250h in der Dampf Heat Auslagerung bei allen getesteten Proben zu Delaminationen. Bei den Streifenproben hingegen wurden bis einschließlich 2000h keine Delamination festgestellt.

Daher lassen sich einige **Empfehlungen** für die **Durchführung mechanischer Untersuchungen von Mehrschichtlaminaten** nach **beschleunigten Bewitterungstests** aussprechen. Ziel dieser Empfehlungen ist es, eine Vergleichbarkeit bzw. eine Wiederholbarkeit sicherzustellen und externe Einflüsse auf das Ergebnis so weit wie möglich zu eliminieren:

- Probekörper immer vor der Auslagerung zuschneiden
- Streifenproben sind „dumb bell“ Proben vorzuziehen
  - Schneiden ist genauer als Stanzen
  - Geringere Kerbwirkung durch sauberere Schnittkanten
  - Verstärkte Delaminationseffekte bei „dumb bell“ Geometrie
- Versagensverhalten dokumentieren
  - Delaminationseffekte müssen bei Bewertung der Ergebnisse berücksichtigt werden

Die Ergebnisse von AP4 legten klar offen, dass eine falsche Probenvorbereitung und die Nichtberücksichtigung dieser Faktoren zu falschen Schlüssen bezüglich der Bewitterungsstabilität von Rückseitenlaminaten führen kann.

In Bezug auf die Bestrahlungstests kann aufgrund der Ergebnisse der Untersuchungen in AP4 keine Empfehlung über die Wahl der richtigen Strahlungsquelle (UV Fluoreszenzlampen oder Xenonbogenlampen) gegeben werden. Es zeigte sich, dass die Konditionen laut ISO 4892 nicht für eine Qualifizierung von PV Rückseitenfolien geeignet sind. In beiden Fällen kam es nach 3000h Alterungszeit zu wesentlich geringeren Alterungseffekten als nach dem Dampf Heat Test. Für eine schnellere Qualifizierung neuer Materialien müsste der Test beschleunigt werden, klassisch nach Arrhenius durch höhere Temperaturen, aber auch durch einen höheren permanenten Feuchtigkeitsgehalt. Zu bevorzugen wäre ein Test mit UV Bestrahlung und einer geregelten Temperatur von 80°C und hoher Luftfeuchtigkeit. Leider stößt man damit an die instrumentellen Limits der Bewitterungsgeräte. Wenn man berücksichtigt, dass die Rückseitenfolien nur bei frei aufgestellten Modulen, und dann nur in Abhängigkeit der Umgebungsalbedo maximal 20% der einfallenden UV Strahlung abbekommen, ist der Dampf Heat Test nach wie vor der geeignetste Test für eine schnelle, erste Qualifizierung neuer Materialien und Laminaten. Nichtsdestotrotz müssen Photooxidationseffekte auf jeden Fall untersucht werden. Es bietet sich daher an, neue Materialien und Materialkombinationen zuerst mittels Dampf Heat Test nach vorher definierten Kriterien zu untersuchen und zu reihen und die kostspieligeren Bestrahlungstests erst im Anschluss an ausgewählten Proben durchzuführen.

## 5 Ausblick und Empfehlungen

Basierend auf den Ergebnissen von AP2 und der Kooperation mit dem CTR wurde im Rahmen der 1. Ausschreibung e!MISSION.at (09/2012) vom Österreichischen Klima und Energiefonds ein Projekt

mit dem Titel „Inline Ethylen/Vinylacetat Vernetzungsgradkontrolle in Photovoltaik-Modulen“ genehmigt. Ziel des Projektes EVAnetz ist die Konzeption und folgende experimentelle Validierung einer zerstörungsfreien, inline-fähigen Analysenmethode zur Bestimmung des Vernetzungsgrades der elastomeren Ethylen/Vinylacetat-Einbettung in PV-Modulen. Damit sollen gleichzeitig eine Effizienzsteigerung und Kostensenkung im Herstellungsprozess und eine Optimierung der Produktqualität und Lebensdauer von PV-Modulen ermöglicht werden. Im Rahmen des Projekts werden dazu zunächst etablierte und neue Ansätze zur Analyse untersucht und die Korrelierbarkeit zu bestehenden, nicht inline-fähigen Analysemethoden ermittelt. Basierend darauf soll in Folge ein Analysekonzept entwickelt und in einem Labordemonstrator unter praxisnahen Bedingungen validiert werden.

Ein weiteres, ebenfalls im Rahmen der 1. Ausschreibung e!MISSION.at (09/2012) vom Österreichischen Klima und Energiefonds eingereichtes und mittlerweile genehmigtes Projekt mit dem Titel „Biogene Kunststoffe für solartechnische Applikationen“ basiert zum Teil auf den Ergebnissen von PV Polymer. Das gegenständliche Projekt zielt darauf ab, das Potenzial und die Einsatzmöglichkeiten biogener Kunststoffe, d.h. Kunststoffe welche auf nachwachsenden Rohstoffen basieren und/oder welche biologisch abbaubar sind, als Werkstoffe für Systemkomponenten von Photovoltaik- und Solarthermieranlagen umfassend zu sondieren und auszuloten. Die angestrebten Projektergebnisse sollen die österreichische Technologieführerschaft in der Solartechnik um innovative werkstoffliche Aspekte erweitern und zur Initiierung zukunftsweisender industrieller Forschungsvorhaben in den Bereichen Photovoltaik und Solarthermie dienen.

Speziell im Arbeitspaket 4 sind mit zunehmender Projektdauer viele offene Fragestellungen aufgetaucht, die nicht mehr im Rahmen dieses Projektes abgearbeitet werden konnten. Einige dieser Fragestellungen werden in weiterführenden F&E-Vorhaben (bspw. im Rahmen des K1-COMET-Programms des PCCL) weitergeführt.

## 6 Literaturverzeichnis

*Agroui, K., Koll, B., Collins, G., Salama, M., Hadj Arab, A., Belghachi, A., Douliche, N., Khemici, M.W.* (2008). Characterization of encapsulant materials for photovoltaic solar energy conversion, In Proc: „SPIE - The International Society for Optical Engineering“, Volume 7048, 2008, Article number 70480G

*Agroui, K., Maallemi, A., Boumaour, M., Collins, G., Salama, M.* (2006). Thermal stability of slow and fast cure EVA encapsulant material for photovoltaic module manufacturing process, *Solar Energy Materials and Solar Cells* 90, 2509.

*Agroui, K., Belghachi, A., Collins, G., Farenc, J.* (2007). Quality control of EVA encapsulant in photovoltaic module process and outdoor exposure, *Solar Energy Materials and Solar Cells* 90, 2509.

*Barber, G.D., Jorgensen, G.J., Terwilliger, K., Glick, S.H., Pern, J., McMahon, T.J.* (2002). New Barrier Coating Materials for PV Module Backsheets, In Proc. “29th IEEE PV Specialists Conference“, New Orleans, USA.

*Berman, D., Biryukov, S., Faiman, D.* (1995) *Solar Energy Materials and Solar Cells* 36, 421.

*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)

*Brunisholz, M.J.* (2008) IEA - PVPS Annual Report 2008

*Czanderna, A.W., Pern, F.J.* (1995). *Solar Energy Materials and Solar Cells* 43, 101.

*Jäger-Waldau, A.* (2009) 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 (I)

*Jäger-Waldau, A.* (2012) PV Status Report 2010: Research, Solar Cell Production and Market Implementation of Photovoltaics, European Commission, DG Joint Research Centre, Institute for Energy, Renewable Energy Unit, Ispra (I)

*Jorgensen, G., Terwilliger, K.M., DelCueto, J.A, Glick, M.D., Pankow, J.W., Pern, T.J., McMahon, T.J.* (2006). *Solar Energy Materials and Solar Cells* 90, 2739.

*Jousset, D., Bizet, S.* (2009) New Thermoplastic Encapsulants for Photovoltaic Modules Based on Nano-structured Copolymers, In Proc: 24th European Photovoltaic Solar Energy Conference, 1.CV.3.20, Hamburg, D.

*Kempe, M.D.* (2008) Accelerated UV Test methods for Encapsulants of Photovoltaic Modules, In Proc: 33rd IEEE Photovoltaic Specialists Conference, San Diego, USA.

*Kempe, M.D., Jorgensen, G., Terwilliger, K.M., McMahon, T.J., Kennedy, C.E., Borek, T.* (2007). *Solar Energy Materials and Solar Cells* 91, 315.

*Klemchuk, P., Ezrin, M., Lavigne, G., Holley, W., Galica, J., Agro, S.* (1996). *Polymer Degradation and Stability* 55, 347.

*Koll, B.* (2008). Alternative Verkapselung für Glas-Glas Module. In Pro: "Polymeric Solar Materials", (Wallner, G. M. und Lang, R. W., Hrsg.) pp. XX, Polymer Competence Center Leoben, A.

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

*Muckenhuber, H., Erler, B., Eugen, R., Feichtner, M., Hütter, D., Kraxner, M., Krumlacher, W., Plessing, A., Reininger, A., Ruplitsch, A., Skringer, A., Steiner, A.* (2009) Encapsulation of PV-Modules - New Materials for Efficient Protection, In Proc: 24th European Photovoltaic Solar Energy Conference, 1.CV.3.18, Hamburg, D.

*Oreski, G., Wallner, G.M.* (2005). *Solar Energy* 79, 612.

*Oreski, G., Wallner, G., Randel, P.,* (2008) Characterization of silicon based thermoplastic elastomer for PV encapsulation, In Proc: 23rd European Photovoltaic Solar Energy Conference, 4.AV.3.48, Valencia, E.

*Oreski, G., Wallner, G.* (2009a). Accelerated indoor durability testing of solar cell encapsulation materials, In: 24th European Photovoltaic Solar Energy Conference, 4.AV.3.29, Hamburg, D.

*Oreski, G., Wallner, G.* (2009b). Accelerated indoor durability testing of backsheets laminates for PV encapsulation, In Proc.: 24th European Photovoltaic Solar Energy Conference, 4.AV.3.31, Hamburg, D.

*Pern, F.J.* (1996). *Solar Energy Materials and Solar Cells* 41/42, 587.

*Pern, F.J., Glick, S.H.* (2000). *Solar Energy Materials and Solar Cells* 61, 153.

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

*Roekens, H., Beyer, A.* (2007). *Kunststoffe* 5/2007, 92.

*Schäfer, O., Randel, P.*, (2009) Hybrid Polymers as Thermoplastic Encapsulants for the Efficient Manufacturing of PV Modules, In Proc: 24th European Photovoltaic Solar Energy Conference, 4.AV.3.79, Hamburg, D.

*Schulze, S.H., Dietrich, S., Ebert, M., Bagdahn, J.*, (2008). In Proc: 23th European Photovoltaic Solar Energy Conference, 4.AV.3.43, Valencia, E.

*Struik, L.C.E.* (1978). "Physical aging in amorphous polymers an other materials", Elsevier, Amsterdam.

*WIP*, Catalogue of Exhibitors, 22. und 24. European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Milano (I, 2007) und Hamburg (D, 2009), München.



## IMPRESSUM

### **Verfasser**

Polymer Competence Center Leoben GmbH  
Gernot Oreski  
Roseggerstrasse 12, A-8700 Leoben  
Tel: +43 3842 429 62-0  
E-Mail: [office@pccl.at](mailto:office@pccl.at)  
Web: [www.pccl.at](http://www.pccl.at)

### **Eigentümer, Herausgeber und Medieninhaber**

Klima- und Energiefonds  
Gumpendorfer Straße 5/22  
1060 Wien  
E-Mail: [office@klimafonds.gv.at](mailto:office@klimafonds.gv.at)  
Web: [www.klimafonds.gv.at](http://www.klimafonds.gv.at)

### **Disclaimer**

Die Autoren tragen die alleinige Verantwortung für den Inhalt dieses Berichts. Er spiegelt nicht notwendigerweise die Meinung des Klima- und Energiefonds wider.

Weder der Klima- und Energiefonds noch die Forschungsförderungsgesellschaft (FFG) sind für die Weiternutzung der hier enthaltenen Informationen verantwortlich.

### **Gestaltung des Deckblattes**

ZS communication + art GmbH