

**Programmsteuerung:**

Klima- und Energiefonds

**Programmabwicklung:**

Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH (FFG)

Endbericht

erstellt am

15/06/2015

# EVAnetz- Inline Ethylen/Vinylacetat Vernetzungsgradkontrolle in Photovoltaik- Modulen

Projektnummer: 83865

Ausschreibung	1. Ausschreibung e!MISSION.at
Projektstart	01/04/2013
Projektende	30/06/2015
Gesamtprojektdauer (in Monaten)	27 Monate
ProjektnehmerIn (Institution)	Carinthian Tech Research AG (CTR)
AnsprechpartnerIn	Dr. Christina Hirschl
Postadresse	Europastraße 4/1 Technologiepark Villach A - 9524 Villach / St. Magdalen
Telefon	+43 (0) 4242 56300 – 260
Fax	+43 (0) 4242 56300 – 400
E-Mail	<a href="mailto:christina.hirschl@ctr.at">christina.hirschl@ctr.at</a>
Website	<a href="http://www.ctr.at">http://www.ctr.at</a>

# EVAnetz- Inline Ethylen/Vinylacetat Vernetzungsgradkontrolle in Photovoltaik- Modulen



**AutorInnen:**

Christina Hirschl, Lukas Neumaier, Gernot Oreski

# 1 Inhaltsverzeichnis

1	Inhaltsverzeichnis .....	3
2	Einleitung .....	4
3	Inhaltliche Darstellung.....	7
4	Ergebnisse und Schlussfolgerungen.....	17
5	Ausblick und Empfehlungen.....	17
6	Literaturverzeichnis.....	19
7	Kontaktdaten.....	22

## 2 Einleitung

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. 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. Dazu ist es unabdingbar, dass Photovoltaik (PV) Module 25+ Jahre zuverlässig Strom produzieren. Eine Hauptgefahrenquelle für die Langlebigkeit sind Qualitätsmängel des Einbettungsmaterials in PV-Modulen, welches viele Aufgaben zu erfüllen hat.

Das globale Ziel des Projektes *EVAnetz* ist die Konzeption einer zerstörungsfreien, inline-fähigen Analyse- und Charakterisierungsmethode zur Bestimmung des Vernetzungsgrades der Ethylen/Vinylacetat (EVA) Einkapselung in PV-Modulen. Mittels dieser neuen Methode soll eine Effizienzsteigerung und Kostensenkung im PV-Modul Produktionsprozess, bei gleichzeitiger Garantie von optimaler Produktqualität, bewirkt werden, welche sich in weiterer Folge direkt in einer verlängerten Lebensdauer der PV-Module und geringeren Wirkungsgradeinbußen der Module über die Lebenszeit widerspiegelt.

Das Projekt *EVAnetz* behandelt prioritär den Ausschreibungsschwerpunkt 2 – *Erneuerbare Energien* und in weiterer Folge den Schwerpunkt *Photovoltaik* mit den Subschwerpunkten

- i) *Entwicklung neuer Mess-, Analyse- und Charakterisierungsmethoden,*
- ii) *Optimierung von Modulherstellungsprozessen sowie*
- iii) *Performance- und Lebensdauer-Aspekte.*

Gemäß Ausschreibung *e!Mission.at* wird die Senkung der Kosten für Anschaffung und Betrieb von Photovoltaik-Anlagen als Schlüssel für den zukünftigen Ausbau der Photovoltaik gesehen. Wesentliche Punkte dafür sind effizientere Produktionsverfahren, sowie eine Erhöhung der Lebensdauer von Komponenten. Das Projekt *EVAnetz* zielt mit der Entwicklung eines inline-fähigen Mess-, Analyse- und Charakterisierungsverfahrens für die Bestimmung und Kontrolle des Vernetzungsgrades der elastomeren EVA-Einkapselung in PV-Modulen genau auf diese beiden Ausschreibungsziele ab. Durch das entwickelte inline-fähige Verfahren wird erstmals eine Qualitätskontrolle eines der wesentlichsten Parameter der PV-Modulfertigung direkt in der Produktionslinie ermöglicht. Produktionsmängel können somit sofort identifiziert und behoben werden und der zeitintensive Prozessschritt der Lamination, während dem die EVA-Vernetzung stattfindet, kann darüber hinaus noch zeitlich optimiert werden. Damit liefert das entwickelte Verfahren einen wesentlichen Beitrag zur Optimierung des Modulherstellungsprozesses. Nachdem ein optimaler EVA-Vernetzungsgrad ein entscheidender Faktor für die Langzeitfunktionalität von PV-Modulen ist, adressiert *EVAnetz* damit auch Performance- und

Lebensdauer-Aspekte von PV-Modulen. Darüber hinaus werden die energie-, klima- und technologiepolitischen Vorgaben der österreichischen Bundesregierung durch das Projekt *EVAnetz* wesentlich unterstützt. Das Inline-Kontrollsystem für den EVA-Vernetzungsgrad ermöglicht durch Optimierung der erforderlichen Laminationszeiten eine Erhöhung der Taktraten in der Fertigungsstraße. Damit können PV-Module wettbewerbsfähiger gefertigt und einen Beitrag zur Sicherung des PV-Produktionsstandorts Österreich liefern. Des Weiteren ermöglicht eine Optimierung der Modulqualität eine längere aktive Lebensdauer von PV-Modulen. Dadurch kann die Rentabilität für den Endkunden gesteigert und eine größere Verbreitung erzielt werden. In direkter Folge davon kann der Ausstoß von Treibhaus-Gasen nachhaltig reduziert und damit ein wesentlicher Beitrag zur Erreichung der definierten Klimaziele geleistet werden. Über dies ermöglicht das Projekt den industriellen Partnern die Möglichkeit, ihre Technologieführerschaft auszubauen und zu festigen. Ein neuartiges Analysesystem zur Bestimmung des Vernetzungsgrades versetzt die Partner im Speziellen in die Lage, eine bis jetzt nicht mögliche, flächendeckende Qualitätskontrolle durchzuführen und damit ihre Wettbewerbsfähigkeit zu stärken.

Zum Erreichen der Projektziele von *EVAnetz* wurde das Projekt in verschiedene thematische Teilaufgaben gegliedert und in dem kurzen Projektplan dargestellt (siehe Abbildung 1).

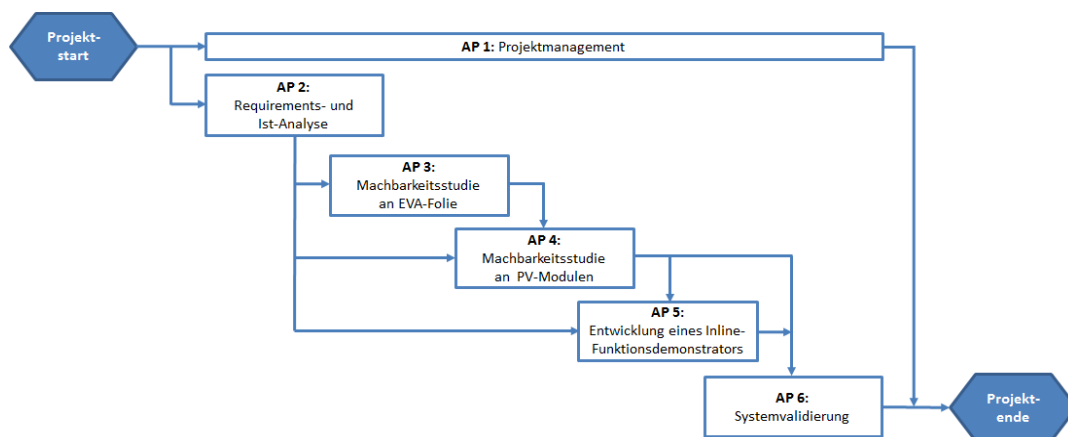


Abbildung 1: Überblick über die wechselseitigen Zusammenhänge der Arbeitspakete von *EVAnetz*

Die gewählte Projektstruktur folgt dem Prinzip eines konsekutiven State-Gate-Prozesses mit Meilensteinen zwischen wesentlichen Projekt-Phasen und einer teilweisen Parallelisierung von Arbeitspaketen. Neben dem Arbeitspaket AP1 *Projektmanagement* gliedert sich *EVAnetz* in fünf weitere technisch-wissenschaftliche Arbeitspakete.

AP2 - *Requirement- und Ist-Analyse* beschäftigte sich zum einen mit der Erstellung eines Lastenhefts im Rahmen welches alle prozess- und materialrelevanten Parameter des PV-Modul-Produktionsprozesses eruiert und auch die geforderten Genauigkeiten und Taktraten des zu konzipierenden inline-tauglichen Analyseverfahrens aufgelistet wurden. Parallel dazu wurden in AP2, basierend auf der vorhandenen Expertise aus Vorprojekten sowie einer Literatur- und Patentrecherche, zerstörende und zerstörungsfreie Methoden zur Bestimmung des Vernetzungsgrades von EVA evaluiert und deren Anwendbarkeit nicht nur an der EVA-Folie, sondern auch am PV-Modul abgeschätzt. Aus diesen Erkenntnissen resultierte dann eine

Materialauswahl für die später verwendeten Prüfkörper sowie eine Methodenvorauswahl zur Vernetzungsgradkontrolle (M2.1). Die in AP2 erarbeitete Spezifikation und Material- und Methodenauswahl diente als Grundlage für die Arbeitspakete AP3 bis AP5.

Basierend auf den Resultaten von AP2 beinhalteten die Arbeitspakete AP3 - *Machbarkeitsstudie an EVA-Folien* und AP4 - *Machbarkeitsstudie an PV-Modulen* genauere Untersuchungen der in AP2 ausgewählten Analysemethoden, um sowohl auf qualitativer als auch auf quantitativer Ebene zu eruieren, welche(s) Verfahren am besten für ein zerstörungsfreies Inline-Analysegerät zur EVA-Vernetzungsgradkontrolle in PV-Modulen geeignet ist/sind.

Nachdem sämtliche Referenz-Analyseverfahren zur EVA-Vernetzungsgradkontrolle (Soxhlet-Extraktion, DSC, DMA) nicht an assemblierten PV-Modulen sondern nur an herausgelösten EVA-Folien durchgeführt werden können, beschäftigte sich AP3 damit, eine Korrelation von neuen zerstörungsfreien Methoden zu den Messparametern dieser Referenzverfahren herzustellen. Zu diesem Zweck wurden zunächst unterschiedlich vernetzte EVA-Probekörper hergestellt. Diese Probekörper wurden in Folge mit Hilfe der verschiedenen, in AP2 ausgewählten Analysemethoden, vermessen, und die Ergebnisse der verschiedenen Methoden anschließend miteinander korreliert. Zusätzlich wurde die Vernetzungshomogenität der EVA-Folien untersucht, um die optimale Anzahl und Position der Messpunkte für die verschiedenen Messverfahren zu ermitteln. Basierend auf den Erkenntnissen aus Messkorrelation und Homogenitätsanalyse wurde eine Erstbewertung der Anwendbarkeit der zerstörungsfreien Analysemethoden für die inline-fähige Bestimmung des Vernetzungsgrades von EVA vorgenommen. Schließlich wurde eine Auswahl der erfolgversprechendsten Ansätze getroffen (M3.1), deren Potential in AP4 in Messungen direkt an PV-Modulen näher untersucht wurde.

Zur qualitativen und quantitativen Bewertung der diversen zerstörungsfreien Analysemethoden zur EVA-Vernetzungsgradkontrolle an PV-Modulen wurden in AP4 zunächst verschiedene Probekörper in Form von PV-Minimodulen mit unterschiedlich vernetzten EVA-Folien, Zelltypen, Bändern und Rückseitenabdeckungen hergestellt. Diese Testmodule wurden im Weiteren mit Hilfe der verschiedenen zerstörungsfreien Analyseverfahren vermessen. Die Variation der oben genannten Material- und Geometrieparameter hatte dabei den Zweck, den Einfluss verschiedener externer Parameter auf das Messergebnis eruieren zu können. Dies erfolgte durch eine Korrelation der Messdaten von AP4 zu den Messergebnissen von AP3. Basierend auf diesen Resultaten wurde im Anschluss eine Auswahl der für ein Inline-Analysesystem geeignetsten Methode getroffen (M4.1).

Mit der in AP4 getroffenen Auswahl der geeignetsten zerstörungsfreien Messmethode sowie der Lastenheftspezifikation von AP2 wurde in AP5 - *Entwicklung eines Inline-Funktionsdemonstrators* ein Konzept für ein inline-fähiges Messsystem zur Bestimmung des EVA-Vernetzungsgrades von PV-Modulen direkt in einer Fertigungslinie erarbeitet (M5.1). Zur Validierung dieses Konzept wurde dieses in einen Labordemonstrator umgesetzt (M5.2).

Nach erfolgtem Funktionsdemonstrator-Aufbau in AP5 zielte AP6 - *Systemvalidierung* auf die Validierung des erarbeiteten Inline-Messkonzepts ab. Zu diesem Zweck wurden mittels des Labordemonstrators zunächst erneut Messungen an den in AP4 gefertigten Mini-Modulen

vorgenommen. Diese Daten wurden mit den entsprechenden Messresultaten von AP4 in Beziehung gesetzt, um eine Systemkalibration durchzuführen und die Messgenauigkeit des Systems zu überprüfen. Das letzte Arbeitspaket AP6 endete mit dem Meilenstein M6.1 - *Validierung des Laborfunktionsdemonstrators*. Das Projekt konnte somit mit der Etablierung aller notwendiger System- und auswertetechnischen Grundlagen zur Entwicklung eines praxistauglichen Systems abgeschlossen werden.

### 3 Inhaltliche Darstellung

Mit einem Marktanteil von etwa 85 % sind der derzeit vorherrschende Stand der Technik Photovoltaik Module mit kristallinen Si-Solarzellen<sup>1</sup>. Zur Integration kristalliner Silizium-Zellen in PV-Module existieren dabei zwei vorherrschende Modulaufbauten: **Glas/Glas und Glas/Kunststoff**.

Die Glas-Vorderseite dient als hochgradig lichttransparenter Schutz gegen Umwelteinflüsse, reduziert den UV-Anteil des einfallenden Sonnenlichtes und wirkt als mechanische Versteifung 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 ebenfalls einen Schutz vor Umwelteinflüssen; abhängig vom eingesetzten Werkstoff kann hier das Diffusionsverhalten durch die Rückwand variabel gestaltet werden<sup>2</sup>.

Unabhängig vom Bautyp wird 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.

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 Einbettungsmaterial 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°C, die im Feld durchaus vorkommen können. Zudem werden erst durch die Vernetzung die für die Aufnahme der Spannungen im Material ohne **Zellbruch** oder **Delaminationen** notwendigen thermo-mechanischen Eigenschaften (niedriger E-Modul, hohe Dämpfung) über einen weiten Temperaturbereich und eine lange Betriebsdauer gewährleistet.

---

<sup>1</sup> 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

<sup>2</sup> 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



Dieser Schmelz- und Vernetzungsprozess ist der geschwindigkeitsbestimmende Schritt in der PV-Modulherstellung, und damit der primäre Anknüpfungspunkt für zeitliche und energetische Prozessoptimierungen. Der Laminationsvorgang, der bei Temperaturen um circa 150°C im Vakuum durchgeführt wird, kann je nach Material bis zu 30 Minuten pro Modul dauern. Zur Erhöhung des Durchsatzes und der Minderung der Produktionskosten wurden schnellvernetzende und ultraschnellvernetzende Systeme entwickelt, welche die Laminationszeit wesentlich verringern. In der Industrie werden heute derartige Systeme bevorzugt.

Aus oben erwähnten Gründen ist der Vernetzungsgrad eine wesentliche Kenngröße zur Bestimmung der Qualität der Lamination von PV-Modulen. Der Vernetzungsgrad von EVA-Folien in PV -Modulen nach der Lamination sollte bei Werten > 80% liegen um sicherzustellen, dass die durch den Vernetzungsgrad bestimmten thermo-mechanischen Eigenschaften die an die PV-Module gestellten Qualitätsanforderungen zuverlässig erfüllen.

Besonders der **Vernetzungsgrad** steht im Verdacht, hauptverantwortlich für viele, während des weiteren Betriebs von PV -Modulen mit kristallinen Zellen, auftretende Degenerationsprozesse, welche bis zu einer Reduktion des Wirkungsgrades führen können, verantwortlich zu sein. In direktem Zusammenhang mit dem Einbettungsmaterial bzw. dessen richtiger Verarbeitung stehende Degenerationsvorgänge sind Delaminationen und Vergilbungen der Einkapselungsmaterialien, sowie Brüche von Zellen durch thermischen und/oder mechanischen Stress.

Dementsprechend spielt das Einbettungsmaterial eine **zentrale Rolle** bei der **Zuverlässigkeit** des PV -Moduls über einen Einsatzzeitraum von 25+ Jahren. Wenn, wie in den meisten Fällen, EVA als Einbettungsmaterial 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.

Die derzeitige, industriell eingesetzte Standardmethode zur Ermittlung des Vernetzungsgrads von EVA ist die Gel-Content-Analyse, auch **Soxhlet-Test** genannt. Die Nachteile dieser Methode sind:

- Die Testdauer beträgt mindestens **24 Stunden**; in dieser Zeit wird im Fehlerfall eine Vielzahl weiterer Module produziert, bevor der Fehler im Ausgangsmaterial bzw. im Laminationsprozess festgestellt werden kann.
- Die Methode ist eine reine Offline-Methode und an eine Probenahme gebunden; der Test ist somit **nicht inline** in die PV-Modul-Produktionslinie integrierbar.
- Der Test gibt **keine Auskunft** über die eigentlichen **thermo-mechanischen Materialeigenschaften** von EVA. Ins besonders ist mittels extraktiver Testmethoden nicht unterscheidbar, ob die Polymerketten ein- oder mehrfach chemisch verbunden (vernetzt) sind; dies hat jedoch in der Praxis einen essentiellen Einfluss auf die physikalisch-mechanischen Eigenschaften und die Langzeitstabilität.



- Der Test setzt als Randbedingung eine **homogene Vernetzung** über die gesamte EVA-Folie voraus, welche jedoch **nur bedingt gewährleistet** ist; das Messergebnis ist somit nur bedingt repräsentativ.
- Der Test stellt ein **zerstörendes Prüfverfahren** dar, das nicht direkt am Modul sondern nur stichprobenmäßig parallel zur Modulproduktion kontrolliert wird. Dementsprechend schließt diese Messmethode eine Option auf Nullfehlerproduktion aus.

Zum Projektstart wurde eine umfassende Patent- und Literaturrecherche durchgeführt, um möglichst viele verschiedene Methoden zur Bestimmung des Vernetzungsgrades zu finden und ein Lastenheft definiert um die Methoden besser bewerten zu können. Diese Methoden wurden im Detail analysiert und bewertet. Neben den Methoden wurden unterschiedliche sich am Markt befindende EVA Typen analysiert und schließlich drei unterschiedliche Materialien ausgewählt die in weitere Folge für die Untersuchungen herangezogen wurden.

Seit 2011/2012 gibt es ein neues Verfahren, welches vom Fraunhofer USA und der Firma *LAYTEC* auf den Markt gebracht worden ist. Die Funktionsweise des Gerätes ist ein **Prüfstempel**, der bei 80°C mit einer definierten Kraft auf die Rückseiten- und EVA Folie aufdrückt und die **Relaxation** des Materials misst. Diese Relaxation steht in direktem Zusammenhang mit dem Vernetzungsgrad. (Patent: WO2012037331A1). Diese Methode ist **nicht** an Glas-Glas Modulen anwendbar und es bestehen starke Zweifel, ob die Temperatur konstant gehalten werden kann und die Messwerte damit zuverlässig sind.

Eine Liste der ausgewählten Methoden ist mit einer Bewertung versehen in Tabelle 1 zu finden. Die verschiedenen Methoden, welche für die Charakterisierung des Vernetzungsgrades von Polymeren angewendet werden, wurden nach ihrer Hauptwirkungsweise unterteilt:

- Physikalisch-chemische Methoden
- Statisch-mechanische Methoden
- Dynamisch-mechanische Methoden
- Sonografische Methoden
- Dielektrische Methoden
- Spektroskopische Methoden

Tabelle 1: Methoden zur Bestimmung des Vernetzungsgrades von EVA und deren Bewertung

Methode	Messgröße	"Analyt"	Korrelations-Qualität	in-line Einsetzbarkeit	Aufwand			Kommentare
					Instrumente	Qualifikation	Zeit	
Soxhlet Extraktion	Gel-Gehalt (Masseabnahme)	Menge der nicht extrahierbaren Substanz	(Referenz-methode)	nein	niedrig	mittel	> 24 h	kalibrationsfreie absolute Methode; schädliche Lösungsmittel involviert
Aufquellen durch Lösungsmittel	Quellfähigkeit (Massezunahme)	Lösungsmittel-aufnahme	gut, aber limitierter Messbereich	nein	niedrig	mittel	~ 3 h	schädliche Lösungsmittel involviert; nicht anwendbar bei schwach vernetztem EVA
Dynamische Differenz-kalorimetrie	Re-Kristallisationsenthalpie	Kristallinität	schlecht	nein	hoch	hoch	~ 1 h	Indirekte Methode basierend auf Ausgangswert des Vernetzers
	Reaktionsenthalpie Vernetzung	Restbetrag des Vernetzers	gut	nein	hoch	hoch	~ 1 h	
Zugprüfung	Elastizitätsmodul	Elastische Charakteristika	unkorreliert angemessen für niedrigere Vernetzungsgrade	nein	hoch	mittel	< ½ h	Optimierung der Methode erforderlich
	Spannung	Visko-elastische Charakteristika		nein	hoch	mittel	< ½ h	
Shore Härte Messung	Härte	Visko-elastische Charakteristika	schlecht	(eventuell)	mittel	niedrig	~ 1 min	Beschädigung der Solarzellen bei Modultests festgestellt; experimentelles Re-Design erforderlich
Dynamisch-Mechanische Analyse	Schermodul	Thermo-visko-elastische Charakteristika	gut	nein	hoch	hoch	~ 1½ h	
	Dämpfungsfaktor	Thermo-visko-elastische Charakteristika	gut	nein	hoch	hoch	~ 1½ h	
UV/Vis Spektroskopie	Transmissions-Spektrum	Opazität, Kristallinität	angemessen	limitiert	mittel	mittel	< 1 min	in-line Transmissions-Spektroskopie begrenzt auf Glas-Glas Module
Mid-IR Spektroskopie	Transmissions-Spektrum	Restbetrag des Vernetzers	gut	nein	hoch	mittel	~ 2 min	Indirekte Methode basierend auf Ausgangswert des Vernetzers
	Abgeschwächtes Totalreflexions-Spektrum	Anzahl der gebildeten Quervernetzungen	angemessen	nein	hoch	mittel	~ 2 min	Relative Methode basierend auf Ausgangswert der Materialkomposition
Raman Spektroskopie	Raman Spektrum	Anzahl der gebildeten Quervernetzungen	gut	voraussichtlich	hoch	mittel	~ 1 min	Relative Methode basierend auf Ausgangswert der Materialkomposition
Vibrometer Messung	Vibrations-Resonanz der EVA-Folie	elastische Charakteristika	gut	nein	hoch	hoch	~ 5 min	Optimierung der Methode erforderlich
	Vibrations-Resonanz des Modules	elastische Charakteristika	unkorreliert	(eventuell)	hoch	hoch	~ ½ h	
Akustische Mikroskopie	Akustische Impedanz	elastische Charakteristika	unkorreliert	nein	hoch	hoch	~ 10 min	Ankopplungsmedium und US Transmitter benötigt
LAYTEC Verfahren	Mikrohärte Messung	Visko-elastische Charakteristika	Gut bei definierter Temperatur	ja	mittel	mittel	~5 min	Temperatur aus Laminator heraus sehr variabel

Das Konsortium war sich darüber einig, dass die Messung in der Fertigungslinie, inline und als 100% Kontrolle mittels mehrerer Stichproben pro Modul erfolgen soll. Des Weiteren wurde der Bereich Modulhandling spezifiziert um sicherzustellen, dass die entwickelte Methode keine anderen Schäden am Modul hervorrufen kann. Das Thema der **Wartungsintervalle wurde ebenso diskutiert**.

Die Machbarkeit an EVA-Folien wurde mit fünf der evaluierten Methoden, an drei verschiedenen EVA Typen mit insgesamt zehn verschiedenen Vernetzungsstärken analysiert und die Ergebnisse miteinander korreliert:

- Soxhlet Extraktion
- Differential Scanning Calorimetry (DSC)
- Zugprüfung
- Dynamisch-Mechanische Analyse (DMA) im Schermodus
- Raman Spektroskopie

Als am **aussichtsreichsten** bei der Analyse der Folien stellte sich die Messmethode **Raman Spektroskopie** heraus. Dort wird mittels eines Labor Raman Mikrokops (Renishaw inVia Raman Microscope) der Spektralbereich der CH<sub>3</sub>/CH<sub>2</sub> Schwingungen untersucht.

Die aufgenommenen Spektren wurden mit unterschiedlichen Auswertemethoden untersucht und ein spezielles Verhältnis (Raman Ratio) der Intensitäten der CH<sub>3</sub>/CH<sub>2</sub> Peaks analysiert. Im Raman Ratio kann bereits der Trend der unterschiedlichen Vernetzung wahrgenommen werden, die Korrelation mit der Referenzmethode Soxhlet ist allerdings noch nicht möglich. Die Umrechnung der Raman Ratio in einen Vernetzungsgrad erfolgt mittels einer Kalibrierung durch Soxhlet Extraktionswerte. Diese Kalibrierung könnte auch genauso gut mittels DSC Messungen erfolgen.

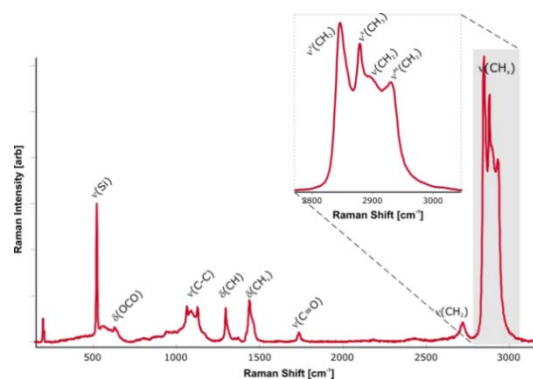


Abbildung 2: Typisches Raman Spektrum einer vernetzten EVA Probe. Das Insert zeigt den Bereich der bei der Auswertung analysiert wird.

Da in der Industrie fast ausschließlich diese Methode zur Qualitätskontrolle verwendet wird, wurde diese Kalibrierung anhand der Soxhlet Extraktionswerte durchgeführt. Die Korrelation ist bereits definiert, wird aber in nächster Zeit jedoch noch Optimierungen unterzogen werden, um eine bessere Abstimmung zu erzielen. Als Beispiel ist für zwei Foliensätze aus unterschiedlichen Laminationszyklen der Raman Vernetzungsgrad in Abbildung 3 dargestellt.

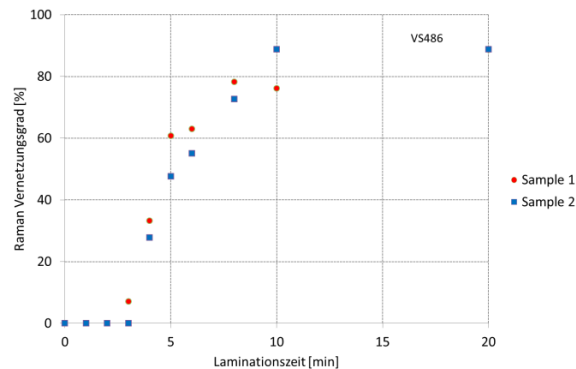


Abbildung 3: Raman Vernetzungsgrad zweier Samples der EVA Folie VS 486.

Des Weiteren wurden aufgrund der Analysen eine Vielzahl zusätzlicher Erkenntnisse über das Material EVA gewonnen. EVA kann durch thermische und UV Belastung **nachvernetzen**. Ist aber die Vernetzungszeit < 5 Minuten kommt es zu **Verfärbungen** an den Bändern. Sind Module am Feld zu schwach vernetzt erfolgt zwar eine Nachvernetzung, aber es kann schon während des nicht optimalen Betriebes zu **Zellbrüchen** und damit zu **Hot Spots** kommen.

Ein wesentliches Nebenprodukt der Untersuchungen war die Erkenntnis, dass bei der Bestimmung des Vernetzungsgrades mittels Soxhlet Extraktion bereits leichte Variationen der Parameter **große Unterschiede** hervorriefen. Verschiedene Institute und Firmen handhaben das Verfahren sehr unterschiedlich und die Norm lässt viele Freiheiten offen. Der initiierte Round Robin Test ergab eine **Messempfehlung** für Soxhlet Extraktion die peer-reviewed in *Solar Energy Materials and Solar Cells* publiziert wurde.

Eine weitere Erkenntnis der Untersuchungen war, dass die Laminationszeit wesentlich verkürzt werden könnte. DMA Untersuchungen deuten an, dass der Vernetzungsprozess nach etwa 5 min zum Großteil vollzogen ist. Danach können in den thermomechanischen Materialparametern keine wesentlichen Änderungen mehr gesehen werden.

Nach dieser umfassenden Analyse an EVA Folien wurden mit denselben drei EVA-Typen Mini Module mit einer Zelle gefertigt und die Vernetzungszeit wiederum variiert. Zusätzlich wurde ein Satz Folien mittels Trennfolie laminiert, um die anderen zerstörenden Verfahren durchführen zu können. Neben den bereits erwähnten Mustern wurden zusätzlich zwei Sätze Glas-Glas Mini Module gefertigt um die Verfahren auch an dieser Modulvariante zu untersuchen.

Dabei wurden wiederum folgende Methoden im Detail evaluiert:

- Raman Spektroskopie
- UV/Vis/NIR Spektroskopie bei Glas-Glas Modulen
- Laytec Verfahren

Aufgrund der Untersuchungen hat sich gezeigt, dass Raman Spektroskopie die am besten geeignete Methode zur inline Bestimmung des Vernetzungsgrades von EVA darstellt. Sowohl für eine

**Wareneingangskontrolle** von EVA (an unvernetzten Folien) als auch für **Vernetzungsgradbestimmungen** an Modulen nach der Lamination konnten aussagekräftige Ergebnisse am **Raman Mikroskop** erzielt werden. Die größte Herausforderung stellen jedoch die Unterschiede der Raman Werte bei unterschiedlicher Vernetzung im unteren Prozentbereich dar.

Aufgrund dieser wissenschaftlichen Ergebnisse, die in diversen Publikationen im Detail vorgestellt wurden, hat sich das Konsortium entschieden einen **Labordemonstrator** mit Raman Spektroskopie als Messmethode zu konstruieren und zu entwickeln (siehe Abbildung 4).

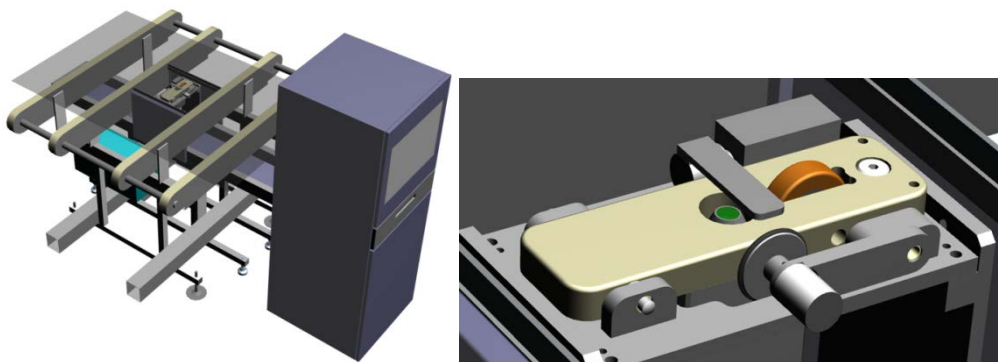


Abbildung 4: Links: Gesamt Design Modul. Die Messanlage ist separat direkt auf eigenen Füßen aufgebaut und kann unter das bestehende Band aufgestellt werden. Rechts: Aufschaubarer Messkopf mit Modulerkennung, Streckenmessung und Raman-Messkopf.

Neben den technischen Details wurden auch die Kosten für ein solches System im Detail geprüft und evaluiert. Im Rahmen des Projektes wurde der Funktionsdemonstrator konstruiert und aufgebaut. In Abbildung 5 sind die einzelnen Bestandteile des Demonstrators dargestellt. Der Demonstrator ist folgendermaßen aufgebaut: Er besteht aus der zentralen Einheit PC (3), auf dem die, mit der Entwicklungsumgebung *LabView* entwickelte Software, läuft. Diese Software steuert den Laser (5) und erhält vom Spektrometer (4) die Messdaten. Des Weiteren erhält diese verschiedenste Sensordaten (Temperatur, Modulposition, Modulnummer, ...) vom Messkopf (1) über das Daten-Rack (2).

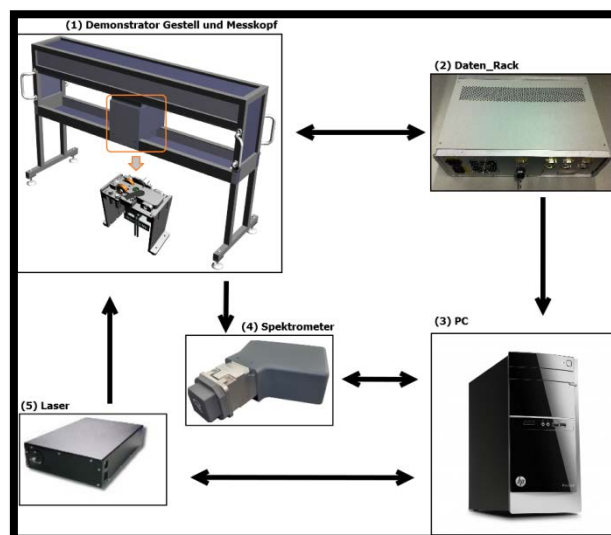


Abbildung 5: Komponenten des Demonstrators

Der Funktionsdemonstrator wurde zuerst im Labor bei der CTR aufgebaut und betrieben, um unter Laborbedingungen mit dem Industrie-Ramangerät Erfahrungen beim Messen zu sammeln, bevor Einflüsse durch die Fertigungslinienbedingungen dazu kamen. In Abbildung 6 ist der Aufbau des Demonstrators im Labor gezeigt.



Abbildung 6: Aufbau Raman Messkopf mit Abstandshalterung

Auch die Einhausung wurde laut Plan aufgebaut. Diese besteht aus verstellbaren Füßen zur Anpassung an die Förderbandhöhe.



Abbildung 7: Einhausung des Demonstrators

Um einen effizienten Betrieb der Soft- und Hardware zu ermöglichen wurde in LabView eine Steuerung entwickelt und implementiert (Abbildung 8).



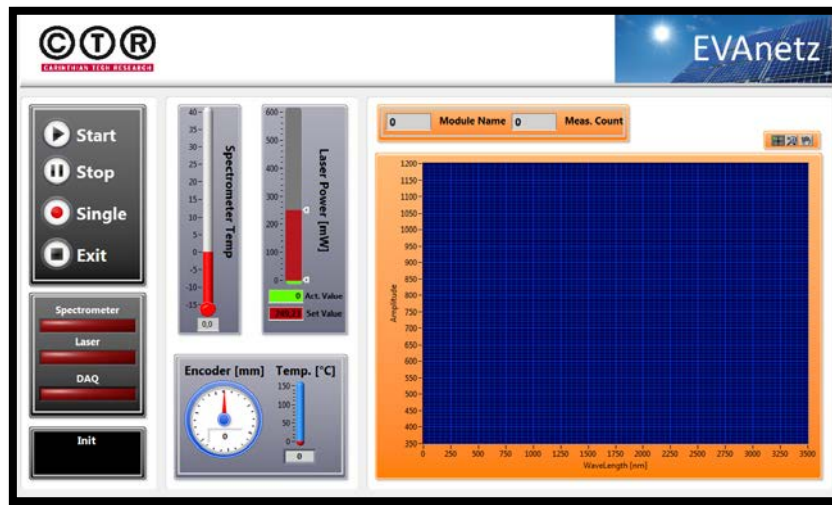


Abbildung 8: Software Frontpanel

Zusammenfassend stellt die folgende Abbildung 9 die bereits in einen Raman Vernetzungsgrad umgerechneten Ergebnisse im Vergleich zu den Soxhlet Ergebnissen dar.

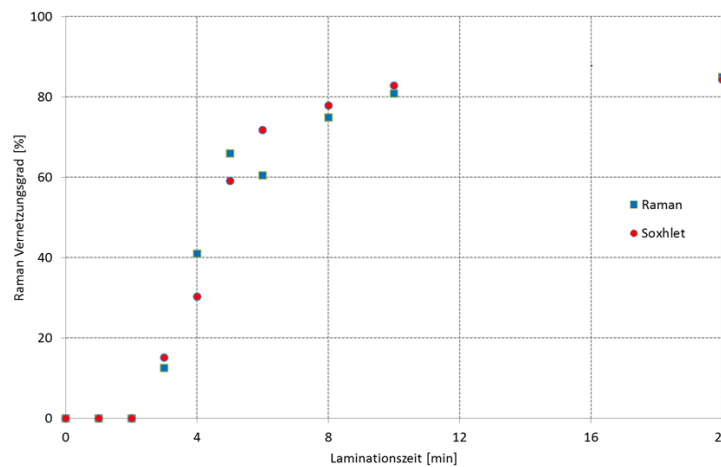


Abbildung 9: Korrelation Soxhlet-Raman Vernetzungsgrad; STR15580 Modulsatz

Nach der Validierung der Messergebnisse im Labor wurde der Funktionsdemonstrator zu *KIOTO Photovoltaics GmbH* transportiert und dort drei Tage auf der Modullinie betrieben (siehe Abbildung 10). Das Modul wird in den Demonstrator gefördert und detektiert. Der Messablauf beginnt mit Öffnen des Shutters und simultaner Temperaturmessung sowie Wegzählung zur Positionsbestimmung. Das Modul bewegt sich weiter, durch die Laseranregung wird am Laminat das Ramansignal als Antwort aufgenommen und an das Spektrometer weitergegeben. Nach dem Durchlaufen des Laminats schließt der Shutter wieder und der Counter zählt eine Stelle weiter. Alle gemessenen Daten werden als Textstring gespeichert.



Abbildung 10: Modul bei der Vermessung - Laminat kommt, wird vermessen und fährt weiter ohne angehalten zu werden.

Die Konstruktionsweise des Demonstrators ermöglicht ein nachträgliches Integrieren an einer beliebigen Stelle am Förderband, ohne in den laufenden Betrieb einzugreifen. Anzumerken ist hier jedoch, dass der Standort des Messsystems an einer Stelle erfolgen sollte, an welcher die Module bereits auf Raumtemperatur abgekühlt sind (zumindest unter 40°C), um etwaige Einflüsse durch erhöhte Temperaturen zu vermeiden und das jeweilige Modul in seinem Endzustand zu vermessen. Die gefertigten PV-Module laufen mit eingestellter Geschwindigkeit über das Förderband und den darin integrierten Demonstrator. Zur Stabilisierung und Einstellung des Fokus des Messsystems dient eine Rollenkonstruktion. Die Systemsteuerung und die Auswertung der Spektraldaten erfolgt automatisiert mittels *LABVIEW* und *MATLAB*.

Die folgende Abbildung 11 zeigt, dass bei Messungen mit dem Demonstrator sowohl in der Linie als auch im Labor mit dem Ramanmikroskop vergleichbare Ergebnisse erzielt wurden. Damit konnte die Funktionstüchtigkeit des Messkonzeptes gezeigt werden. Der nächste Schritt könnte damit eine Produktentwicklung sein, die im Anschluss an das Projekt *EVAnetz* von dem Projektpartner *GP Solar GmbH* gestartet werden wird.

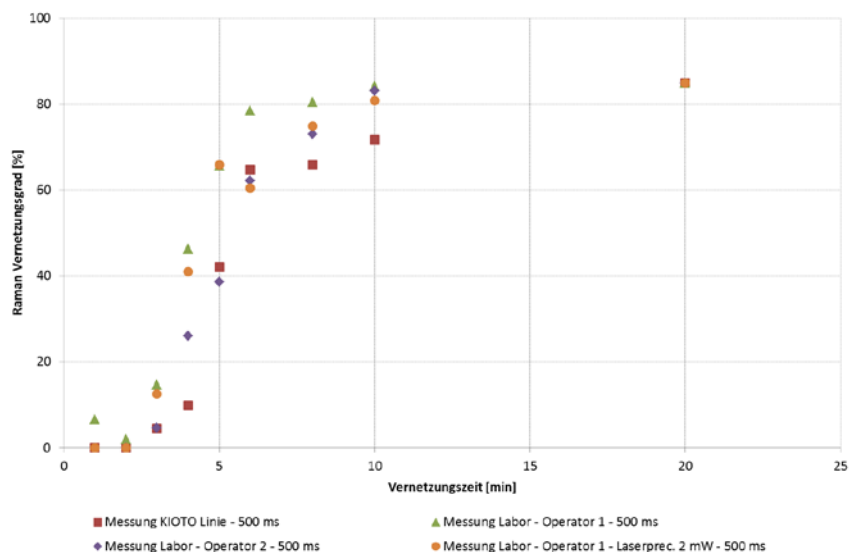


Abbildung 11: Raman Vernetzungsgrad für verschiedene Messserien im Labor und in der Modulfertigungslinie

## 4 Ergebnisse und Schlussfolgerungen

Im Rahmen des Projektes *EVAnetz* sollte eine optimale Lösung zur **100 % inline Vernetzungsgradkontrolle** von PV-Modulen gefunden werden. Um dieses übergeordnete Ziel zu erfüllen wurde mit einer Suche nach unterschiedlichen Methoden begonnen. Es wurde **12 Methoden** analysiert und evaluiert, die teilweise aus anderen Polymerbranchen, Patentideen und Eigeninitiative entstanden sind. Diese Methoden wurden an drei verschiedenen, unterschiedlich vernetzten EVA Materialien untersucht.

Im Projekt *EVAnetz* konnte schlussendlich die am besten geeignete Methode zur 100% inline Vernetzungsgradkontrolle von Photovoltaik Modulen **unabhängig** von der Art der Module (Glas-Glas und Glas-Folie) evaluiert und in einem **Demonstrator** umgesetzt werden. Die Ergebnisse aus diesem Projekt werden von den Projektpartnern jetzt in einer **Produktentwicklung** weitergeführt und in 1-2 Jahren soll ein entsprechendes Produkt am Markt eingeführt werden. Damit konnte ein entscheidender Schritt in Richtung **nachhaltige PV-Qualitätskontrolle** unternommen werden. Neben der Entwicklung eines Messprinzipes zur Vernetzungsgradkontrolle konnten viele wichtige Erkenntnisse im Bereich Einbettungsmaterialien gewonnen werden.

Die Methode, die dem Konsortium am besten geeignet schien, war eine Qualitätskontrolle mittels Raman Spektroskopie, wobei eine der entscheidenden Herausforderungen die Integration eines Industrie-Ramangerätes darstellte. Entscheidend neben der industriellen Robustheit war die **Wirtschaftlichkeit**. Das System sollte ohne Stehzeiten in eine Modullinie integrierbar und möglichst universell verwendbar sein. Diese doch sehr anspruchsvollen Vorgaben konnte mit Hilfe eines Spektrometers, das genau auf die Anwendung adaptiert war, umgesetzt werden. Neben diesem Hauptziel konnte zusätzlich viel Knowhow über die untersuchten Materialien und den Vernetzungsprozess entwickelt werden. Des Weiteren wurde die Standard Analyse Methode Soxhlet Extraktion maßgeblich verbessert, mit Hilfe eines **europäischen Round Robin** Tests evaluiert und in der wissenschaftlichen Gemeinschaft diskutiert. Diese Ergebnisse werden eine Grundlage für künftige **Normungsbestrebungen** darstellen. Durch die wissenschaftlichen Erkenntnisse konnten viele Verbesserungsmöglichkeiten im Laminationsprozess aufgezeigt werden, besonders im Bereich **Laminationszeitverkürzung, Prozessoptimierung** und **Materialoptimierung**.

Damit wurden die drei wesentlichen Ziele im Projekt erfolgreich adressiert und umgesetzt:

- Korrelation von Messverfahren zur Vernetzungsgradbestimmung an EVA-Folien
- Untersuchung zerstörungsfreier Messverfahren zur Vernetzungsgradbestimmung direkt an PV-Modulen
- Konzeption eines inline-tauglichen Messsystems und Validation mittels Labor-Demonstrator

## 5 Ausblick und Empfehlungen

Im Rahmen des Projektes *EVAnetz* wurde neben einer Vielzahl an wissenschaftlich hochwertigen Ergebnissen die Grundlage zur Produktentwicklung eines Gerätes der inline Vernetzungsgradkontrolle von PV-Modulen gelegt. Es konnte im Rahmen des Projektes gezeigt werden, dass die inline Qualitätskontrolle mittels Raman Spektroskopie am besten geeignet ist und eine höchst effiziente

Methode darstellt um eine 100% Kontrolle an PV-Modulen in einer Fertigungslinie durchzuführen. Der Projektpartner *GP Solar GmbH* plant gemeinsam mit dem Hersteller des Raman-Gerätes *Tornado Spectral System* das Gerät nun zu **entwickeln**, zu **industrialisieren** und in ihr bestehendes Qualitätskontrollgerät mit Elektrolumineszenz und visueller Inspektion zu inkludieren. Der Modulproduzent *KIOTO Photovoltaics GmbH* war damit der **erste** der einen solchen Demonstrator auf seiner Fertigungslinie testen durfte und wird durch das Projekt auch weiterhin mit *GP Solar GmbH* in engem Kontakt bleiben, um möglichst schnell ein fertiges Gerät zum Einsatz zu bringen und damit eine **Vorreiterrolle** am Solarmarkt einnehmen zu können.

Im Rahmen des Projektes *EVAnetz* haben alle Projektpartner einen großen Nutzen mit einer Vielzahl an Verwertungsansätzen gezogen. Der Konsortiumspartner *GP Solar GmbH* wird die entstandenen Konzepte und die Grundlagen für die Vernetzungsgradkontrolle mittels Raman Spektroskopie dafür einsetzen um eine Produktentwicklung für ein **universelles Inspektionsgerät** für PV-Modulfertigungslinien voranzutreiben. Die *KIOTO Photovoltaics GmbH* wird das entstandene Gerät im Anschluss auf ihrer Fertigungslinie einbauen können und damit zu den ersten gehören, die eine Inline-Vernetzungsgradkontrolle betreiben. Zusätzlich wird sie die Erkenntnisse im Bereich Prozessoptimierung und Soxhlet Extraktion nutzen. Besonders im Bereich **Reklamationen** ist das generierte Wissen von enormem Wert.

In den letzten Jahren hat der PV-Markt ein durchschnittliches Wachstum zwischen 40 und 80 % p.a. gezeigt<sup>3</sup> und am Ende des Jahres 2013 ist die weltweit installierte Leistung auf 140GWp<sup>4</sup> gewachsen. Der österreichische Marktanteil beträgt im Moment 626 MWp<sup>5</sup>. Für das Jahr 2015 wird eine weltweite Produktionskapazität von 120 GWp erwartet. In Österreich wurde im Jahr 2013 ein Produktionsvolumen von 75 MWp erreicht. Ein Gerät zur Kontrolle des Vernetzungsgrades von EVA, wie das im Projekt entwickelte, bietet ein **enormes Marktpotential**, da sämtliche Modulhersteller, vor allem europäische und US-amerikanische, ein vitales Interesse daran haben, sich durch bessere Qualität und definierte Kontrollprozesse von den asiatischen (Billig-)Mitbewerbern abzuheben. Zudem bietet ein **Verkürzen** der Taktraten im Herstellungsprozess die Möglichkeit, die Module **günstiger** zu machen und wieder näher an die Preise der asiatischen Mitbewerber anzuschließen.

Aufgrund der oben beschriebenen Alleinstellungsmerkmale und Vorteile und des großen und weiterhin wachsenden Marktes ist von einem hohen, weltweiten Interesse der PV-Modulhersteller an einem Inline-Inspektionsgerätes zur Vernetzungsgradkontrolle von EVA und einem entsprechenden Marktpotential auszugehen. Im Sinne einer **100 %-igen Qualitätskontrolle** ist das Ziel alle neuen Fertigungslinien mit einem solchen Gerät auszustatten und bestehende Fertigungslinien nachzurüsten. *GP Solar GmbH* rechnet, bei konservativer Betrachtung, mit einem jährlichen Absatz von zumindest **15** derartigen Inline-Geräten. *Die Firma* glaubt, dass ein **Komplettinspektionsgerät** (Visuelle Fehler, Elektrolumineszenz und Vernetzungsgrad) auf enormes Interesse bei den Modulherstellern stoßen wird. Damit ergibt sich ein realistisches ROI von deutlich unter einem Jahr allein durch die **Erhöhung des Liniendurchsatzes**

<sup>3</sup> EPIA— European Photovoltaic Industry Association, Global Market Outlook for Photovoltaics 2014-2018, [www.epia.org](http://www.epia.org)

<sup>4</sup> Jäger-Waldau, PV Status Report 2013 <http://iet.jrc.ec.europa.eu/remea/pv-status-report-2013>

<sup>5</sup> Biermayr, P., Eberl, M., Enigl, M., Fechner, H., Kristöfel, C., Leonhartsberger, K., Maringer, F., Moidl, S., Strasser, C., Weiss, W., Wörgetter, M., Innovative Energietechnologien in Österreich Marktentwicklung 2013: Biomasse, Photovoltaik, Solarthermie, Wärmepumpen und Windkraft, 2013

und der **Qualitätsverbesserung**. Damit ist von einem hohen Marktdruck in Richtung rascher Implementierung auszugehen und eine Produktentwicklung sinnvoll.

Aus wissenschaftlicher Sicht ergaben sich bei alternativen zerstörungsfreien Charakterisierungsmethoden einige interessante Fragestellungen, die auch in Zukunft von den wissenschaftlichen Partnern **CTR** und **PCCL** weiterverfolgt werden sollen. Im Zuge des Projektes wurden weiterführende spektroskopische Untersuchungen (NMR, Weißlichtinterferometrie, Fluoreszenzspektroskopie) durchgeführt. Mit allen Methoden konnte in ersten Testmessungen eindeutiger Zusammenhang zwischen Vernetzungsgrad und Vernetzungszeit nachgewiesen werden. Ziel dieser weiterführenden Untersuchungen sind ein besseres Verständnis des Vernetzungsprozesses. Aus technologischer Sicht zeigten die Ergebnisse des Projektes auf, dass nicht unwesentliche Verkürzungen der Laminationszeit in Abhängigkeit vom benutzten Einbettungsmaterial möglich sind. Ein Ansatz für künftige Forschungsprojekte wäre die Weiterentwicklung und Optimierung der EVA Folien mit speziellem Fokus auf die für die Vernetzungsreaktion benötigten Peroxide. Bei Verkürzung der Laminationszeiten unter Berücksichtigung einer ausreichenden thermo-mechanischen Stabilität könnte der Peroxidgehalt entsprechend gesenkt werden. Somit verringert sich die Gefahr von unbeabsichtigten Nebenreaktion des Peroxids im Betrieb, die zu einer Abnahme der Zuverlässigkeit und Effizienz der PV Module führen kann. Ebenso sind weiterführende Untersuchungen in Bezug auf Zuverlässigkeit und Effizienz von niedrig vernetzten PV Modulen notwendig, die im Zuge des Projektes nicht mehr abgedeckt werden konnten. Für niedrigvernetzte PV Module konnte unter Einsatzbedingungen eine Nachvernetzung von EVA sowie Verfärbungen an den Leiterbändchen festgestellt werden. Im vergleichsweise kurzen Untersuchungszeitraum konnte noch keine Abnahme der Modulleistung aufgrund der schwachen Vernetzung gemessen werden, was aber bei längeren Einsatzzeiten nicht ausgeschlossen werden kann.

Den wissenschaftlichen Partnern wurde mit knapp 30 Präsentationen und Publikationen großes Interesse zuteil. Außerdem konnten mit dem erlangten Wissen zwei weitere Projektanträge gestellt werden. Darüber hinaus können und sollen aus dem industriellen Forschungsprojekt heraus weitere industrielle Forschungsvorhaben zur Optimierung und Weiterentwicklung von Einbettfolien und Charakterisierungsmethoden für die Vernetzungsgradbestimmung initiiert werden.

## 6 Literaturverzeichnis

Im Berichtszeitraum wurden Ergebnisse und Aspekte des Projekts auf folgenden Veranstaltungen vorgestellt:

### Vorträge

1. A. Rauschenbach, G. Oreski "EVA als Einbettungsmaterial von Solarzellen – Herausforderungen bei der Charakterisierung des Vernetzungsverhalten" Perkin Elmer Material, Wien, 11.6.2014
2. A. Rauschenbach, G. Oreski "EVA als Einbettungsmaterial von Solarzellen – Herausforderungen bei der Charakterisierung des Vernetzungsverhalten" Perkin Elmer Material, Stuttgart, 30.6.2014
3. G. Eder, C. Hirschl, Determining the degree of crosslinking of EVA PV-encapsulant", Polymers in Photovoltaics 2015, 10.02.2015



4. G. Oreski, A. Rauschenbach, C. Hirschl, L. Neumaier, M. Kraft, G. Pinter “Challenges in Measuring the Degree of Cross-Linking of Ethylene Vinyl Acetate”, 29th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (29th EU PVSEC), Amsterdam, 25.09.2014
5. Ch. Hirschl, M. DeBiasio, L. Neumaier, R. Leitner, G. Eder, S. Seufzer, M. Kraft, “In-Line Raman Analysis of Ethylene Vinyl Acetate curing for and in industrial PV Module Manufacturing”, 8th International Conference on Advanced Vibrational Spectroscopy, Wien, 12.7.2015
6. Chr. Taudt, T. Baselt, G. Oreski, E. Koch, P. Hartmann, Ch. Hirschl, “Cross-linking characterization of polymers based on a novel white-light interferometer approach utilizing optical dispersion measurements”, SPIE Optical Metrology 2015, München, 23.6.2015

## Posterpräsentationen

1. Ch. Hirschl, M. Biebl–Rydlo, W. Mühleisen, L. Neumaier, G. Eder, B. Chernev and M. Kraft, Raman spectroscopic determination of the degree of encapsulant crosslinking in PV modules, 28th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (28th EU PVSEC), Paris
2. G. Oreski, M. Knausz, G. Pinter, Ch. Hirschl, G.C. Eder „Advanced methods for discovering PV module optimization potentials and quality control of encapsulation materials” 28th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (28th EU PVSEC), Paris
3. Ch. Hirschl, W.Mühleisen, L. Neumaier, M. Kraft, G. Oreski, A. Rauschenbach, A. Kogler, Ch. Berge, J. Huber, G. C. Eder „EVAnetz - Inline Ethylen/Vinylacetat Vernetzungsgradkontrolle in Photovoltaikmodulen“, Österreichische Photovoltaik Tagung St. Pölten, 19. -20.11.2013
4. M. DeBiasio, T. Arnold, R. Leitner, Ch. Hirschl, Detection of Snail Tracks on Photovoltaic Modules using a Combination of Raman and Fluorescence Spectroscopy, Österreichische Photovoltaik Tagung St. Pölten, 19. -20.11.2013
5. Ch. Hirschl, L. Neumaier, W. Mühleisen, G. Oreski, A. Rauschenbach, G. Eder, B. Chernev and M. Kraft, “Post-crosslinking in photovoltaic modules under different conditions” 29th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (29th EU PVSEC), 25.09.2014
6. L. Neumaier, W. Mühleisen, G. Oreski, G. C. Eder, A. Kogler, M. Tranitz, M. Schoppa, M. Wendt, N. Bogdanski, A. Plösch, Ch. Hirschl, M. Kraft, „Soxhlet Extraktion – Stand der Technik und Herausforderungen“, Österreichische Photovoltaik Tagung Linz, 3.-5.11.2014
7. Ch. Hirschl, W.Mühleisen, L. Neumaier, M. Kraft, G. Oreski, A.Rauschenbach, A. Kogler, Ch.Berge, G. C. Eder, „Inline Messsystem zur Vernetzungsgradkontrolle mittels Raman-Spektroskopie“, Österreichische Photovoltaik Tagung Linz, 3.-5.11.2014
8. Ch. Hirschl, L. Neumaier, W. Mühleisen, G. Oreski, A. Rauschenbach, G. Eder, B. Chernev and M. Kraft, “Post-crosslinking in photovoltaic modules under different conditions” Österreichische Photovoltaik Tagung Linz, 3.-5.11.2014
9. G. Oreski, A. Rauschenbach, C. Hirschl, G. Eder and G. Pinter, „Crosslinking and post-crosslinking of EVA in PV modules”, The 6th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion 2014, Japan
10. T. Arnold, Ch. Hirschl, J. Schicker, G. Schneider, M. Kraft, “Time-domain THZ Imaging as a flexible Metrology Tool for Characterising thin Wafers in Semiconductor Manufacturing”, 8th International Conference on Advanced Vibrational Spectroscopy, Wien, 12.7.2015
11. M. De Biasio, L. Neumaier, E. Geier, M. Rösner, Ch. Hirschl, M. Kraft, “Raman Micro-Spectrometry as a Key Tool for Development and Process Control in modern Semiconductor Manufacturing”, 8th International Conference on Advanced Vibrational Spectroscopy, Wien, 12.7.2015
12. M. DeBiasio, T. Arnold, R. Leitner, Ch. Hirschl, Detection of Snail Tracks on Photovoltaic Modules using a Combination of Raman and Fluorescence Spectroscopy, International Conference on Sensing Technology (ICST), Wellington, New Zealand
13. Ch. Hirschl, W. Mühleisen, L. Neumaier, M. DeBiasio, M. Kraft, „Entwicklung eines in-line Messverfahrens zur Vernetzungsgradkontrolle in Photovoltaikmodulen“, 30. Symposium Photovoltaische Solarenergie, Bad Staffelstein, 4. -6.03.2015
14. L. Neumaier, W. Mühleisen, Ch. Hirschl, M. Kraft, G. Oreski, G. C. Eder, A. Kogler, M. Tranitz, M. Schoppa, M. Wendt, N. Bogdanski, A. Plösch, „Soxhlet Extraktion: Standardverfahren oder



Herausforderung?“, 30. Symposium Photovoltaische Solarenergie, Bad Staffelstein, 4. - 6.03.2015

Folgende Publikationen in referierten Zeitschriften bzw. Konferenzbeiträge sind bereits publiziert bzw. derzeit in Ausarbeitung:

## Papers

1. G. Oreski „Advanced methods for determining PV module process optimization potential“, *Photovoltaics International* 23 (2014), 71-78
2. Ch.Hirschl, L.Neumaier, S.Puchberger, W. Mühleisen, G. Oreski, G. C. Eder, R. Frank, M. Tranitz, M. Schoppa, M.Wendt, N. Bogdanski, A. Plösch, M. Kraft, „Determination of the Degree of Crosslinking via Soxhlet Extraction: Gold Standard or Pitfall“, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Elsevier, accepted (31.07.2015)
3. G. Oreski, A. Rauschenbach, S. Ayalur-Karunakaran, C. Hirschl, G. Eder and G. Pinter, „Crosslinking and post-crosslinking of EVA in PV modules“, Einreichung bei *Solar Energy Materials and Solar Cells* vorgesehen

## Conference Papers

1. G. Oreski, C.Hirschl, „Challenges in Measuring the Degree of Cross-Linking of Ethylene Vinyl Acetate“, 29th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (29th EU PVSEC), 5DO.10.12
2. Ch. Hirschl, L. Neumaier, W. Mühleisen, G. Oreski, A. Rauschenbach, G. Eder, B. Chernev and M. Kraft, „Post-crosslinking in photovoltaic modules under different conditions“ 29th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (29th EU PVSEC), 5BV.4.9
3. Chr. Taudt, T. Baselt, G. Oreski, E. Koch, P. Hartmann, Ch. Hirschl, „Cross-linking characterization of polymers based on a novel white-light interferometer approach utilizing optical dispersion measurements“, *SPIE Optical Metrology* 2015
4. M. DeBiasio, T. Arnold, R. Leitner, Ch. Hirschl, Detection of Snail Tracks on Photovoltaic Modules using a Combination of Raman and Fluorescence Spectroscopy, International Conference on Sensing Technology (ICST), Wellington, New Zealand
5. Ch. Hirschl, W. Mühleisen, L. Neumaier, M. DeBiasio, M. Kraft, „Entwicklung eines in-line Messverfahrens zur Vernetzungsgradkontrolle in Photovoltaikmodulen“, 30. Symposium Photovoltaische Solarenergie, Bad Staffelstein, 4. -6.03.2015
6. L. Neumaier, W. Mühleisen, Ch. Hirschl, M. Kraft, G. Oreski, G. C. Eder, A. Kogler, M. Tranitz, M. Schoppa, M. Wendt, N. Bogdanski, A. Plösch, „Soxhlet Extraktion: Standardverfahren oder Herausforderung?“, 30. Symposium Photovoltaische Solarenergie, Bad Staffelstein, 4. - 6.03.2015

Folgende weitere Präsentationen mit Ergebnissen aus dem Projekt sind derzeit vorgesehen:

1. G. Oreski, L. Neumaier, Ch. Hirschl, W. Mühleisen, S. Puchberger, M. Kraft, G.C. Eder, R. Frank, M. Tranitz, M. Schoppa, M. Wendt, N. Bogdanski, A. Plösch, „Measuring the degree of crosslinking of EVA: Results of a European Round Robin test on Soxhlet extraction“, 30th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (30th EU PVSEC) 2015
2. Ch. Hirschl, L. Neumaier, W. Mühleisen, M. DeBiasio, R. Leitner, S. Puchberger, G. Oreski, A. Rauschenbach, G. C. Eder, S. Seufzer, Ch. Berge, E. Rüländ and M. Kraft, „In-line quality control device for the degree of crosslinking of the embedding material ethylene vinyl acetate in PV modules“, 30th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (30th EU PVSEC) 2015
3. G. Oreski, M. Brasch, A. Mihaljevic, Ch. Hirschl, G. Pinter, „Acetic acid transmission rates of PV backsheets“, 30th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (30th EU PVSEC) 2015

4. G. C. Eder, P.Grillberger, B. S. Chernev, Ch.Hirschl, "Spectroscopic Investigations on the Ageing/Degradation of PV-Encapsulants", 7th European Weathering Symposium EWS 2015
5. Ch. Hirschl, L. Neumaier, W. Mühleisen, M. DeBiasio, R. Leitner, M. Zauner, G. Oreski, A. Rauschenbach, G. C. Eder, S. Seufzer, Ch. Berge, E. Rüländ, M. Kraft, "Advanced in-line quality control of the embedding material ethylene vinyl acetate in PV modules", Polymers in Photovoltaics 2016
6. G. C. Eder, B. S. Chernev, Ch.Hirschl, P.Grillberger, "Spectroscopic Investigations on the Ageing/Degradation of PV-Encapsulants", Polymers in Photovoltaics 2016

## **7 Kontaktdaten**

### **Dr. Christina Hirschl**

*CTR Carinthian Tech Research AG*

Europastraße 4/1

Technologiepark Villach

A - 9524 Villach / St. Magdalen

Tel: +43 (0) 4242 56300 - 260

Fax: +43 (0) 4242 56300 - 400

Email: christina.hirschl@ctr.at

Web: <http://www.ctr.at>

### **Dr. Gernot Oreski**

*Polymer Competence Center Leoben GmbH*

Roseggerstraße 12

A-8700 Leoben

Tel: +43 3842 42962 51

Mobile: +43 664 88679331

Fax: +43 3842 42962 6

Email: oreski@pccl.at

Web: <http://www.pccl.at>

### **Dr. Eric Rueland**

*GP Solar GmbH*

Gottlieb-Daimler-Straße 5

D-78467 Konstanz

Tel: + 49 7531 94 227 - 0

Fax: + 49 7531 94 227 - 10

### **DI Sigfried Seufzer**

*KIOTO Photovoltaics GmbH*

Industriepark St. Veit, Solarstraße 1

A-9300 St. Veit/Glan

Tel: +43 (0)4212 28 136 241

Mobile: +43 (0)664 96 28 406

Fax: +43 (0)4212 28 300 799

Email: siegfried.seufzer@kioto.com

Web: <http://www.kiotosolar.com/>