

Energieforschungsprogramm

Publizierbarer Endbericht

Programmsteuerung:

Klima- und Energiefonds

Programmabwicklung:

Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH (FFG)

Endbericht

erstellt am

26/06/2015

PV-Advance

Erforschung einer neuen Werkstoffklasse für die Anwendung in Back- sowie Frontsheets von
Photovoltaikmodulen

Projektnummer: 838711

e!Mission.at - 1. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft
FFG

Ausschreibung	1. Ausschreibung e!Mission.at
Projektstart	02/01/2013
Projektende	31/03/2015
Gesamtprojektdauer (in Monaten)	27 Monate
ProjektnehmerIn (Institution)	ISOVOLTAIC AG
AnsprechpartnerIn	DI Werner Krumlacher
Postadresse	Isovoltaicstraße 1, 8403 Lebring, Österreich
Telefon	+43 5 9191 9962
Fax	+43 5 9191 79962
E-mail	werner.krumlacher@isovoltaic.com
Website	www.isovoltaic.com

PV-Advance

Erforschung einer neuen Werkstoffklasse für die Anwendung in Back- sowie Frontsheets von
Photovoltaikmodulen

AutorInnen:

Dr. Harald Muckenhuber

DI Werner Krumbacher

1 Inhaltsverzeichnis

Es muss ein Inhaltsverzeichnis mindestens auf Überschriftenebene 1 mit Seitenangabe erstellt werden!

1	Inhaltsverzeichnis	4
2	Einleitung.....	5
2.1	Aufgabenstellung	5
2.2	Schwerpunkte des Projektes.....	7
2.3	Einordnung in das Programm.....	8
2.4	Verwendete Methoden	9
2.5	Aufbau der Arbeit	9
3	Inhaltliche Darstellung / Ergebnisse und Schlußfolgerungen.....	11
3.1	Materialauswahl	11
3.2	Extrusionsversuche & Analyse der Eigenschaften.....	11
3.2.1	Vorversuche an coextrudierten Mehrschichtverbunden	12
3.2.2	Versuchsreihe am Laborcompounder mit den ausgewählten, unterschiedlichen Verträglichkeitsvermittlern.....	12
3.2.3	Versuchsreihe mit moderat-scher-Schneckengeometrie	13
3.2.4	Versuchsreihe mit hoch-scher-Schneckengeometrie.....	13
3.2.5	Versuchsreihe Compoundierung von modifizierten Polyamiden, weiß eingefärbt...13	
3.2.6	Versuchsreihe mit reaktiven Verträglichkeitsvermittlern.....	13
3.2.7	Versuchsreihe mit unterschiedlichen modifizierten Polyamiden und Verträglichkeitsvermittlern.....	14
3.2.8	Kombination von modifizierten Polyamiden mit einem Barrierepolymer zur Verringerung der Wasserdampfdurchlässigkeit.....	16
3.2.9	Reduktion der Dicke um mindestens 5% unter Erhalt der elektrischen Eigenschaften	18
3.2.10	Energieeinsparung durch Verarbeitung und Lamination bei geringerer Temperatur zur Steigerung der Energieeffizienz	19
3.2.11	Brandbeständigkeit von Coextrudaten.....	19
4	Ausblick und Empfehlungen.....	21
5	Literaturverzeichnis.....	21
6	Anhang	21
7	Kontaktdaten.....	21

2 Einleitung

2.1 Aufgabenstellung

Für die Bereitstellung nachhaltiger und leistbarer Energie ist, auch angesichts ständig steigender Ölpreise, ein ausreichend hoher Anteil an erneuerbaren Energien in der Gesamtenergieversorgung notwendig. Photovoltaik hat dabei in vielen Ländern einen wesentlichen Anteil an den erneuerbaren Energien und leistet in einigen Ländern (z.B. Deutschland, Italien) bereits einen signifikanten Beitrag zur Gesamtenergieversorgung [1].

Die Photovoltaik hat dabei bereits in den letzten Jahren gezeigt, dass sie ein Technologiebereich ist, der ein hohes Ausbau-, Innovations- und auch Treibhausminderungspotenzial hat [2]. Die Entwicklung neuer Materialien birgt dabei jedoch ein hohes technologisches und ökonomisches Risiko, wie die Entwicklung bei verschiedenen Technologien im PV-Bereich in den letzten Jahren gezeigt hat. So haben zum Beispiel PV-Module, welche Dünnschicht-Technologien verwenden, über einen langen Zeitraum signifikante Wachstumsraten bei den verkauften Modulen erzielt. Die erforderliche Steigerung beim Wirkungsgrad, bei gleichzeitiger Senkung der Kosten, konnte jedoch mit auf Siliziumsolarzellen basierenden PV-Modulen nicht Schritt halten. Im Bereich der Folienmaterialien für PV-Module, für die im gegenständlichen Projekt multifunktionelle Materialien entwickelt werden sollen, wurde z.B. bei der Entwicklung von Fluorpolymeren ein hohes technologisches und ökonomisches Risiko genommen. Diese Materialklasse ist jedoch im Bereich der Anwendung für PV-Module von abnehmender Relevanz, da sie komplex in der Fertigung ist, woraus auch hohe Kosten resultieren.

Für die multifunktionellen Werkstoffe, die im Rahmen dieses Projektantrags erforscht wurden, stand daher auch der Kostenaspekt immer mit im Fokus. Nur wenn die Kombination aus verbesserten Eigenschaften und Kosten dem Hersteller von PV-Modulen einen entsprechenden Vorteil bietet, hat ein Material das Potential in einem etwaigen Nachfolgeprojekt zum fertigen Produkt entwickelt zu werden.

Bezüglich der Ziele der Ausschreibung soll dieses Forschungsprojekt maßgeblichen Beitrag zum Ziel 2 der Ausschreibung e!Mission.at leisten. Die Erforschung von Materialien mit verbesserten Verarbeitungseigenschaften, und der damit verbundenen Effizienzsteigerung in der Fertigung, trägt zur Erhöhung des Anteils an erneuerbaren Energien durch eine verbesserte Kostenstruktur bei.

Ein ebenso maßgeblicher Beitrag wird zu Ziel 3 geleistet. Die ISOVOLTAIC AG ist Weltmarktführer im Bereich der Rückseitenfolien für PV-Module und hat in dieser Position die Technologieführerschaft über viele Jahre unter Beweis gestellt. So wurde im Jahr 2009 eine neue

Produktserie auf Basis von Polyamid (Projekt 825369, Polyamid als neuartiger Witterungsschutz für PV-Module) am Markt vorgestellt. Dieser Werkstoff war für die Verwendung im Bereich PV bislang nicht bekannt. Entsprechend hohe Forschungs- und Entwicklungsarbeit für eine erfolgreiche Markteinführung war notwendig.

Aktuell versuchen viele Firmen sich im Bereich der Rückseitenfolien Marktanteile zu sichern. Die vorrangige Strategie dieser, vielfach asiatischen Firmen, ist die Imitation von bestehenden Lösungen. Deswegen sieht es die ISOVOLTAIC AG auch als geeignet und notwendig an, die Forschungsarbeit in diesem Bereich alleine durchzuführen. Vielversprechende technologische Ansätze werden bei Bekanntwerden von diesen asiatischen Firmen sofort aufgegriffen und als Produkt, auch unausgereift, auf den Markt gebracht.

Daher ist es unerlässlich als Weltmarktführer im Technologiebereich der Rückseitenfolien neue innovative Lösungen zu erforschen, welche die zukünftigen Anforderungen in der Fertigung von PV-Modulen erfüllen können. Dadurch wird der Wirtschafts- und Innovationsstandort Österreich nachhaltig gestärkt und es kann auch die internationale Klimaschutzpolitik Österreichs unterstützt werden.

Auch zu Ziel 1 wird ein Beitrag geleistet, da durch die zu entwickelnden multifunktionellen Werkstoffe auch die Energieeffizienz eines PV-Moduls über seine gesamte Lebensdauer gesteigert werden soll. Das kann z.B. durch Werkstoffe mit einer optimierten Reflektivität und einer deutlich reduzierten Permeation für z.B. Sauerstoff erreicht werden.

Die Ziele für den Subschwerpunkt Photovoltaik, welche im Speziellen adressiert werden, sind jene zum Einsatz neuer Materialien, welche die Degradation der Solarzellen in einem PV-Modul reduzieren können. Dies kann, wie bereits erwähnt, durch eine Reduktion der Permeation geschehen.

Eine Kostenreduktion kann über besonders effiziente Fertigungsprozesse erreicht werden. So ist geplant, Forschung in Richtung solcher Werkstoffe zu betreiben, die eine ausgezeichnete Dispergierung von Füllstoffen ermöglichen und die geringere Verarbeitungstemperaturen zulassen.

Damit kann auch der PV-Modulherstellungsprozess optimiert werden, da Materialien mit einer hervorragenden Dispergierung geringere Dicken bei vergleichbaren Eigenschaften ermöglichen können. Weiters soll die Forschung in diesem Bereich auch multifunktionelle Materialien adressieren, welche bei niedrigen Temperaturen bei der PV-Modulfertigung (Laminationstemperatur) hohe Haftung zu Einbettungsmaterialien aufweisen. Solche Einbettungsmaterialien werden in der PV-Industrie derzeit erforscht und entwickelt und stellen ein großes Optimierungspotential für zukünftige PV-Module dar.

2.2 Schwerpunkte des Projektes

Rückseiten- und Frontseitenfolien für PV-Module weisen zwar eine gute Witterungsbeständigkeit auf, wesentliche Eigenschaften, welche für die zukünftige Verwendung voraussichtlich erforderlich sind, werden jedoch nicht erreicht.

Diese wesentlichen Eigenschaften sind:

- Brandbeständigkeit unter Erhalt der mechanischen Eigenschaften,
- Niedrige Wasserdampf- und Sauerstoffdurchlässigkeit,
- Hohe Haftung zu Einbettungsmaterialien (auch bei niedrigen Verarbeitungstemperaturen),
- Hervorragende Dispergierung von Füllstoffen (geringere Schichtdicken möglich),
- Geringere Temperaturen bei Fertigung und Verarbeitung (Kosten, Energie, Umwelt).

In den Gremien, welche die relevanten Normen für die PV-Industrie (IEC 61730, IEC 61215) erstellen (ISOVOLTAIC AG ist hier Expertenmitglied im TSKE 03, Technisches Subkomitee Photovoltaik auf nationaler Ebene, und Expertenmitglied im TC82/WG2 auf internationaler Ebene) werden bereits deutlich höhere Anforderungen an die Brandbeständigkeit von PV-Modulen diskutiert. Entsprechende Forschungsarbeit, um diese Eigenschaft auch für Rückseiten- und Frontseitenfolien unter Erhalt der mechanischen Eigenschaften zu erreichen, ist daher notwendig.

Spezielle Materialien oder Kombinationen von Materialien, welche die Durchlässigkeit gegenüber Wasserdampf- oder Sauerstoff deutlich herabsetzen ($<0,5\text{g/m}^2\text{d}$ bei 23°C / $85\%\text{r.h.}$ bzw. $>20\text{cm}^3/\text{m}^2 \text{ d atm}$), aber keine Sperrschichten auf Metalloxid oder Metallbasis enthalten, sind derzeit nicht verfügbar. Kostengünstigkeit, bei gleichzeitiger Erreichung dieser Eigenschaften, muss hier das klare Forschungsziel sein.

In der PV-Industrie werden derzeit auch Einbettungsmaterialien entwickelt, die bei niedrigen Temperaturen verarbeitet werden können. Die Entwicklung dieser Einbettungsmaterialien wird auch noch die nächsten Jahre in Anspruch nehmen. Der kurzfristige Trend geht jedoch eher zu höheren Temperaturen. Rückseiten- oder Frontseitenmaterialien, die bei diesen niedrigen Verarbeitungstemperaturen dann keine oder nur eine ungenügende Haftung zu den Einbettungsmaterialien aufweisen, würden diese Entwicklungen in Frage stellen. Daher ist es notwendig Materialien zu erforschen, die aufgrund ihrer Eigenschaften auch bereits bei niedrigeren Verarbeitungstemperaturen gute Anhaftung zu Thermoplasten haben.

Die Dispergierung von Füllstoffen und Additiven ist ein Standardprozess in der Fertigung von Folienmaterialien. Es handelt sich dabei derzeit um Standardindustrieprozesse, die auf ein lediglich ausreichendes Maß an Dispergierungsqualität ausgerichtet sind. Eine höhere Qualität der Dispergierung kann jedoch Eigenschaften wie elektrische Isolierung und mechanische Festigkeit deutlich verbessern. Für vergleichbare Eigenschaften kann daher eine geringere Materialdicke ausreichen (Ziel -5%). Die Kosten können somit entsprechend gesenkt werden.

Um diesen Dispergiergrad auch erreichen zu können, muss untersucht werden, wie die zu entwickelnden multifunktionellen Materialien mit den Füllstoffen und Additiven kompatibel sind. Entsprechende Adaptierungen werden erforderlich sein.

Die angestrebten Projektziele und Projektergebnisse auf Basis der zuvor beschriebenen Problemstellung sind wie folgt:

- Multifunktionelles Material mit hoher Haftung zu bestehenden und neuartigen Einbettungsmaterialien, speziell bei niedrigen Laminationstemperaturen,
- Minimaler Abfall der Haftung in allen relevanten anwendungstechnischen Prüfungen (<10% Abfall),
- Multifunktionelles Material mit reduzierter Wasserdampf- und Sauerstoffdurchlässigkeit (<0.5g/m²d bei 23°C / 85%r.h. bzw. <20cm³/m² d atm),
- Brandbeständigkeit des multifunktionellen Materials von mindestens der Brandklasse VTM-2 unter Erhalt der mechanischen Eigenschaften,
- Hervorragende Dispergierung von Füllstoffen und daraus resultierende Möglichkeit zur Reduktion der Dicke um mindestens 5% bei Erhalt der elektrischen Isolationsfähigkeit und Opazität,
- Vergleichbare mechanische Eigenschaften bei reduzierter Dicke der multifunktionellen Materialien,
- Möglichkeit zur Verarbeitung und Lamination bei geringer Temperatur zur Steigerung der Energieeffizienz (Energieeinsparung >5%)
- Erhöhung der Konkurrenzfähigkeit durch Multifunktionalität der Materialien.

Damit können jene Grundlagen für Rück- und Frontseitenfolien erforscht werden, welche in einem eventuellen Nachfolgeprojekt die Entwicklung dieser multifunktionellen Materialien bis zur Serienreife in einer Rück- oder Frontseitenfolie ermöglichen. Für die Produzenten von PV-Modulen können so auch zukünftig jene Folien zur Verfügung gestellt werden, welche alle technologischen und ökonomischen Anforderungen erfüllen können.

2.3 Einordnung in das Programm

Das hier eingereichte Projekt wurde im Schwerpunkt Erneuerbare Energien zum Subschwerpunkt Photovoltaik zugeordnet, da es sich mit der Erforschung von multifunktionellen Werkstoffen, welche die zukünftigen Anforderungen für die Verwendung in Rückseiten- und Frontseitenfolien von PV-Modulen erfüllen sollen, beschäftigt.

2.4 Verwendete Methoden

Das Projekt wurde anhand eines Projekthandbuchs mit detailliertem Projektstrukturplan abgearbeitet. Der Fortschritt der einzelnen Arbeitspakete und Aufgaben, der Personal- und Kostenaufwand, sowie der Status des Projekts waren auf diese Weise immer aktuell abrufbar.

2.5 Aufbau der Arbeit

Anhand einer umfangreichen Literaturrecherche wurden im ersten Arbeitspaket solche Kunststoffe ausgewählt, die aufgrund ihrer Eigenschaften die Fähigkeiten haben in Kombination die angestrebten Projektziele zu erfüllen. Als vielversprechend haben sich dabei modifizierte Polyamide herauskristallisiert.

Tabelle 1: Grundeigenschaften modifizierter Polyamide

	Witterungs- beständigkeit	Chemikalien- beständigkeit	Permeation gegenüber H ₂ O und O ₂	Hydrolyse- beständigkeit
Modifi- zierte Polyamide	+	+	+	+

Da aber verschiedene modifizierte Polyamide thermodynamisch nicht oder nur sehr begrenzt miteinander mischbar sind, sind Fragestellungen aufgetreten, die für die Zielerreichung, insbesondere die Erreichung eines ausreichend hohen Homogenitätsgrads des Polymerblends, eine technische Herausforderung darstellten. Durch Optimierungen der Prozessparameter und der Auswahl geeigneter Verträglichkeitsvermittler konnte ein hohes Niveau der Homogenität, sowie eine gute Dispergierung von Füllstoffen in den Folienmustern erreicht werden. Darin bestand eine Grundvoraussetzung für die erfolgreiche Umsetzung der Projektziele.

Mit modifizierten Polyamiden kann bei entsprechender Oberflächenbehandlung eine hervorragende Haftung zu verschiedenen Einbettungsmaterialien, wie z.B. EVA, erzielt werden. Das weitere Projektziel, dass der Haftungsabfall in allen relevanten anwendungstechnischen Prüfungen minimal gehalten werden kann, wurde ebenfalls erreicht. Nach 1000h Damp-Heat Prüfung liegt der Haftungsabfall unter 10%.

In Bezug auf das Projektziel der reduzierten Wasserdampf- und Sauerstoffdurchlässigkeit zeigte sich, dass eine Folie aus modifizierten Polyamiden eine Wasserdampfdurchlässigkeit von ca. 18g/m²d (Messbedingungen 23°C / 85% r.h. Foliendicke 45µm) zeigt. Vergleichbare Folien, wie

sie heute in Folienverbunden auf der Rückseite von PV-Modulen eingesetzt werden, zeigen eine zumindest 10% höhere Wasserdampfdurchlässigkeit.

Im weiteren Projektverlauf hat sich gezeigt, dass eine deutlich reduzierte Wasserdampfdurchlässigkeit eine Eigenschaft ist die für die Modulperformance einen erheblichen Vorteil darstellt. Korrosionseffekte an der Zelle, an den Zellverbindern und an weiteren Komponenten innerhalb des Moduls werden deutlich reduziert.

Daher wurde ein Schwerpunkt der Forschungsaktivitäten darauf gelegt, ein Material zu finden, welches mit modifizierten Polyamiden grundsätzlich kompatibel ist, aber eine nochmals verbesserte Wasserdampfdurchlässigkeit aufweist.

Ein Barrierepolymer hat sich hier nach umfangreicher Recherche als Werkstoff erwiesen, der diese Eigenschaft gewährleisten kann. Je nach Dicke der verwendeten Barrierepolymer-Schicht kann eine Wasserdampfdurchlässigkeit von bis zu 0,5g/m²d (Messbedingungen 38°C / 90% r.h.) erreicht werden. Es wurde somit eine nochmalige Reduktion um zumindest eine Größenordnung erreicht.

Bei der Sauerstoffdurchlässigkeit wurde bei den bislang entwickelten Folien ein Wert von ca. 110 cm³ / m² d atm (Messbedingungen 23°C / 100% Sauerstoff) gemessen. Vergleichbare Folien, wie sie in Standard PV-Modulen zum Einsatz kommen, weisen hier 5-fach höhere Werte auf. Die Reduktion der Sauerstoffpermeation durch diese Materialkombination erscheint daher als besonders vielversprechende Eigenschaft. Ein unerwünschtes Phänomen durch die Kombination Sauerstoff und Wasser in PV-Modulen, welches dadurch vermieden werden könnte, sind sogenannte „Schnecken Spuren“ (das Oxidieren von leitenden Verbindungen auf den Solarzellen) [3].

Das Ziel der Brandbeständigkeit der Brandklasse VTM-2 wurde ebenfalls erreicht. Besonders wichtig für die Erfüllung dieser Eigenschaften sind die Füllstoffe in den Außenschichten und im Speziellen die Schichtdickenverteilung. Bei einem Füllgrad von >15% und einer geeigneten Mindestschichtdicke der Außenschichten, kann diese Brandklasse erreicht werden.

Die Notwendigkeit einer hervorragenden Dispergierung wurde bei der Herstellung eines Compounds ja bereits erwähnt, da sonst die erforderlichen mechanischen Eigenschaften nicht erreicht werden. Zusätzlich ist es erforderlich auch die Füllstoffe in den Compounds hervorragend zu dispergieren, da sonst die elektrischen Eigenschaften negativ beeinflusst werden. Dass diese hervorragende Dispergierung erreicht wurde, zeigt die Tatsache, dass die Gesamtdicke bei vergleichbarer elektrischer Isolierung um zumindest 6% abgesenkt werden konnte.

Ein multifunktionaler Werkstoff bzw. ein Verbund aus multifunktionellen Werkstoffen, wie er in diesem Projekt erforscht wurde, stellt auf dem Photovoltaikmarkt immer ein großes Potenzial dar, und kann daher nach einer entsprechenden Weiterentwicklung zum Produkt die Konkurrenzfähigkeit erheblich steigern.

3 Inhaltliche Darstellung / Ergebnisse und Schlußfolgerungen

3.1 Materialauswahl

Das Arbeitspaket Materialauswahl wurde, wie geplant, erfolgreich abgeschlossen. Die Polymere, Additive und Füllstoffe wurden anhand der umfangreichen Literatur- und Patentrecherche ausgewählt.

Als Basismaterial für die Versuche wurde modifiziertes Polyamid gewählt. Im Vergleich zu Standard-Polyamiden zeichnet es sich durch weitere Vorteile für die Photovoltaikanwendung aus:

- verbesserte UV-Beständigkeit (kann durch Einfärben in dunklen Farbtönen noch verbessert werden),
- erhöhte thermische Stabilität,
- günstiges antielektrostatisches Verhalten,
- hohe Festigkeit, Steifigkeit und Härte,
- hohe Formbeständigkeit in der Wärme,
- hohe Zähigkeit (auch in der Kälte),
- hohe Chemikalienbeständigkeit,
- niedrige Permeationswerte für Wasserdampf und Sauerstoff.

Es wurde daher die Forschung auf das Blenden / Compoundieren von modifizierten Polyamiden fokussiert. Da modifizierte Polyamide zum Teil thermodynamisch nicht mischbar sind, wurden anhand der Literaturrecherche mögliche Substanzklassen für Verträglichkeitsvermittler ausgewählt. Anschließend wurde eine Versuchsmatrix einzelner Komponenten erstellt, die laufend mit den aktuellen Informationen ergänzt wurde.

3.2 Extrusionsversuche & Analyse der Eigenschaften

Die Arbeitspakete „Extrusionsversuche“ und „Analyse der Eigenschaften“ sind nachfolgend gemeinsam beschrieben, da diese für den Fortschritt des Projekts parallel geführt werden mussten. Die Abfolge der Beschreibung ist durch die Versuchsserien und die dabei gewonnenen Erkenntnisse vorgegeben.

3.2.1 Vorversuche an coextrudierten Mehrschichtverbunden

Um eine erste Aussage über die Performance diverser Haftvermittler für die Kombination von modifizierten Polyamiden machen zu können, wurden Mehrschichtverbunde an der Laboranlage coextrudiert. In diesen Vorversuchen konnte somit eine erste Selektion der prinzipiell geeigneten Verträglichkeitsvermittler für Blends von modifizierten Polyamiden anhand von Haftungsprüfungen durchgeführt werden.

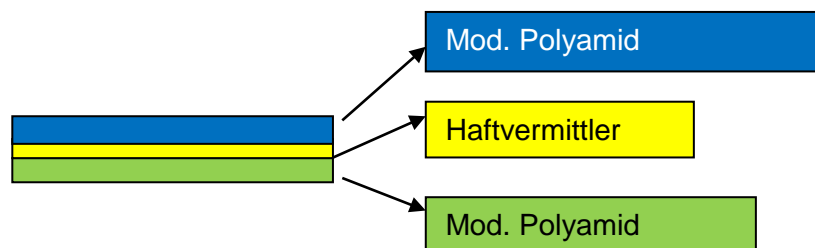


Abbildung 1: Schematische Darstellung der coextrudierten Mehrschichtverbunde

Aufgrund dieser Vorversuche wurden verschiedene Klassen von Haftvermittlern ausgewählt.

3.2.2 Versuchsreihe am Laborcompounder mit den ausgewählten, unterschiedlichen Verträglichkeitsvermittlern

In der ersten Versuchsreihe am Laborcompounder wurden unter Verwendung der selektierten Verträglichkeitsvermittler Compounds hergestellt und deren Homogenität untersucht. Dazu wurde eine Type von modifiziertem PA ausgewählt und nur der Verträglichkeitsvermittler variiert. Anschließend wurde an der Laborextrusionsanlage aus jedem Compound ein Folienmuster hergestellt und die Homogenität der Mischung anhand mechanischer Prüfungen (Reißkraft/ Reißdehnung) beurteilt. Eine hohe Homogenität in einem Folienmuster ist dadurch gekennzeichnet, dass die Werte der Reißkraft/ Reißdehnung in der Extrusions- sowie in transversaler Richtung vergleichbar sind. Da Inhomogenitäten in einer Polymermischung insbesondere die Werte der Reißdehnung in transversaler Richtung des Folienmusters reduzieren, wurde dieser Messparameter für die Beurteilung der Homogenität herangezogen. Da alle Compounds aus der ersten Versuchsreihe jedoch zu niedrige Werte der Reißdehnung aufgewiesen haben, wurde entschieden die Schneckenengeometrie des Compounders in Bezug auf die eingebrachte Scherenergie und Homogenisierung zu optimieren.

3.2.3 Versuchsreihe mit moderat-scher-Schneckengeometrie

Für die Optimierungen der Schneckengeometrie beim Laborcompounder wurden neue Schneckenelemente angeschafft und eine moderat-scher-Geometrie aufgebaut. Im Vergleich zu der ersten Schneckengeometrie wurde die Plastifizierungszone verschoben, um den Plastifizierungsvorgang bei der Extrusion möglichst früh zu gewährleisten. Es wurden dabei auch mehrere adaptierte Schneckenelemente eingesetzt, um die Verweilzeit bzw. den Dispergierungs- und Homogenisierungsvorgang so weit wie möglich zu verlängern. Die Werte der Reißkraft bzw. Reißdehnung waren höher als in Compounds mit niedrig-scher-Schneckengeometrie, jedoch in der transversalen Richtung immer noch zu niedrig.

3.2.4 Versuchsreihe mit hoch-scher-Schneckengeometrie

Um die dispersive Mischwirkung noch zu intensivieren, wurden die Knetzonen in der Schneckengeometrie des Compounders verlängert bzw. Knetblöcke mit maximaler Scherwirkung eingebaut. Mit dieser hoch-scher-Schneckengeometrie wurde eine weitere Versuchsreihe mit den vorselektierten Verträglichkeitsvermittlern durchgeführt. Es hat sich dabei gezeigt, dass die Folienmuster die höchsten Werte der Reißkraft bzw. Reißdehnung in der transversalen Richtung innerhalb der bisherigen Versuchsreihen aufweisen. Für die Reißdehnung wurden bereits Werte >100% erreicht.

Es wurde daher entschieden, für die weiteren Versuchsreihen die hoch-scher-Schneckengeometrie im Laborcompounder einzusetzen.

3.2.5 Versuchsreihe Compoundierung von modifizierten Polyamiden, weiß eingefärbt

Da weiß eingefärbte Rückseitenfolien in der Photovoltaik überwiegend verwendet werden, wurde mit modifizierten Polyamiden und verschiedenen Verträglichkeitsvermittlern eine weitere Versuchsreihe zur Eincompoundierung von Füllstoffen durchgeführt. Die hergestellten Folien zeigten dabei vergleichbare mechanische Eigenschaften bzw. ein vergleichbares Niveau der Homogenität wie die Muster der vorherigen Versuchsreihe ohne Füllstoff (Reißdehnung in Querrichtung ebenfalls >100%). Die entwickelte Materialkombination und die ermittelten Prozessparameter sind somit auch für die Eincompoundierung von Füllstoffen und Pigmenten grundsätzlich geeignet.

3.2.6 Versuchsreihe mit reaktiven Verträglichkeitsvermittlern

Um die mechanischen Werte der aus den Compounds hergestellten Folien noch weiter zu verbessern, wurde die Versuchsmatrix auf solche Verträglichkeitsvermittler erweitert, die

funktionelle Gruppen bzw. Komponenten beinhalten, die sich chemisch und physikalisch an beide Polymerpartner binden können. Die Compounds aus dieser Versuchsreihe bzw. anschließend extrudierte Folienmuster zeigen nochmals deutliche Verbesserungen gegenüber den zuvor gefertigten Mustern. Folgende mechanische Werte (siehe Tabelle 2) werden erreicht:

Tabelle 2: Mechanische Werte von Folien hergestellt unter Verwendung von reaktiven Verträglichkeitsvermittlern (MD...Extrusionsrichtung, TD...Querrichtung)

Verträglichkeitsvermittler	Reißkraft MD	Reißkraft TD	Reißdehnung	Reißdehnung
Typ 1	+	+	+	++
Typ 2	+	+	+	+
Typ 3	++	+	++	+

Um auch erste Informationen über die beschleunigte Alterung zu gewinnen, wurden für ausgewählte Folienmuster UV-Prüfungen gestartet bzw. Folienverbunde (Labormuster mit dem Aufbau einer typischen Rückseitenfolie) für Prüfungen der Hydrolysestabilität hergestellt. Die Resultate dieser Prüfungen stellen sich grundlegend wie folgt dar:

Tabelle 3: Generelle Ergebnisse aus beschleunigten Alterungsprüfungen

	Damp-Heat, 85°C / 85% r.h.	UV-Test nach ISO 4892-3
Haftung zu EVA	>90% Retention, 1000h Prüfdauer	n.a.
Haftung zu Encapsulant	>90% Retention, 1000h Prüfdauer	n.a.
Yellowing Index	<10 nach 1000h Prüfdauer	<10 nach 1524h Prüfdauer
WVTR	Anstieg <10% nach 1000h Prüfdauer	n.a.

Typische Retentionswerte der EVA-Haftung von Standard-Backsheets nach 1000h Damp-Heat Test liegen bei 60 bis 70% des Ausgangswertes. Die verwendete Materialkombination von modifizierten Polyamiden zeigt somit bereits in dieser Projektphase herausragende Eigenschaften in diesem Bereich.

3.2.7 Versuchsreihe mit unterschiedlichen modifizierten Polyamiden und Verträglichkeitsvermittlern

Die bisherigen Untersuchungen bzw. Versuche zur Optimierung der Compounds wurden, wie beschrieben, unter Verwendung der jeweils gleichen Typen von modifiziertem Polyamid durchgeführt, um die Anzahl der Variablen gering zu halten. Um nun Informationen über den Einfluss der Materialparameter von modifizierten Polyamiden (wie z.B. Schmelzindex, Schmelzpunkt, E-Modul) auf die Eigenschaften des Blends / des Compounds zu gewinnen,

wurden diverse modifizierte Polyamide von unterschiedlichen Polymerherstellern ausgewählt und diese mit den bislang bestgeeigneten Verträglichkeitsvermittlern compoundingiert. Mechanische Prüfungen an den Folienmustern haben eine weitere Verbesserung in den Eigenschaften durch die Kombination abgestimmter modifizierter Polyamide gezeigt, siehe Tabelle 4.

Tabelle 4: Mechanische Werte der besten Kombinationen von modifizierten Polyamiden als Folien hergestellt unter Verwendung von reaktiven Verträglichkeitsvermittlern (MD...Extrusionsrichtung, TD...Querrichtung)

Verträglichkeitsvermittler	Reißkraft MD	Reißkraft TD	Reißdehnung MD	Reißdehnung TD
Typ 1	+	+	++	++
Typ 2	+	+	++	++
Typ 3	++	+	+++	++

Als wichtigstes Kriterium für die Auswahl von modifizierten Polyamiden und Verträglichkeitsvermittlern hat sich dabei neben der Möglichkeit einer chemisch / physikalischen Anbindung des Verträglichkeitsvermittlers an die Polymermatrix die Ähnlichkeit im Melt Flow Index (MFI) herausgestellt. Ein ähnliches Fließverhalten bei den ermittelten Compoundiertemperaturen ist für gute mechanische Eigenschaften zwingend erforderlich.

Auch hier wurden aus den Polymerblends mit den besten Eigenschaften Folienverbunde im Labormaßstab hergestellt und Langzeitprüfungen gestartet.

Ausgehend von besseren Startwerten, wie in Tabelle 4 angeführt, wurde ein grundsätzlich vergleichbares Alterungsverhalten wie bei den zuvor beschriebenen Folien ermittelt, siehe Tabelle 5.

Tabelle 5: Ergebnisse aus beschleunigten Alterungsprüfungen von Folien mit ausgewählten modifizierten Polyamiden

	Damp-Heat, 85°C / 85% r.h.	UV-Test nach ISO 4892-3
Haftung zu EVA	>90% Retention, 1000h Prüfdauer	n.a.
Yellowing Index	<10 nach 1000h Prüfdauer	<10 nach 1524h Prüfdauer
WVTR	Anstieg <10% nach 1000h Prüfdauer	n.a.

Wie bereits im Abschnitt 1 erwähnt, kann eine Kombination von modifizierten Polyamiden eine Verbesserung der Wasserdampfdurchlässigkeit von ca. 10% gegenüber anderen

Folienmaterialien (z.B. Polyvinylfluorid) erreichen. Bei einer Folie mit einer Dicke von 45µm ergibt sich dabei ein Permeationswert von ca. 18g/m²d (gemessen bei 23°C, 85%r.h.).

Ein Einsatz dieser Folie könnte in einem Drei-Schicht-Aufbau mit einer PET-Folie als Kernschicht angedacht werden, siehe Abbildung 2. Zwischen den Folien aus modifizierten Polyamiden und der PET-Kernschicht wäre dabei eine Klebeschicht zu verwenden. PET-Folie wird als bereits biaxial verstreckte Folie (verbesserte mechanische Eigenschaften) von entsprechenden Herstellern angeboten. Eine Co-Extrusion mit modifizierten Polyamiden und nachfolgender biaxialer Verstreckung wäre technologisch möglich, aber jedoch sehr aufwendig (und damit voraussichtlich zu kostenintensiv).

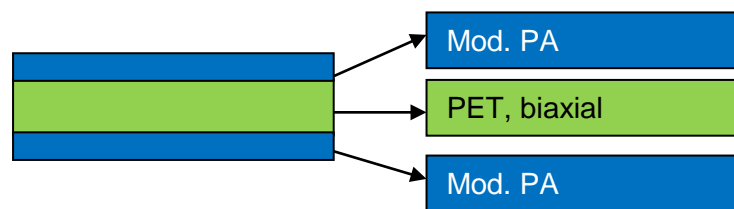


Abbildung 2: 3-Schicht Aufbau mit PET-Folie als Kernschicht (Klebeschichten nicht eingezeichnet)

Um das Projektziel einer Permeation von 0,5g/m²d bei 23°C, 85% r.h. zu erreichen, ist dieser Aufbau trotz der reduzierten Permeation von modifizierten Polyamiden aber noch nicht geeignet. Es wurde daher im folgenden Punkt nach einem geeigneten Material gesucht, welches in Kombination mit den gefundenen hervorragenden Eigenschaften von modifizierten Polyamiden diese weitere Anforderung erfüllen kann.

3.2.8 Kombination von modifizierten Polyamiden mit einem Barrierepolymer zur Verringerung der Wasserdampfdurchlässigkeit

Aus der Literatur ist bekannt, dass bestimmte Barrierepolymere im Allgemeinen eine geringe Wasserdampfdurchlässigkeit aufweisen. Daher wurde die Verwendung eines Barrierepolymers in Kombination mit modifizierten Polyamiden in Betracht gezogen.

Die Herstellung eines Drei-Schicht-Aufbaus, siehe Abbildung 3, wurde als erstes versucht. Modifizierte Polyamide zeigten dabei auch bei Co-Extrusion keine ausreichende Haftung zu einer Barrierepolymeroberfläche (Haftungen <2N/cm). Auch der im modifizierten Polyamid beinhaltete Verträglichkeitsvermittler liefert hier keinen ausreichenden Beitrag für die Anhaftung.

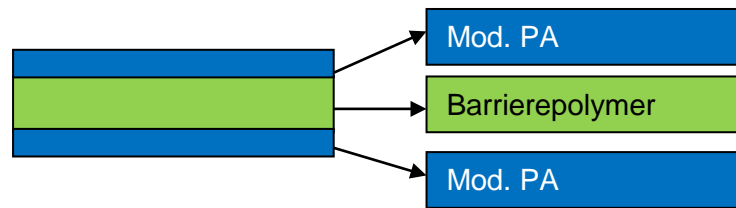


Abbildung 3: 3-Schicht Aufbau mit Barrierepolymer-Kern

Als Lösung für diese Thematik war es daher notwendig einen geeigneten Haftvermittler zu suchen. Erste Versuche wurden dahingehend durchgeführt, dass der Haftvermittler als zusätzliche Komponente in die modifizierte Polyamid- und / oder in die Barrierepolymer-Schicht eingebracht wurde. Damit wurden jedoch die bereits erreichten mechanischen Eigenschaften der modifizierten Polyamid-Folie negativ beeinflusst. Desweiteren wurde die Wasserdampfdurchlässigkeit der Barrierepolymer-Schicht in nicht akzeptablem Maß erhöht.

Daher wurde es als notwendig erachtet, eine Haftvermittlungsschicht zwischen der modifizierten Polyamid-Schicht und der Barrierepolymer-Schicht zu verwenden, siehe Abbildung 4.

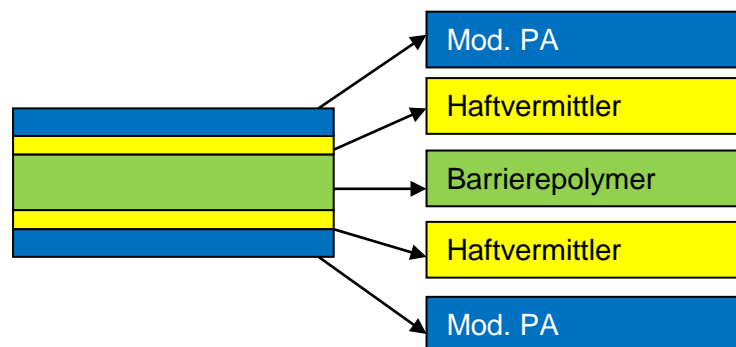


Abbildung 4: 5-Schicht-Aufbau mit Außenschichten aus modifiziertem Polyamid, Haftvermittlungsschichten und Barrierepolymer-Kernschicht

Verschiedene Systeme wurden als Haftvermittler zwischen modifiziertem Polyamid und der Barrierepolymer-Kernschicht getestet. Die grundlegenden Testresultate waren dabei wie folgt:

Tabelle 6: Haftwerte zwischen modifiziertem Polyamid und Barrierepolymer mit verschiedenen Haftvermittlern

Type Haftvermittler	Haftung zwischen modifiziertem Polyamid und dem Barrierepolymer
Typ 1	+
Typ 2	++
Typ 3	~
Typ 4	~

Auf Basis dieser positiven Prüfwerte, wurden die Muster weiteren grundlegenden Prüfungen, sowie ersten beschleunigten Alterungstests unterzogen. Ergebnisse dieser Prüfungen finden sich in Tabelle 7.

Tabelle 7: Ergebnisse aus beschleunigten Alterungsprüfungen von Coextrudaten von modifiziertem Polyamid mit Haftvermittlungsschicht und Barrierepolymer-Kernschicht

	Damp-Heat, 85°C / 85% r.h.	UV-Test nach ISO 4892-3
Haftung zu EVA	>90% Retention, 1000h Prüfdauer, keine Trennung der Lagen möglich	n.a.
Yellowing Index	<10 nach 1000h Prüfdauer	<10 nach 1524h Prüfdauer
WVTR	<0,5g/m ² d bei 23°C / 85% r.h., keine signifikante Zunahme im Verlauf der Damp-Heat Prüfung!	n.a.

Ein weiteres Projektziel war die Reduktion der notwendigen Dicke von Backsheet-Folien um mindestens 5% unter Erhalt der elektrischen Eigenschaften. Dieser Aspekt wird im nächsten Punkt behandelt.

3.2.9 Reduktion der Dicke um mindestens 5% unter Erhalt der elektrischen Eigenschaften

Der wesentlichste Wert für die elektrischen Eigenschaften ist die sogenannte Systemspannung. Dabei wird unter definierten Prüfbedingungen das Auftreten von elektrischen Teilentladungen in Backsheetverbundfolien gemessen. Bei Verbunden mit einer PET-Folie im Kern, welche mit zwei witterungsstabilen Außenschichten verklebt ist, beträgt die typische Dicke zwischen 320 und 350µm, um eine Systemspannung von 1000V (keine Teilentladung bis zu einer Spannung von 1000V) zu gewährleisten.

Bei einem wie in Abbildung 6 dargestellten Coextrudat mit Außenschichten aus modifiziertem Polyamid, Haftvermittlungsschichten und einer Barrierepolymer-Kernschicht sind 290 bis 300µm ausreichend, um eine Systemspannung von 1000V zu gewährleisten.

Tabelle 8 zeigt beispielhaft Prüfwerte verschiedener Backsheets.

Tabelle 8: Systemspannung und Dicken verschiedener Backsheets im Vergleich

Material	Dicke	Zulässige Systemspannung
Icosolar 2442 (PET-Kern)	0,34mm	>1000V
Icosolar APA 3G (PET-Kern)	0,35mm	>1000V
Icosolar APA 4004 (PET-Kern)	0,31mm	>1000V
Coextrudat, Abb. 6	0,29mm	>1000V

Im direkten Vergleich zu Mustern mit PET-Kern ist somit zumindest eine Dickenreduktion um >6% bei gleichzeitigem Erreichen einer zulässigen Systemspannung von >1000V möglich.

Im Vergleich zu anderen Backsheets, bei denen der Beitrag der witterungsbeständigen Außenfolien zur elektrischen Isolation geringer ist (z.B. Icosolar 2442) liegt die Dickenreduktion sogar bei ca. 15%.

3.2.10 Energieeinsparung durch Verarbeitung und Lamination bei geringerer Temperatur zur Steigerung der Energieeffizienz

Im Vergleich zu anderen Coextrudaten, wie zum Beispiel dem Backsheet Icosolar AAA 3554, welches aus Polyamid besteht, kann die Verarbeitungstemperatur etwas abgesenkt werden. Daraus ergibt sich jedoch nur eine vergleichsweise geringe Energieeinsparung von <1%. Die Haupteinsparung an Energie ergibt sich aus der geringeren Dicke, die für die Erreichung der Systemspannung notwendig ist. Die verbesserte Effizienz im Herstellungsprozess ergibt dabei ein Einsparungspotential von bis zu 17% an Energie.

Bei der Herstellung von PV-Modulen geht der Trend, aufgrund von Weiterentwicklungen im EVA-Bereich, ebenfalls zu höheren Prozesstemperaturen. Aufgrund verkürzter Prozesszeiten ergibt sich damit auch hier eine Nettoeinsparung von Energie. Diese kann derzeit jedoch noch nicht exakt beurteilt werden.

3.2.11 Brandbeständigkeit von Coextrudaten

Um eine grundsätzliche Eignung der erforschten Werkstoffkombinationen für eine zukünftige Anwendung in einem PV-Backsheet zu gewährleisten, war auch die Untersuchung der Brandbeständigkeit erforderlich.

Für einen Einsatz als Backsheet ist grundsätzlich eine Brandklasse von VTM-2 (nach UL94) oder besser erforderlich. Backsheets, die diese Anforderung nicht erfüllen, können nur sehr

eingeschränkt verwendet werden (nationale Normen in wenigen, einzelnen Ländern erfordern keine Brandklasse).

Die Werkstoffe modifiziertes Polyamid und Barrierepolymer als Einzelkomponenten ohne Füllstoffe sind nicht geeignet, die Anforderungen hinsichtlich der Brandklasse zu erfüllen. Daher war es erforderlich entsprechende Modifikationen vorzunehmen, ohne die mechanischen und elektrischen Eigenschaften in unerwünschtem Maß zu beeinträchtigen.

Da Flammschutzmittel im Allgemeinen die mechanischen Eigenschaften von Verbunden negativ beeinflussen, wurde vom Einsatz solcher Verbindungen in einem ersten Schritt Abstand genommen.

Es wurde daher ein Füllstoff gewählt, der einen Beitrag zur Brandbeständigkeit leistet, gleichzeitig aber auch zur Witterungsstabilität, zur Reflektivität und zum Weißgrad der Oberfläche beiträgt.

Verschiedenste Varianten bezüglich der am besten geeigneten Materialkombination wurden getestet.

Mit einer geeigneten Schichtdickenverteilung kann dabei die Brandklasse VTM-2 grundsätzlich erreicht werden:

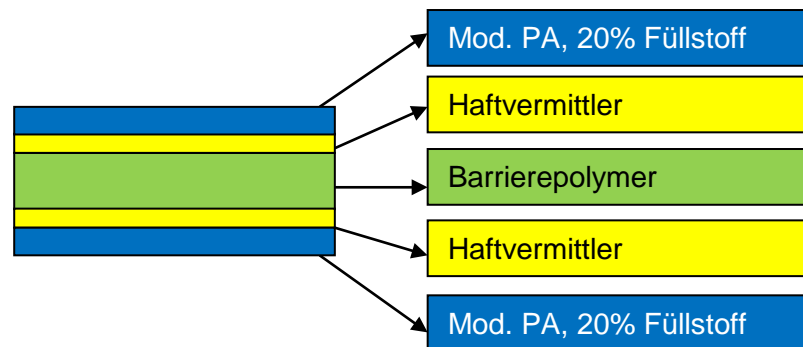


Abbildung 5: Füllstoffgehalt der Außenschichten für die Erreichung der Brandklasse VTM-2

Eine höhere Brandklasse (VTM-1 oder VTM-0) könnte, wie erwähnt, nur mit dem Einbringen von Flammschutzmitteln erreicht werden. Da diese Flammschutzmittel die mechanische Stabilität negativ beeinflussen und eine höhere Brandklasse keine Normanforderung ist, wurde von weiteren Forschungsarbeiten in diese Richtung Abstand genommen.

4 Ausblick und Empfehlungen

Aufgrund der erzielten vielversprechenden Forschungsergebnisse werden aktuell die Möglichkeiten diskutiert, wie der weitere Weg bzgl. der Entwicklung zu einem Produkt gestaltet werden kann. Mit dieser Entwicklung zum Produkt können die aufgewendeten Forschungsmittel umso mehr gerechtfertigt werden.

5 Literaturverzeichnis

[1] Photon PV Magazine

[2] EPIA Global Market Outlook, Mai 2012

[3] Köntges et al., IEA PVPS Workshop @ 27th EU PVSEC, 2013; Meyer et al., Energy Procedia, Volume 38, 2013, 498-505].

6 Anhang

keiner

7 Kontaktdaten

DI Werner Krumlacher

ISOVOLTAIC AG

Isovoltaicstraße 1, 8403 Lebring

Tel: +43 5 9191 9962

Fax: +43 5 9191 79962

Mail: werner.krumlacher@isovoltaic.com

www.isovoltaic.com