

Bernhard Weller

**Technologieentwicklung leichter,
flexibler Photovoltaik Elemente
auf der Basis von ETFE und CIGS-
Foliensolarzellen für die Architektur**

F 2956

Bei dieser Veröffentlichung handelt es sich um die Kopie des Abschlussberichtes einer vom Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung -BMVBS- im Rahmen der Forschungsinitiative »Zukunft Bau« geförderten Forschungsarbeit. Die in dieser Forschungsarbeit enthaltenen Darstellungen und Empfehlungen geben die fachlichen Auffassungen der Verfasser wieder. Diese werden hier unverändert wiedergegeben, sie geben nicht unbedingt die Meinung des Zuwendungsgebers oder des Herausgebers wieder.

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die Originalmanuskripte wurden reprototechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprototechnischen Eignung des Originalmanuskriptes ab, das uns vom Autor bzw. von der Forschungsstelle zur Verfügung gestellt wurde.

© by Fraunhofer IRB Verlag

2015

ISBN 978-3-8167-9517-9

Vervielfältigung, auch auszugsweise,
nur mit ausdrücklicher Zustimmung des Verlages.

Fraunhofer IRB Verlag

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69

70504 Stuttgart

Nobelstraße 12

70569 Stuttgart

Telefon 07 11 9 70 - 25 00

Telefax 07 11 9 70 - 25 08

E-Mail irb@irb.fraunhofer.de

www.baufachinformation.de

www.irb.fraunhofer.de/bauforschung

Endbericht

Technologieentwicklung leichter, flexibler Photovoltaikmodule auf der Basis von ETFE und CIGS-Foliensolarzellen für die Architektur
Förderkennzeichen: II 3-F20-10-1-137 / SWD-10.08.18.7-12.06

Technische Universität Dresden

Fakultät Bauingenieurwesen
Institut für Baukonstruktion
Prof. Dr.-Ing. Bernhard Weller

www.bauko.bau.tu-dresden.de

28.04.14 CK 1/55

Endbericht

Projektpartner: Technische Universität Dresden
Fakultät Bauingenieurwesen
Institut für Baukonstruktion
(Projektleiter Prof. Dr.-Ing. Bernhard Weller)

Nowofol Kunststoffprodukte GmbH & Co. KG

Solarion AG

Förderkennzeichen: II 3-F20-10-1-137 / SWD-10.08.18.7-12.06

Vorhabensbezeichnung: Technologieentwicklung leichter, flexibler Photovoltaikmodule auf der Basis von ETFE und CIGS-Foliensolarzellen für die Architektur

Laufzeit des Vorhabens: 21.05.12 bis 30.04.14

Berichtszeitraum: 21.05.12 bis 30.04.14

Inhalt:	1 Motivation und Ausgangssituation	2
	2 Geplanter Projektablauf	3
	3 Bisherige Ergebnisse aus den Arbeitspaketen	5
	4 Vergleich des Standes des Projekts mit der ursprünglichen Arbeits- und Zeitplanung	22
	5 Literatur	23

Der vorliegende Endbericht wurde wie geplant in Zusammenarbeit der Projektpartner erstellt und dem BBSR zum 30.04.2014 vorgelegt.

Dieser Endbericht enthält 55 Seiten Text.

**Der Forschungsbericht wurde mit Mitteln der Forschungsinitiative Zukunft Bau des Bundesinstituts für Bau-, Stadt und Raumforschung gefördert. (Aktenzeichen: II 3-F20-10-1-137 / SWD-10.08.18.7-12.06)
Die Verantwortung für den Inhalt des Berichtes liegt bei den Autoren.**

Endbericht

Technologieentwicklung leichter, flexibler Photovoltaikmodule auf der Basis von ETFE und CIGS-Foliensolarzellen für die Architektur
Förderkennzeichen: II 3-F20-10-1-137 / SWD-10.08.18.7-12.06

Technische Universität Dresden

Fakultät Bauingenieurwesen
Institut für Baukonstruktion
Prof. Dr.-Ing. Bernhard Weller

www.bauko.bau.tu-dresden.de

28.04.14 CK 2/55

1 Motivation und Ausgangssituation

Membrankonstruktionen erlauben die Errichtung sehr wirtschaftlicher und ästhetischer Gebäudehüllen in vielfältigster Kontur, die viel Luft und Tageslicht ins Innere lassen. Sie faszinieren durch Transparenz bzw. Transluzenz, Leichtigkeit und Dynamik. Dabei gilt die Bauweise einer gespannten Haut trotz der gewaltigen Entwicklung in den vergangenen beiden Jahrzehnten immer noch als außergewöhnlich. Die häufig großen zur Sonne ausgerichteten Flächen ohne störende und verschattende Auf- und Einbauten sind bisher nicht zur solaren Energiegewinnung nutzbar, da keine gebrauchstauglichen Photovoltaik (PV)-Systemlösungen zur Verfügung stehen. Lediglich prototypisch wurden bereits Solarzellen in Kissenkonstruktionen eingesetzt, wobei die Entwicklungen nicht bis hin zu einem Bauprodukt führten. Die dabei verwendeten Dünnschichtsolarzellen bestanden durchweg aus amorphem Silizium. Lange Zeit waren flexible PV-Lamine einzig auf der Basis dieser Technologie möglich, da sie weniger empfindlich auf Feuchte reagiert und eine ETFE/EVA-Abdeckung als dauerhaft witterungsbeständige Einbettung genügt. Die Zellen besitzen jedoch nur geringe Wirkungsgrade. Deutlich höhere Wirkungsgrade sind mit CIGS-Solarzellen erreichbar, die zudem hochflexibel, extrem leicht und ultradünn sind. Mit Hilfe einer direkten Integration dieser Solarzellen in das Membranmaterial kann ein neues Anwendungsfeld für die PV-Technologie erschlossen werden. Allerdings sind die CIGS-Foliensolarzellen sehr feuchteempfindlich, weshalb sie eine wasserdampfdichte Abdeckung erfordern. Derzeit sind die im Bauwesen geforderten Lebensdauern nur mit Glas als dampfdiffusionsdichte Frontabdeckung zu erreichen. Als Material für Membrankonstruktionen hat sich die Copolymerfolie Ethylen-Tetrafluorethylen (ETFE) aufgrund seiner ausgezeichneten mechanischen Eigenschaften und der extrem guten Beständigkeit schon seit Jahrzehnten weltweit im Baubereich und als transparentes Deck- und Trägermaterial von Solarmodulen bewährt. Als Baustoff zeichnet es sich durch eine selbstreinigende Oberfläche, ein gutes Brandverhalten und eine nahezu vollständige Recyclingfähigkeit aus. Allerdings ist ETFE-Folie nicht dampfdiffusionsdicht, weshalb sie nicht ohne weiteres als alternative Barrierschicht und Abdeckung für CIGS-Solarzellen dienen kann. Damit besteht der Forschungsansatz des vorliegenden Projektes in der Modifizierung bzw. Optimierung von ETFE-Folie hinsichtlich einer wirksamen Feuchtebarriere und in der daran anschließenden Entwicklung eines PV-Laminats aus Foliensolarzelle und ETFE.

Zum vorliegenden Forschungsansatz der „Technologieentwicklung leichter, flexibler Photovoltaikmodule auf Basis von ETFE und CIGS-Foliensolarzellen“ sind keine Ergebnisse aus vorhergehenden Forschungsprojekten vorhanden, was auch eine Recherche des Fraunhofer Informationszentrum Raum und Bau in Stuttgart zum Projektbeginn bestätigte.

Endbericht

Technologieentwicklung leichter, flexibler Photovoltaikmodule auf der Basis von ETFE und CIGS-Foliensolarzellen für die Architektur
Förderkennzeichen: II 3-F20-10-1-137 / SWD-10.08.18.7-12.06

Technische Universität Dresden

Fakultät Bauingenieurwesen
Institut für Baukonstruktion
Prof. Dr.-Ing. Bernhard Weller

www.bauko.bau.tu-dresden.de

28.04.14 CK 3/55

2 Projektablauf

Das Projekt war in folgende Arbeitspakete gegliedert:

- AP 0** Koordination
- AP 1** Rand- und Rahmenbedingungen
- AP 2** Weiterentwicklung und Optimierung der ETFE-Folie
- AP 3** Entwicklung und Untersuchung von ETFE-PV-Elementen
- AP 4** Herstellung und Untersuchung von Prototypen
- AP 5** Berichte und Publikationen

Im ersten Schritt (AP1) trugen die Partner die Grundlagen leichter Hüllkonstruktionen, ETFE-Folien und flexibler Photovoltaik zusammen und erstellten mit Hilfe eines Freibewitterungsprüfstandes ein Anforderungsprofil für die zu entwickelnden ETFE-PV-Elemente. Aufgrund des nichtlinearen Verhaltens von Membrankonstruktionen (Form, Verhalten unter Last) sowie der Änderung der klimatischen Verhältnisse im Folienkissen durch das Hinzufügen der PV (Temperatur, Feuchte) waren Untersuchungen an Modellaufbauten erforderlich, um ein realistisches Beanspruchungsprofil zu ermitteln.

Entsprechend der hohen, teils gegensätzlichen Anforderungen sollte die ETFE-Folie im zweiten Arbeitspaket (AP2) bezüglich der erforderlichen Dampfdiffusionsdichtigkeit, Haftungsfähigkeit und Kompatibilität mit möglichen Einbettungsmaterialien im Laminat optimiert werden.

Um die modifizierte ETFE-Folie im nächsten Schritt (AP3) mit den Solarzellen zu verbinden, wurden beide Fügepartner zunächst separat an Materialproben auf ihre Beanspruchbarkeit untersucht, um dann geeignete Fügeverfahren auszuwählen und an kleinteiligen gefügten Proben die mechanische und elektrische Leistungsfähigkeit sowie die Alterungsbeständigkeit zu ermitteln. Biege- weiche Werkstoffe wie ETFE verformen sich unter Lasteinwirkung (Konstruktionsdehnung) und Temperatureinwirkung (Kriechen, Relaxation). Die resultierenden Dehnungen sollten versuchstechnisch ermittelt werden, um sicherzustellen, dass diese von den Solarzellen in Verbindung mit ihrem Träger oder aber von der Fügung aufgenommen werden können.

Gefügte ETFE-PV-Elemente wurden anschließend als Prototypen hergestellt und als Modellaufbau im Freibewitterungsstand auf ihre Praxistauglichkeit geprüft (AP4).

Zur Verbreitung der entwickelten Technologie wurden das Forschungsprojekt in Berichten und Posterpublikationen zusammengefasst (AP5).

Das Projekt hatte eine ursprüngliche Laufzeit von 18 Monaten (21.05.2012 bis 21.11.2013). Die zeitliche Planung kann der Darstellung in Bild 1 entnommen werden.

Endbericht

Technologieentwicklung leichter, flexibler Photovoltaikmodule auf der Basis von ETFE und CIGS-Foliensolarzellen für die Architektur
 Förderkennzeichen: II 3-F20-10-1-137 / SWD-10.08.18.7-12.06

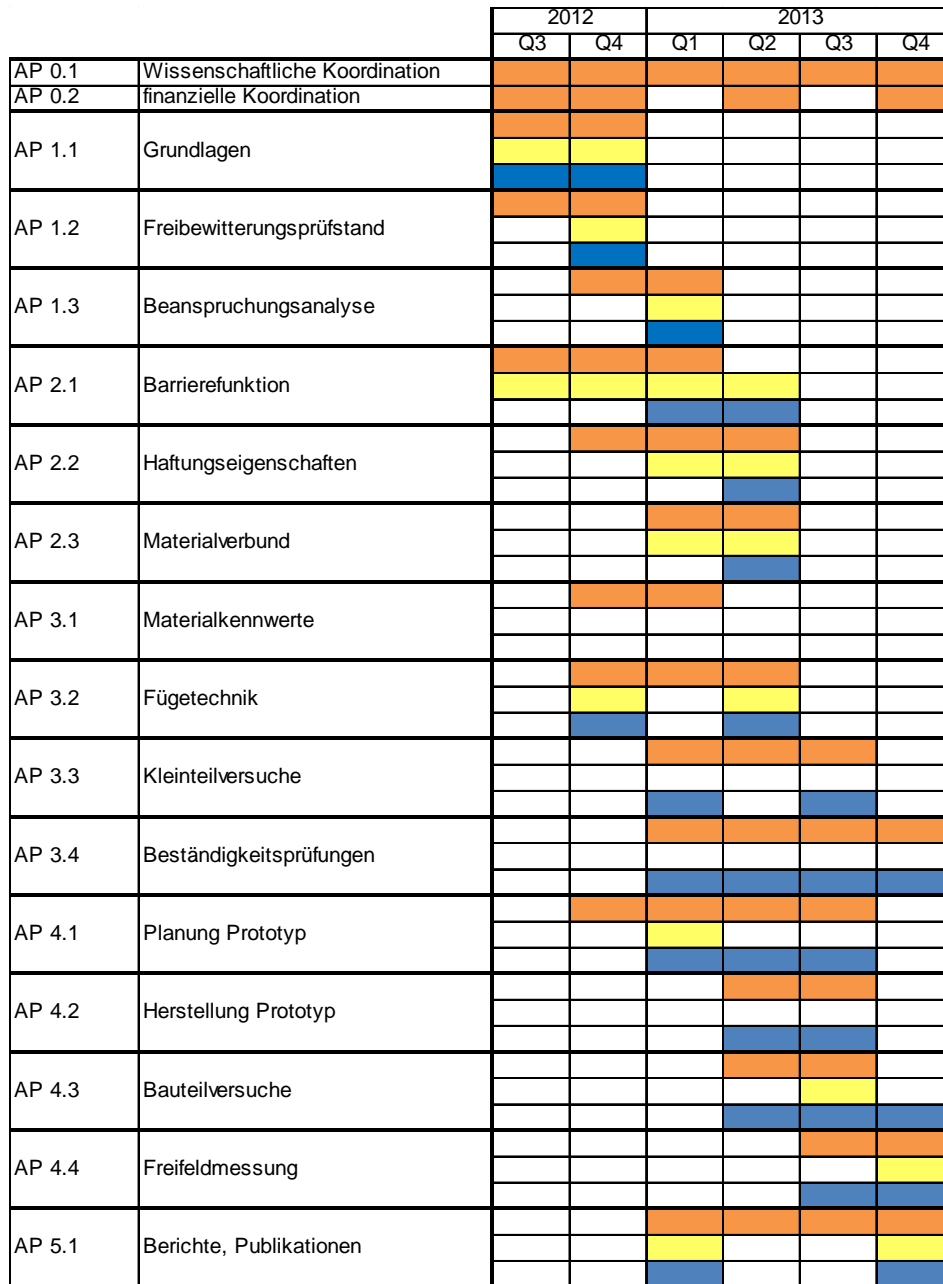
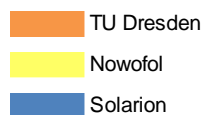


Bild 1 Zeitplanung des Projektes ETFE-PV.



Es wurde eine kostenneutrale Projektverlängerung beantragt, um weitere Untersuchungen an den Prototypen durchführen zu können. Die Projektverlängerung wurde bis zum 30.04.2014 bewilligt.

Endbericht

Technologieentwicklung leichter, flexibler Photovoltaikmodule auf der Basis von ETFE und CIGS-Foliensolarzellen für die Architektur
Förderkennzeichen: II 3-F20-10-1-137 / SWD-10.08.18.7-12.06

Technische Universität Dresden

Fakultät Bauingenieurwesen
Institut für Baukonstruktion
Prof. Dr.-Ing. Bernhard Weller

www.bauko.bau.tu-dresden.de

28.04.14 CK 5/55

3 Ergebnisse aus den Arbeitspaketen

3.1 Arbeitspaket 1

Grundlagen - Hüllkonstruktionen

Membranfolien, insbesondere aus ETFE, werden für Dach- und Fassadenkonstruktionen repräsentativer Gebäude rund um die Welt eingesetzt. Als einlagige, mechanisch vorgespannte Konstruktionen sind sie als offene Sonnenschutzsegel sowie in Hof- und Stadionüberdachungen einsetzbar und zum Beispiel in japanischen Gewächshäusern weit verbreitet. Die innovative Bauweise mit Membrankissen bietet Architekten und Planern ein weiteres einzigartiges gestalterisches Potenzial, weshalb diese bei Bauten jeglicher Größenordnung Anwendung finden, beispielsweise als permanente oder temporäre Überdachungen und Fassaden für Sportstätten, stützenfreie Überdachungen öffentlicher Plätze, transparente Schwimmhallen oder Flugsteig-Überdachungen.

Die besonderen Vorteile von Gebäudehüllen ergeben sich aus dem geringen Gewicht der ETFE-Folien bei gleichzeitig großer Festigkeit. So können große Spannweiten mit minimalem Materialaufwand überbrückt und Bauvolumina umschlossen werden, die mit traditionellem Materialaufwand gar nicht oder nur unwirtschaftlich möglich gewesen wären. Membrankonstruktionen erlauben zudem kurze Bauzeiten und dank einstellbarer Lichtdurchlässigkeit eine natürliche Belichtung ohne Blendung. Die Möglichkeiten zur freien Formgebung, der geringere Reinigungsaufwand und die sehr gute Raumakustik sind weitere positive Eigenschaften, die in Zukunft zu einem verstärkten Einsatz von Membrankonstruktionen im Bauwesen führen werden.

Im Sinne einer energetischen Optimierung ermöglicht ETFE die passive Solarenergienutzung in Form von Tageslicht und Wärme. Die Folien können mit Hilfe von Beschichtungen oder als mehrlagige Kissenkonstruktionen zum Wärmeschutz beitragen. Durch Einfärbung oder Bedruckung lassen sich zudem Funktionalitäten, wie Lichtfilter oder Sonnenschutz, hinzufügen.

Die konstruktive Herausforderung ergibt sich aus dem nichtlinearen Materialverhalten der Folie sowie aus den Wechselwirkungen der Folienkissen mit der Umgebung. Durch Luftzufuhr in den Innenraum werden die Membranen von pneumatischen Kissenkonstruktionen stabilisiert und nach außen gewölbt. Dabei sind die Kissenkammern konstant unter Druck (Überdruck ca. 200 bis 1000 Pa) zu halten. Dies erfolgt mithilfe eines automatisch gesteuerten Systems, welches getrocknete Luft (Vermeidung von Schimmel- und Tauwasserbildung) in jedes einzelne Kissen pumpt. Der Innendruck lässt sich damit dem Bedarf an abzutragenden Wind- oder Schneelasten anpassen. Der Lastabtrag erfolgt durch Zugkräfte in der umhüllenden Membran. Kurzzeitige Lasten wie Wind führen dazu, dass in 2-lagigen Kissen eine der beiden Folien weiter belastet, während die gegenüberliegende Folie entlastet wird. Langsam auftretende Lasten wie Schnee bewirken ein Zusammendrücken des Kissens bis hin zum Durchschlag, wenn die Last den Innendruck überschreitet.

Endbericht

Technologieentwicklung leichter, flexibler Photovoltaikmodule auf der Basis von ETFE und CIGS-Foliensolarzellen für die Architektur
Förderkennzeichen: II 3-F20-10-1-137 / SWD-10.08.18.7-12.06

Technische Universität Dresden

Fakultät Bauingenieurwesen
Institut für Baukonstruktion
Prof. Dr.-Ing. Bernhard Weller

www.bauko.bau.tu-dresden.de

28.04.14 CK 6/55

Die Kissen sind in beliebigen Geometrien konstruierbar, wobei die Formen aus einzelnen, thermisch miteinander verschweißten Folienbahnen (Foliendicke 100 bis 250 μm) hergestellt werden. Freitragende, schlauchförmige Kissen ohne Seilunterstützung können in Spannweiten von 3,5 bis 4 m ausgeführt werden, wohingegen polygonale oder runde Kissen mit Durchmesser von bis zu 8 m hergestellt werden können. Der Stich des Kissens beträgt in der Regel etwa 10 bis 15 % der Spannweite. Die Kissen werden über Keder in einem Leichtmetallprofil, welches auf einer Primärkonstruktion verschraubt ist, umlaufend verankert oder an weichen, unterspannten Tragwerken oder Seilen befestigt.

Der Lagenaufbau der pneumatischen Folienkissen kann unterschiedlich gestaltet werden. Die grundsätzlichen Möglichkeiten sind in Bild 2 dargestellt. Zusätzlich hierzu werden im Einsatz auch getrennte Befestigungen der einzelnen Folienebenen und Seilunterstützungen vorgenommen.

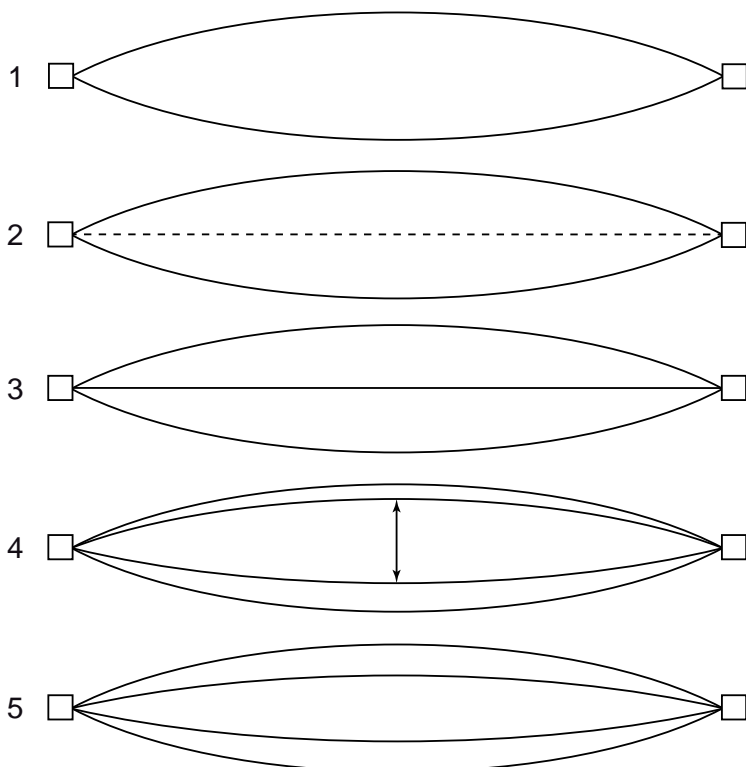


Bild 2 Möglichkeiten des Lagenaufbaus von Folienkissen nach [8]. 1 Einkammerkissen zweilagig, 2 Einkammerkissen dreilagig (perforierte Mittellage), 3 Zweikammerkissen dreilagig (ebene Mittellage), 4 Zweikammerkissen dreilagig (schaltbare Mittellage), 5 Dreikammerkissen vierlagig

Die bauphysikalischen Eigenschaften der pneumatischen Folienkissen für den Einsatz in der Gebäudehülle können durch verschiedene konstruktive Elemente beeinflusst werden. So optimiert eine 3-lagige Kissenführung, die das Kissen mit straff gespannter, nichttragender Mittellage in zwei Kammern aufteilt, den Wärme- und Klimaschutz. Die optischen Eigenschaften ergeben sich aus den reflektierten, absorbierten und transmittierten Strahlungsanteilen der Sonne

Endbericht

Technologieentwicklung leichter, flexibler Photovoltaikmodule auf der Basis von ETFE und CIGS-Foliensolarzellen für die Architektur
Förderkennzeichen: II 3-F20-10-1-137 / SWD-10.08.18.7-12.06

Technische Universität Dresden

Fakultät Bauingenieurwesen
Institut für Baukonstruktion
Prof. Dr.-Ing. Bernhard Weller

www.bauko.bau.tu-dresden.de

28.04.14 CK 7/55

und sind abhängig vom Material, der Anzahl der Folienlagen, der Foliendicken, dem Einfallswinkel der Strahlung sowie der Farbgebung der Folien. Ein Sonnenschutz kann neben der Bedruckung von Ober- und Mittelfolie auch durch dachintegrierte Beschattungssysteme erreicht werden. Die Folienkissen besitzen nur eine geringe Schalldämmung bzw. Schallabsorption, so dass bei Beeinträchtigungen durch Lärmquellen zusätzliche Schalldämm- bzw. Schallabsorptionsschichten notwendig sind.

Die beschriebenen Grundlagen zu Kissenkonstruktionen und deren Eigenschaften sind den Literaturstellen [1] bis [5] entnommen. Weiterführende Informationen finden sich ebendort.

Die Tabelle 1 gibt einen Überblick zu verschiedenen Gebäuden weltweit, in denen ETFE-Kissen in unterschiedlichen Einbausituationen verwendet werden.

Grundlagen - ETFE-Folie

ETFE-Folie wird nunmehr seit über 25 Jahren als hochtransparente, bedruckte oder eingefärbte Membranfolie in der Architektur als Dach- oder Fassadenfolie eingesetzt. Bei dem eingesetzten Rohstoff ETFE handelt es sich um einen Fluorkunststoff bestehend aus einem alternierenden Co-Polymer aus Ethylen und Tetrafluorethylen (Bild 3). Dieser zählt zu der Gruppe der Hochleistungspolymeren und gewinnt aufgrund seiner besonderen Eigenschaften in der Architektur eine immer größere Bedeutung.

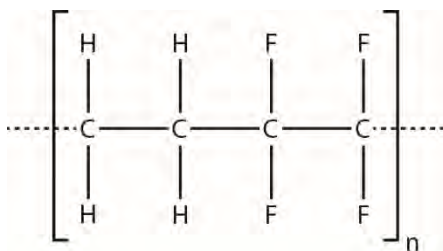


Bild 3 Molekularer Aufbau des Copolymeren ETFE aus den Monomeren Ethylen und Tetrafluorethylen.

Im Folgenden werden die besonderen Eigenschaften der ETFE-Folien beschrieben. Neben der hohen Transparenz im sichtbaren Licht besitzt ETFE-Folie auch eine hohe UV-Lichtdurchlässigkeit. Erfahrungen zeigen, dass UV-Licht ein lebenswichtiger Faktor für die Tier- und Pflanzenwelt sein kann. Die Gesamtlichtdurchlässigkeit einer 200 µm dicken NOWOFLON®ET Folie beträgt über 90 % wie in Bild 4 dargestellt.

Endbericht

Technologieentwicklung leichter, flexibler Photovoltaikmodule auf der Basis von ETFE und CIGS-Foliensolarzellen für die Architektur
 Förderkennzeichen: II 3-F20-10-1-137 / SWD-10.08.18.7-12.06

Tabelle 1 Überblick zu Gebäuden mit ETFE-Kissen in unterschiedlichen Einbausituationen.

Gebäude	Standort	Geometrie	Größe	Einbausituation	Anzahl der Kissen	Fläche [m ²]	Nutzung des Gebäudes
Kleiner Schlosshof	Dresden	Rauten	unterschiedlich	Dach	256	140	Innenhof
Allianz Arena	München	Rauten	unterschiedlich	Fassade	2760	66.500	Sportveranstaltungen
Tropical Island	Halbe	Rauten	gleich (20,6 m x 15,8 m)	Dach	56	20.000	Schwimmhalle
Water Cube	Peking, China	Polyeder	unterschiedlich	Gebäudehülle	3000	100.000	Schwimmhalle
Eden Project	Cornwall, England	Sechsecke	gleich	Gebäudehülle	-	30.000	Botanischer Garten
Space Center	Leicester, England	Rechtecke	unterschiedlich (max. 20 m x 3 m)	Fassade	-	2.000	Raumfahrtmuseum
Khan Shatry Entertainment Centre	Astana, Kasachstan	Vierecke	unterschiedlich	Zeltkonstruktion	-	19.253	Entertainmentcenter
Masala-Regenwald-Gewächshaus	Zürich, Schweiz	Rechtecke	gleich (4 m x 52 m)	Dach	54	14600	Ökosystem-Halle
Gondwana-Land	Leipzig	Dreiecke	gleich	Dach	411	17900	Tropenhalle
DWI	Aachen	Linsen, Dreiecke	unterschiedlich	Dach	-	480	Innenhof
Bürgerhaus	Unterföhring	Dreiecke	gleich	Überdachung	32	530	Markt
Donauzentrum	Wien, Österreich	Vierecke	unterschiedlich	Fassade	-	535	Einkaufszentrum
Eisschnelllaufhalle	Inzell	Halbrund	gleich	Oberlichter	17	58	Eisschnelllaufhalle
Addidas Laces	Herzogenaurach	Trapeze	gleich	Überdachung	82	5000	Firmengebäude
Miroiterie Flon	Lausanne, Schweiz	Dreiecke	gleich	Fassade	-	820	Einkaufszentrum

Endbericht

Technologieentwicklung leichter, flexibler Photovoltaikmodule auf der Basis von ETFE und CIGS-Foliensolarzellen für die Architektur
Förderkennzeichen: II 3-F20-10-1-137 / SWD-10.08.18.7-12.06

Technische Universität Dresden

Fakultät Bauingenieurwesen
Institut für Baukonstruktion
Prof. Dr.-Ing. Bernhard Weller

www.bauko.bau.tu-dresden.de

28.04.14 CK 9/55

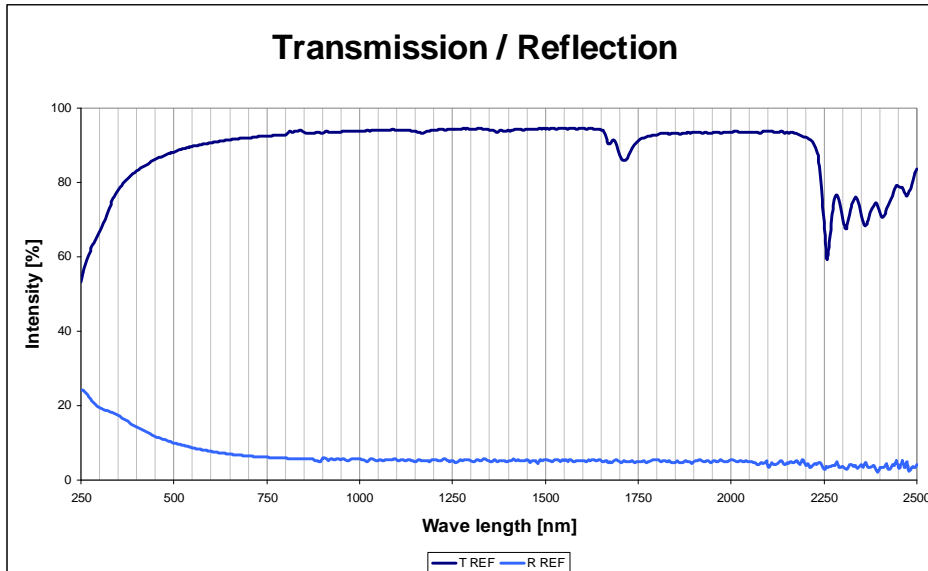


Bild 4 Lichttransmission und -reflexion einer ETFE-Folie (NOWOFLON®ET, Dicke 200 µm) im Wellenlängenbereich zwischen 250 und 2500 nm.

Eine weitere bedeutende Eigenschaft von ETFE ist dessen Schwerentflammbarkeit, da in der Baubranche der Brandschutz natürlich ein wichtiges Thema ist und eine Menge an Anforderungen voraussetzt. Hierfür ist der Werkstoff ETFE sehr gut geeignet und dementsprechend zertifizierbar. NOWOFLON®ET Folie beispielsweise erfüllt als schwerentflammbarer Baustoff die Anforderungen gemäß DIN 4102 – B1 [6] sowie DIN EN 13501-1 [7], d.h. die Folie ist selbstlöschend und nicht brennend abtropfend.

Zusätzlich besitzt der Werkstoff ETFE aufgrund seiner Molekularstruktur eine überragende Beständigkeit gegen allerlei Umwelteinflüsse. In ETFE sind die Wasserstoff-Atome teilweise durch Fluor-Atome substituiert und bilden somit einen schützenden Mantel um die Kohlenstoffkette.

Die Erfahrungen mit der NOWOFLON®ET Folie gehen auf über 25 Jahre zurück in denen keinerlei Veränderungen hinsichtlich Optik oder Verschleiß zu erkennen waren und dies ohne Zusatz von sonst typischen Additiven wie z.B. UV-Stabilisatoren.

Für den Einsatz als Dachmembranwerkstoff bringt ETFE die absolut besten mechanischen Eigenschaften mit sich. Neben der hohen Reißfestigkeit sind hier u.a. die außerordentlich hohe Weiterreiß- und Durchstoßfestigkeit zu nennen. In der Praxis kommt es daher bei Schnitten oder Löchern zu keiner Rissausbreitung, wie es bei Geweben unter Last der Fall ist. Aufgrund der für ETFE typischen antiadhäsiven Oberflächeneigenschaft kommt es zu keiner Trübung der Folie durch Schmutz oder Staub und dies auch über langjährige Zeiträume. Meistens werden Verunreinigungen auf der Folienoberfläche selbstreinigend durch Wind und Regen wieder abgewaschen. [9]

Endbericht

Technologieentwicklung leichter, flexibler Photovoltaikmodule auf der Basis von ETFE und CIGS-Foliensolarzellen für die Architektur
Förderkennzeichen: II 3-F20-10-1-137 / SWD-10.08.18.7-12.06

Technische Universität Dresden

Fakultät Bauingenieurwesen
Institut für Baukonstruktion
Prof. Dr.-Ing. Bernhard Weller

www.bauko.bau.tu-dresden.de

28.04.14 CK 10/55

Grundlagen - Flexible Photovoltaik

Flexible Dünnschichtsolarzellen zählen heute zum Stand der Technik und werden kontinuierlich weiterentwickelt. Daraus resultierende Produkte bewegen sich in Marktsegmenten, welche von klassischen kristallinen Solarmodulen mit Glas und Rahmen nicht abgedeckt werden können. Die hervorzuhebenden Eigenschaften im Vergleich zu diesen sind deren Bruchempfindlichkeit und Biegsamkeit sowie das daraus resultierende minimale Gewicht des Verkapselungssystems, welches komplett auf Polymeren basiert.

Bild 5 zeigt eine Übersicht der Dünnschichttechnologien und wo sich Solarion hier positioniert. CIGS ist im Vergleich zum etablierten kristallinen Silizium eine relativ junge Technologie. Dieses Material weist auch auf flexiblen Substraten beschichtet ein hohes Wirkungsgradpotenzial auf. So konnte das Schweizer EMPA kürzlich einen Wirkungsgradrekord von über 20 % vermelden. Dieser liegt höher als der aktuelle Wirkungsgradrekord für multikristallines Silizium. Somit ist mittelfristig damit zu rechnen, dass die momentan noch bestehende Lücke von ca. 4 Wirkungsgrad-Prozentpunkten zwischen multikristallinen Siliziummodulen und CIGS-Modulen deutlich kleiner wird.

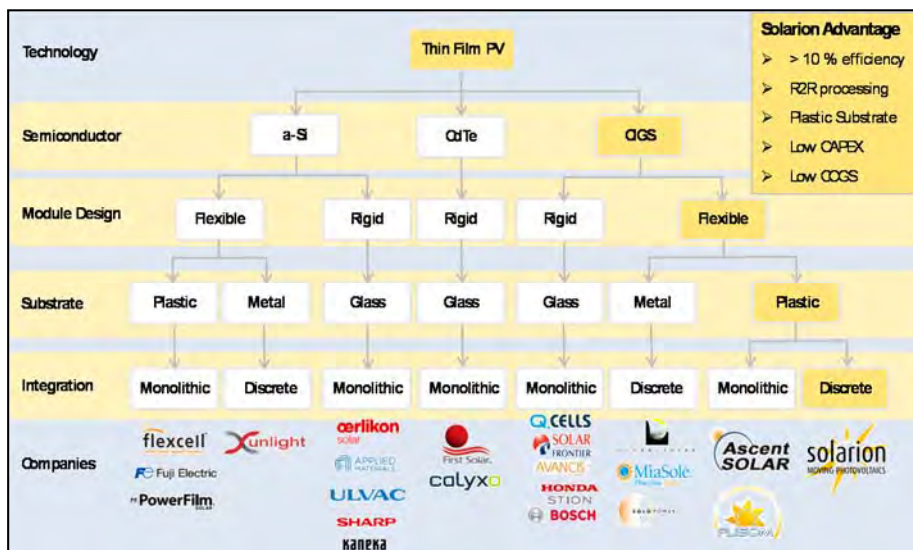


Bild 5 Einordnung der flexiblen CIGS-Technologie von Solarion in den Dünnschicht-Solarmarkt.

Eine wesentliche Fragestellung bei der Verwendung von Polymeren in Produkten mit einer zu erwartenden Nutzungsdauer von 20 bis 30 Jahren ist deren Haltbarkeit. Neben der primären Funktionalität der Energieerzeugung muss über die Nutzungsdauer auch die elektrische Sicherheit gewährleistet sein.

Dazu wurden im Modultechnikum und der Pilotlinie der Solarion AG in den vergangenen Jahren umfangreiche Untersuchungen und Klimatests durchgeführt und dabei ein haltbares, langlebiges und sicheres Verkapselungssystem für flexible Solarzellen entwickelt. Die Untersuchungsschwerpunkte lagen hierbei auf Temperatur-, Feuchte-, Temperaturwechsel- und UV-Beanspruchung der Materialien und Module. In Bild 6, Bild 7 und Bild 8 sind hier die entsprechenden Ergebnisse zusammengefasst.

Endbericht

Technologieentwicklung leichter, flexibler Photovoltaikmodule auf der Basis von ETFE und CIGS-Foliensolarzellen für die Architektur
 Förderkennzeichen: II 3-F20-10-1-137 / SWD-10.08.18.7-12.06

Im Rahmen der Wärme-Feuchte-Bewitterung konnte nachgewiesen werden, dass das Verkapselungssystem mehr als das Dreifache der im PV-Modulstandard IEC 61646 festgeschriebenen Prüfdauer übersteht. Vergleichbares betrifft auch die Temperaturwechselprüfung. Hier liegt die Mindestanforderung bei 200 Temperaturzyklen.

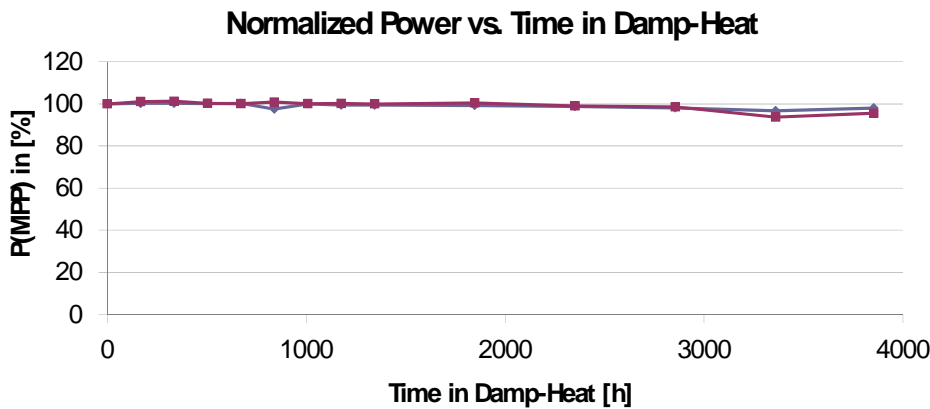


Bild 6 Stabilität von Solarion-Modulen in der beschleunigten Alterung: Damp-Heat-Test (85 °C / 85 % rel. Luftfeuchte).

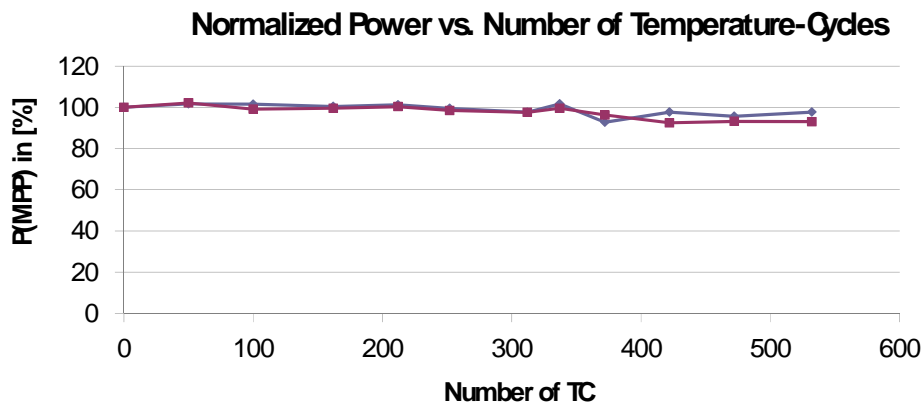


Bild 7 Stabilität von Solarion-Modulen in der beschleunigten Alterung: Temperaturzyklentest (-40...+85 °C, ca. 4,5 h je Zyklus)

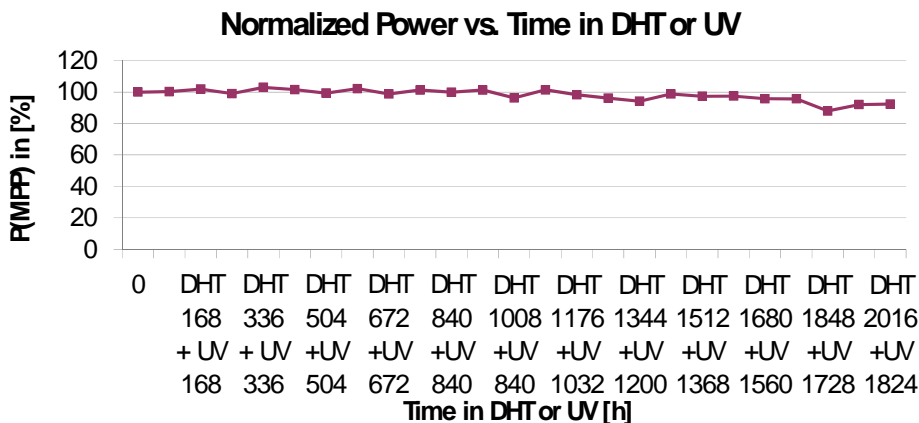


Bild 8 Stabilität von Solarion-Modulen in der beschleunigten Alterung: Sequenzieller Feuchte-UV-Test (85 °C / 85 % rel. Luftfeuchte und UV-Bewitterung nach IEC 61646 mit wöchentlichem Wechsel).

Endbericht

Technologieentwicklung leichter, flexibler Photovoltaikmodule auf der Basis von ETFE und CIGS-Foliensolarzellen für die Architektur
Förderkennzeichen: II 3-F20-10-1-137 / SWD-10.08.18.7-12.06

Technische Universität Dresden

Fakultät Bauingenieurwesen
Institut für Baukonstruktion
Prof. Dr.-Ing. Bernhard Weller

www.bauko.bau.tu-dresden.de

28.04.14 CK 12/55

Da in den gängigen Photovoltaiknormen keine kombinierten UV-Feuchte-Bewitterungen vorgegeben sind, jedoch einige Fehlermechanismen nur durch Belastung der Prüfmuster mit beiden Einflussgrößen auftreten, wurde zur Untersuchung eine geeignete Testsequenz entwickelt, die aus einem wöchentlichen Wechsel zwischen Wärme-Feuchte- und UV-Test gemäß IEC 61646 besteht und diese zur Belastung der Module angewendet (Abb. 4). Die ermittelten Werte dienen für das Projekt als Referenzdaten für die mit ETFE-Kissen kombinierten bzw. in diese integrierten Solarmodule.

Zum Nachweis der Biegebeanspruchbarkeit der Referenzverkapselung wurden Untersuchungen mit einer zyklischen Verbiegung und Rückbiegung auf einem Biegeumlaufteststand bei unterschiedlichen Temperaturen durchgeführt. Hierbei wurden die Solarmodule sowohl konvex als auch konkav in Längs- und Querrichtung gebogen. Der Biegeradius betrug 150 mm. Es wurden nacheinander jeweils 2000 Biegezyklen bei 20 °C, -20 °C und 50 °C an den gleichen Prüfmustern angewendet. Hierbei konnte die hohe Biegestabilität der Solarzellen im Referenzverkapselungssystem nachgewiesen werden.

Die Ergebnisse sind in Bild 9 veranschaulicht. Nach der Durchführung der Biegetests wurden die Module für weitere 1000 Stunden in der Wärme-Feuchte-Lagerung bei 85 °C und 85 % relativer Luftfeuchte belastet. Hier zeigte sich, dass die Solarmodule nach dieser Prüfung immer noch mindestens 95 % ihrer ursprünglichen Leistung aufwiesen und durch die Biegetests keine Schädigung eingetreten ist.

TPO TLK (25°C, -20°C, 50°C): Normalized Power vs. Number of Bendings & Straightenings

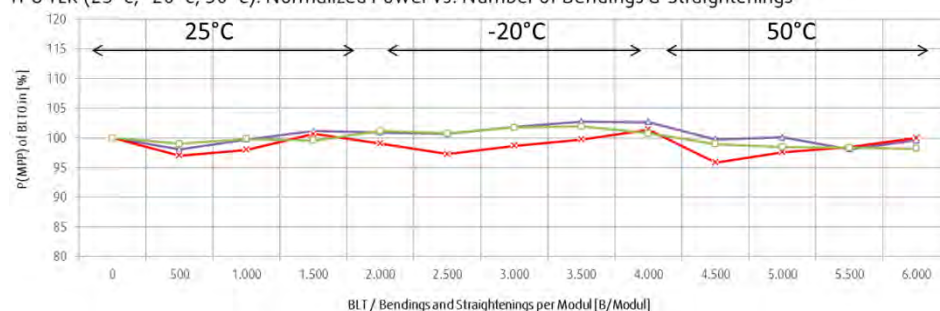


Bild 9 Verlauf der elektrischen Leistung von flexiblen Modulen mit Referenzverkapselung in Abhängigkeit der Biegezyklen.

Endbericht

Technologieentwicklung leichter, flexibler Photovoltaikmodule auf der Basis von ETFE und CIGS-Foliensolarzellen für die Architektur
Förderkennzeichen: II 3-F20-10-1-137 / SWD-10.08.18.7-12.06

Technische Universität Dresden

Fakultät Bauingenieurwesen
Institut für Baukonstruktion
Prof. Dr.-Ing. Bernhard Weller

www.bauko.bau.tu-dresden.de

28.04.14 CK 13/55

Freibewitterungsprüfstand

Im Forschungsprojekt sollten die Dauerhaftigkeit und die Gebrauchstauglichkeit von Verbänden aus ETFE und PV-Modulen im praktischen Einsatz untersucht werden. Dazu sollten die auftretenden Beanspruchungen insbesondere hinsichtlich Temperatur- und Luftfeuchteentwicklung durch Versuche an Modellaufbauten von Kissenkonstruktionen geklärt werden.

Dazu entwickelte der Projektpartner TU Dresden einen Freibewitterungsprüfstand. Dieser bestand aus einer rechteckigen Unterkonstruktion mit den Maßen 2 m x 3 m mit darauf befestigten Kederschiene, die wiederum das Kissen hielten (Bild 10).



Bild 10 Unterkonstruktionen zur Befestigung der ETFE-Kissen-Prototypen.

In Übereinstimmung der Projektpartner wurde die Entwicklung der Prototypen mit darauf beziehungsweise darin befindlichen PV-Modulen aus Arbeitspaket 4 vorgezogen (Entwicklungsbeschreibung siehe Abschnitt 3.4 - Entwicklung / Herstellung ETFE-Kissen-Prototyp), um realitätsnähere Messergebnisse zu erhalten.

Es wurden Sensoren für Temperatur- und Luftfeuchtemessungen an verschiedenen Positionen im Kissen angebracht. Zusätzlich wurde ein Einstrahlungssensor zwischen den beiden Prototypen positioniert, um die Einstrahlung in etwa auf Höhe der PV-Module zu erfassen. Die folgenden Bilder (Bild 11 bis Bild 16) zeigen die Einbausituation und die Lage der einzelnen Sensoren.

Endbericht

Technologieentwicklung leichter, flexibler Photovoltaikmodule auf der Basis von ETFE und CIGS-Foliensolarzellen für die Architektur
Förderkennzeichen: II 3-F20-10-1-137 / SWD-10.08.18.7-12.06

Technische Universität Dresden

Fakultät Bauingenieurwesen
Institut für Baukonstruktion
Prof. Dr.-Ing. Bernhard Weller

www.bauko.bau.tu-dresden.de

28.04.14 CK 14/55



Bild 11 ETFE-Kissen-Prototyp mit außenliegenden PV-Modulen.



Bild 12 ETFE-Kissen-Prototyp mit innenliegenden PV-Modulen.

In jede Kammer der dreilagigen ETFE-Kissen wurden Messsensoren eingebracht. Dazu erfolgte im ETFE-Kissen-Prototyp mit außenliegenden PV-Modulen die Kabelführung durch die unterste Kissenlage. Um einen der Sensoren in die obere Kissenkammer zu schieben, wurde eines der, in der Mittellage zur Luftversorgung der oberen Kammer vorhandenen Löcher, genutzt. Die Sensoren wurden so angeordnet, dass sie sich unter einem der PV-Module befanden.

Endbericht

Technologieentwicklung leichter, flexibler Photovoltaikmodule auf der Basis von ETFE und CIGS-Foliensolarzellen für die Architektur
Förderkennzeichen: II 3-F20-10-1-137 / SWD-10.08.18.7-12.06

Technische Universität Dresden

Fakultät Bauingenieurwesen
Institut für Baukonstruktion
Prof. Dr.-Ing. Bernhard Weller

www.bauko.bau.tu-dresden.de

28.04.14 CK 15/55



Bild 13 Lage der Temperatur- und Luftfeuchtesensoren im ETFE-Kissen-Prototyp mit außenliegenden PV-Modulen.

Im ETFE-Kissen-Prototyp mit innenliegenden PV-Modulen wurde der Sensor zur Erfassung von Temperatur und Luftfeuchte in der oberen Kissenkammer durch die Oberlage des ETFE-Kissens geführt und über einem der PV-Module positioniert. Der zweite Sensor wurde durch die Unterseite des ETFE-Kissens unterhalb von einem der PV-Module in die untere Kissenkammer geschoben.



Bild 14 Lage des Temperatur- und Luftfeuchtesensors im ETFE-Kissen-Prototyp mit innenliegenden PV-Modulen in der oberen Kissenkammer.

Endbericht

Technologieentwicklung leichter, flexibler Photovoltaikmodule auf der Basis von ETFE und CIGS-Foliensolarzellen für die Architektur
Förderkennzeichen: II 3-F20-10-1-137 / SWD-10.08.18.7-12.06

Technische Universität Dresden

Fakultät Bauingenieurwesen
Institut für Baukonstruktion
Prof. Dr.-Ing. Bernhard Weller

www.bauko.bau.tu-dresden.de

28.04.14 CK 16/55

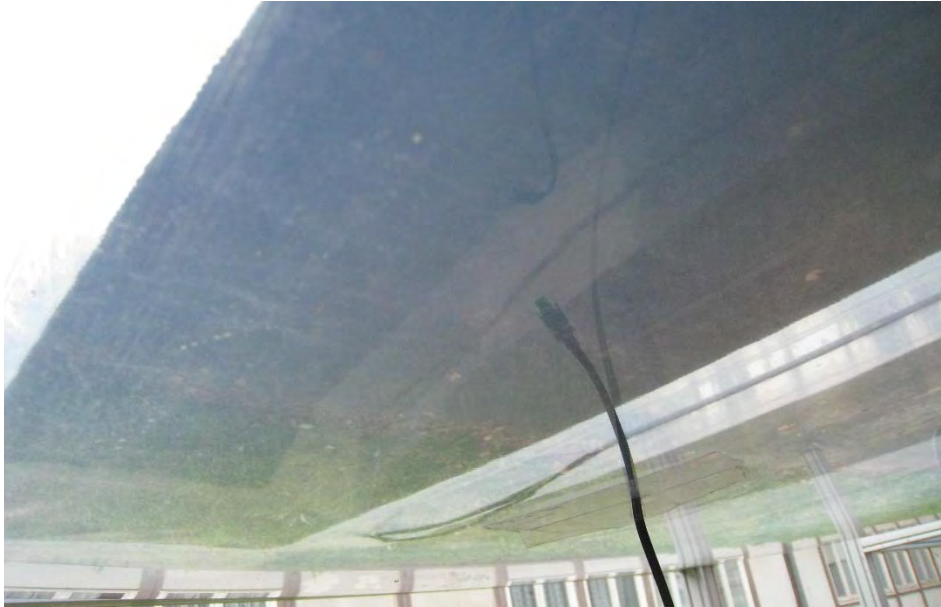


Bild 15 Lage des Temperatur- und Luftfeuchtesensors im ETFE-Kissen-Prototyp mit innenliegenden PV-Modulen in der unteren Kissenkammer.

Der Einstrahlungssensor wurde am Rahmen des ETFE-Kissen-Prototyps mit innenliegenden PV-Modulen befestigt.



Bild 16 Lage des Einstrahlungssensors.

Des Weiteren wurde jeweils ein Temperatur- und Luftfeuchtesensor in der Luftzuführung der ETFE-Kissen unmittelbar nach dem Lufttrocknungsgerät und im geschützten Außenbereich angebracht. Die Tabelle 2 gibt einen Überblick zu den Messwerten für unterschiedliche Wetterlagen.

Endbericht

Technologieentwicklung leichter, flexibler Photovoltaikmodule auf der Basis von ETFE und CIGS-Foliensolarzellen für die Architektur
Förderkennzeichen: II 3-F20-10-1-137 / SWD-10.08.18.7-12.06

Technische Universität Dresden

Fakultät Bauingenieurwesen
Institut für Baukonstruktion
Prof. Dr.-Ing. Bernhard Weller

www.bauko.bau.tu-dresden.de

28.04.14 CK 17/55

Datum Uhrzeit	Wetter- lage		Außen- temperatur	PV-Module außen		PV-Module innen		Luft- zufuhr
				oben	unten	oben	unten	
18.11.2013 14:47	bewölkt	Temperatur in °C	9,19	8,12	8,68	8,95	9,08	23,04
		rel. Luftfeuchte in %	73,64	53,56	51,47	46,78	45,13	11,98
26.11.2013 07:42	bewölkt	Temperatur in °C	0,21	-0,56	0,14	-0,51	0,34	22,20
		rel. Luftfeuchte in %	82,93	82,60	63,25	68,18	65,17	10,57
18.12.2013 08:00	bewölkt	Temperatur in °C	-0,05	-1,61	-0,45	-1,68	-0,49	22,88
		rel. Luftfeuchte in %	82,31	72,90	59,22	63,66	60,35	10,29
22.01.2014 11:24	leichter Schneefall	Temperatur in °C	0,13	0,48	0,44	0,72	0,57	23,08
		rel. Luftfeuchte in %	83,61	75,05	64,10	61,88	63,21	10,60
29.01.2014 10:45	stark bewölkt	Temperatur in °C	-2,12	-2,32	-2,23	-1,94	-1,86	21,20
		rel. Luftfeuchte in %	78,14	63,17	56,32	55,01	55,50	9,00
31.01.2014 10:50	stark bewölkt	Temperatur in °C	3,93	5,92	5,36	7,38	5,10	22,16
		rel. Luftfeuchte in %	80,20	45,85	49,50	38,91	40,45	11,48
04.03.2014 14:20	bewölkt	Temperatur in °C	15,60	17,46	16,87	20,19	16,35	26,16
		rel. Luftfeuchte in %	42,30	33,16	38,21	27,68	28,95	11,30
11.03.2014 12:45	klar sonnig	Temperatur in °C	27,31	39,54	38,00	44,56	32,04	25,20
		rel. Luftfeuchte in %	21,28	14,62	19,50	11,59	12,33	8,99

Zunächst konnte festgestellt werden, dass die Luftzufuhr der Kissen mit Temperaturen zwischen 21 und 26 °C und sehr geringer relativer Luftfeuchte von etwa 10% erfolgte. Dies ging damit einher, dass sich die Luftversorgung inklusive der Trocknungseinheit im beheizten Innenbereich befand. Aus dieser Tatsache heraus, wurde erwartet, einen für die wasserempfindlichen flexiblen CIGS-PV-Module günstigen Einsatzbereich zu schaffen.

Tabelle 2 Messwerte für Temperatur und relative Luftfeuchte in den einzelnen Kammern der ETFE-Kissen-Prototypen für unterschiedliche Wetterlagen.

Allerdings zeigte sich, dass die Luftfeuchtigkeit in den Kissenkammern stark von der Luftfeuchtigkeit der Außenluft abhing und zum Teil sehr hohe Werte annahm. Die große Wasserdampfdurchlässigkeit der ETFE-Folie bedingt, dass trotz dauerhafter Luftversorgung mit trockener Luft keine konstant niedrigen relativen Luftfeuchten in den Kissenkammern eingestellt werden konnten. Die in Tabelle 2 rot markierten Werte für die relative Luftfeuchte zeigen dies sehr deutlich. Es handelt sich dabei um Messwerte aus der oberen Kissenkammer des ETFE-Kissen-Prototyps mit außenliegenden PV-Modulen. Diese unterscheiden sich enorm von den vergleichbaren Werten der anderen Kissenkammern. Zu den Messzeitpunkten waren die ETFE-Kissen leicht oder völlig mit Schnee bedeckt bzw. Regen ausgesetzt gewesen. Dabei drang Wasser in den Zwischenraum zwischen PV-Modul und ETFE-Kissen-Oberlage (siehe Bild 17), welches nach und nach in die obere Kissenkammer diffundierte und dort für die sehr hohe Luftfeuchtigkeit sorgte.

Endbericht

Technologieentwicklung leichter, flexibler Photovoltaikmodule auf der Basis von ETFE und CIGS-Foliensolarzellen für die Architektur
Förderkennzeichen: II 3-F20-10-1-137 / SWD-10.08.18.7-12.06

Technische Universität Dresden

Fakultät Bauingenieurwesen
Institut für Baukonstruktion
Prof. Dr.-Ing. Bernhard Weller

www.bauko.bau.tu-dresden.de

28.04.14 CK 18/55

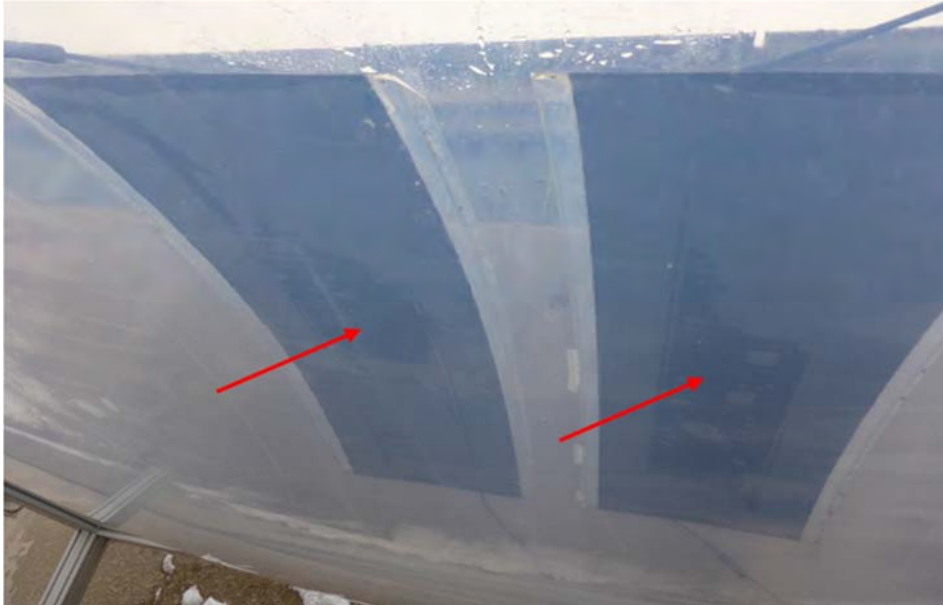


Bild 17 Feuchtigkeit zwischen PV-Modul und ETFE-Kissen-Oberlage.

Die Aufbausituation der ETFE-Kissen-Prototypen im nichtklimatisierten, von Gebäuden umgebenen Freigelände bedingt auch die Abhängigkeit der Temperaturen in den Kissenkammern von der Außenlufttemperatur. Da die Kissen über kein Abluftventil verfügen entsteht ein Hitzestau in den Kissen, so dass bei 27 °C Außentemperatur eine Maximaltemperatur von 45 °C in der oberen Kissenkammer des ETFE-Kissen-Prototyps mit innenliegenden PV-Modulen gemessen wurde. Hier wird die Erwärmung zusätzlich durch die darunterliegenden schwarzen PV-Module begünstigt. Da es sich hierbei um Messergebnisse aus dem sehr warmen Monat März 2014 handelt, ist davon auszugehen, dass noch deutlich höhere Temperaturen in den Sommermonaten, bedingt durch die dann noch größere Einstrahlung der Sonne, erreicht werden. Dies sollte durch die hohe Temperaturstabilität der CIGS-PV-Module aber unproblematisch sein.

Im Gegensatz zu diesen hohen Temperaturen wurden während des Messzeitraums im Winter auch negative Temperaturen erfasst. Dabei bildeten sich nach Regenniederschlag dünne Eisschichten auf den Kissen aus. Nach Schneefall im Januar 2014 befand sich auf beiden Kissen eine 8,5 cm starke Schneedecke (Bild 18), die sich durch darauffolgende, wechselnde Tau- und Frosteinflüsse in eine etwa 4 cm dicke Eisschicht umwandelte. Die dadurch vorhandene zusätzliche Last auf den ETFE-Kissen führte nicht zu Veränderungen durch Verformung. Die Wölbung der ETFE-Kissen wurde durch die kontinuierliche Luftzuführung aufrechterhalten. Die Bedeckung mit Schnee und Eis sorgte allerdings für deutlich reduzierte Leistungsausbeuten der PV-Module.

Endbericht

Technologieentwicklung leichter, flexibler Photovoltaikmodule auf der Basis von ETFE und CIGS-Foliensolarzellen für die Architektur
Förderkennzeichen: II 3-F20-10-1-137 / SWD-10.08.18.7-12.06

Technische Universität Dresden

Fakultät Bauingenieurwesen
Institut für Baukonstruktion
Prof. Dr.-Ing. Bernhard Weller

www.bauko.bau.tu-dresden.de

28.04.14 CK 19/55



Bild 18 ETFE-Kissen-Prototypen mit vollständiger Schneebedeckung.

Durch die verschiedenen Wittereinflüsse wurden weder an der Befestigung der PV-Module auf dem ETFE-Kissen-Prototyp mit außenliegenden PV-Modulen noch an den sonstigen durch Lamination gefügten Kissenbereichen Schäden verursacht. Ebenfalls schadlos überstanden die ETFE-Kissen-Prototypen einen mehrtägigen Stromausfall, der zum Versagen der Luftzuführung und damit zum Verlust des Überdrucks in den ETFE-Kissen führte.

Als besonderer Vorteil der Befestigung der PV-Module auf der Oberlage der ETFE-Kissen ist die Möglichkeit der Wartung und des Austauschs der PV-Module im eingebauten Zustand des ETFE-Kissens am Gebäude anzusehen. Werden dagegen die PV-Module auf der Mittellage befestigt, so ist im Fall eines Defektes an die PV-Module nur durch Öffnung des Kissens heranzukommen. In diesem Fall muss damit das ganze Kissen getauscht werden. Allerdings bietet die Befestigung auf der Mittellage den großen Vorteil, dass sich die Anschlussdosen und alle Verkabelung wettergeschützt im Inneren des Kissens befinden.

Endbericht

Technologieentwicklung leichter, flexibler Photovoltaikmodule auf der Basis von ETFE und CIGS-Foliensolarzellen für die Architektur
Förderkennzeichen: II 3-F20-10-1-137 / SWD-10.08.18.7-12.06

Technische Universität Dresden

Fakultät Bauingenieurwesen
Institut für Baukonstruktion
Prof. Dr.-Ing. Bernhard Weller

www.bauko.bau.tu-dresden.de

28.04.14 CK 20/55

3.2 Arbeitspaket 2

Barrierefunktion

Folienmaterialien besitzen ganz unterschiedliche Eigenschaften in Bezug auf ihre Permeabilität. Dies ist in Bild 19 anhand der Sauerstoff- und Wasserdampfdurchlässigkeit verschiedener Folien dargestellt.

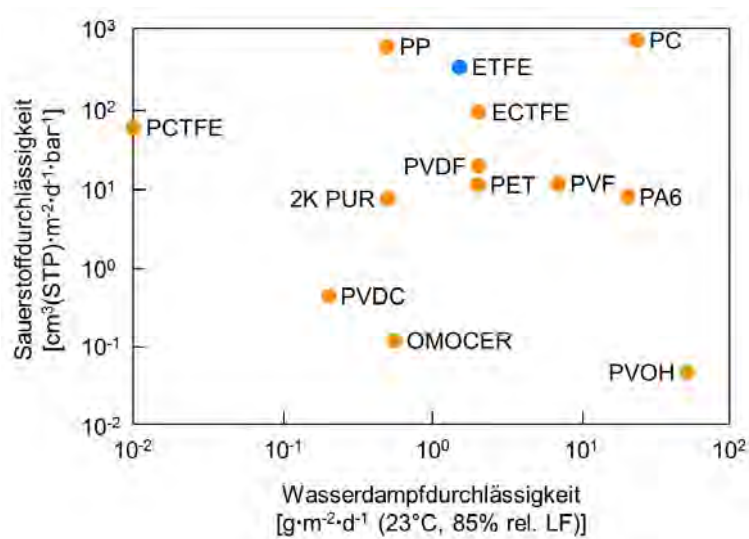


Bild 19 Wasserdampf- und Sauerstoffdurchlässigkeit verschiedener Folienmaterialien nach [9].

ETFE-Folien besitzen eine hohe Wasserdampfdurchlässigkeit (WVTR - Water Vapor Transmission Rate). CIGS-Foliensolarzellen verlangen aufgrund der hohen Empfindlichkeit gegenüber Feuchtigkeit eine Folie zur Einkapselung der Zelle mit einer Wasserdampfdurchlässigkeit von maximal $10^{-3} \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ bei einer Temperatur von 60 °C und einer relativen Luftfeuchtigkeit von 90% gemessen an einer $100 \text{ }\mu\text{m}$ dicken Folie. Diese Vorgaben erreicht keines der im Diagramm gezeigten Folienmaterialien. Damit sind auch ETFE-Folien als Abdeckmaterial für diese Solarzellen pro forma ungeeignet.

Zur Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit der vom Projektpartner Nowofol hergestellten ETFE-Folien wurden eigene Versuche durchgeführt. Dabei kam eine gravimetrische Methode zum Einsatz. Dazu wurden spezielle Vapometer mit einem Trockenmittel gefüllt und mit der ETFE-Folie überspannt. Unter einer kontrollierten Atmosphäre (23 °C und 85% relative Luftfeuchte) in einer Klimakammer erfolgten anschließend mehrtägige Lagerungen und tägliche Gewichtsbestimmungen. Daraus ergab sich unter den gewählten Versuchsbedingungen ein Mittelwert der Wasserdampfdurchlässigkeit der verwendeten ETFE-Folie von $1,50 \pm 0,12 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$. Eine analoge Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit der mit Barrierschichten modifizierten ETFE-Folien wurde hinfällig, da diese Folien die Barriereprüfung mittels PV-Minimodulen im Damp-Heat-Test nicht bestanden (siehe Abschnitt 3.3).

Endbericht

Technologieentwicklung leichter, flexibler Photovoltaikmodule auf der Basis von ETFE und CIGS-Foliensolarzellen für die Architektur
Förderkennzeichen: II 3-F20-10-1-137 / SWD-10.08.18.7-12.06

Technische Universität Dresden

Fakultät Bauingenieurwesen
Institut für Baukonstruktion
Prof. Dr.-Ing. Bernhard Weller

www.bauko.bau.tu-dresden.de

28.04.14 CK 21/55

Neben der geringen Wasserdampfdurchlässigkeit sollte die Folie zur Einkapselung natürlich auch mindestens die positiven Eigenschaften, die für die Membrankonstruktion verwendeten ETFE-Folie, aufweisen. Daher ist hier der sinnvollste Weg, die Einkapselungsfolie auf Basis ETFE zu gestalten und zusätzlich mit einer Wasserdampfbarriere auszurüsten. Neben der Verwendung von Mehrschichtfolien sind insbesondere Beschichtungstechnologien interessant. [11] Allerdings bereiten auch hier die antiadhäsiven Eigenschaften der ETFE-Probleme, so dass beispielsweise Lacksysteme schlecht haften. Dem gewählten Substrat ETFE wird der Vorteil der sehr geringen Oberflächenenergie (ca. 24 mN/m) für die Schmutzabweisung bei der Beschichtung zum klaren Nachteil. Denn grundsätzlich gilt, je höher die Differenz zwischen den Oberflächenspannungen von Substrat und Coating, desto besser ist die Haftung zwischen den beiden Komponenten, wobei das Substrat hier eine höhere Oberflächenspannung besitzen muss. Aus diesem Grund muss die ETFE-Folie vor dem Beschichten einer Vorbehandlung unterzogen werden. Die gängigsten Verfahren zur Oberflächenbehandlung sind Niedertemperatur-Plasma, Hochtemperatur-Plasma, Coronabehandlung, Chemisches Ätzen, Primern und Beflammen.

Aufgrund der fertigungstechnischen Möglichkeiten ist im Rahmen dieses Forschungsprojektes für ETFE im industriellen Bandmaß nur eine Corona-Vorbehandlung möglich. Bei der Corona-Entladung wird ein Atmosphärenplasma zwischen einer Folie und einer Elektrode erzeugt. Dies geschieht durch eine angelegte Hochspannung und dadurch beschleunigte Elektronen, die die Luftmoleküle ionisieren. Die auftreffenden Ionen führen schließlich zur Bildung von radikalischen Gruppen an der Folienoberfläche.

Nach der Vorbehandlung ist der Auftrag verschiedener Barrierschichten möglich, wobei diese folgendermaßen kategorisiert werden können:

- Anorganische Schichten, welche durch Aufdampfen im Vakuum auf das Substrat aufgebracht werden. Als Beispiel sind hier SiO_x -, Al_2O_3 - oder ZnSnO -Schichten zu nennen,
- Polymerbarrierschichten, die durch einen Lackauftrag auf das Substrat aufgebracht werden. Dies geschieht meist über Raster- oder Glattwalzen. Ein Beispiel für solche Schichten sind organisch-anorganische Hybridpolymere in Form spezieller Lacksysteme, sogenannte „ORMOCER®e“,
- Kombination von Vakuum-Beschichtungsverfahren mit konventionellen Lackierverfahren

Es gab bereits Untersuchungen, die den Versuch zur Aufbringung von SiO_x auf das Substrat ETFE beschreiben. Hierbei wurde ein molares Verhältnis O:Si von 1:7 gewählt, um einen Kompromiss zwischen der guten Barriereeigenschaft des Siliziumoxids und der hohen Transparenz des Siliziumdioxids zu erreichen. Es hat sich jedoch herausgestellt, dass vor allem die unterschiedlichen Ausdeh-

Endbericht

Technologieentwicklung leichter, flexibler Photovoltaikmodule auf der Basis von ETFE und CIGS-Foliensolarzellen für die Architektur
Förderkennzeichen: II 3-F20-10-1-137 / SWD-10.08.18.7-12.06

Technische Universität Dresden

Fakultät Bauingenieurwesen
Institut für Baukonstruktion
Prof. Dr.-Ing. Bernhard Weller

www.bauko.bau.tu-dresden.de

28.04.14 CK 22/55

nungskoeffizienten der metallischen Schichten und der ETFE-Folie zu erheblichen Problemen führen können. Es kommt hier zur Beschädigung der aufgedampften Schichten und somit zu einer Verschlechterung der Wasserdampfbremse. Gerade im Außeneinsatz, wo teilweise enorme Wetterbedingungen herrschen, sind solche Schichten als sehr kritisch anzusehen, weshalb diese Art der Barrierschichten im weiteren Projektverlauf nicht weiter betrachtet wird.

Das Auftragen von Polymerbarriere- bzw. Lackschichten auf Kunststoffoberflächen ist neben der Coextrusion und der Laminierung die wahrscheinlich einfachste Möglichkeit, die Barrierefunktion einer Folie zu verbessern. Ausschlaggebend ist hier vor allem der Aufbau der Beschichtung. Eine Möglichkeit bieten hier die Hybridpolymere der Fraunhofer ISC, die sogenannten ORMOCER®e. Dieses System wird mithilfe eines Sol-Gel Verfahrens, welches bifunktionale Monomere für die Synthese verwendet, hergestellt. In Bild 20 sind die Strukturelemente der hybriden Sol-Gel Schichten dargestellt. Dieses System wird auf das Substrat aufgetragen und anschließend mittels UV-Strahlung vernetzt. Bild 21 zeigt den schematischen Ablauf zur Herstellung einer ORMOCER®-Schicht. Durch gezielte Einflussnahme der anorganischen und organischen Vernetzungsdichten, sowie durch den Einbau von speziellen funktionellen organischen Gruppen, können die Barriereeigenschaften gezielt gesteuert werden.

ORMOCER®e
Marke der
Fraunhofer-Gesellschaft
zur Förderung der
angewandten Forschung
e. V., München

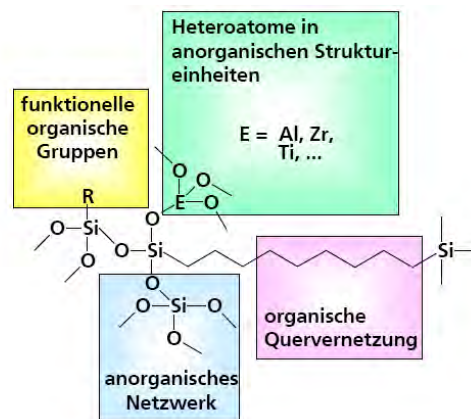


Bild 20 Darstellung der Strukturelemente der ORMOCER®e, entnommen aus [12].

Endbericht

Technologieentwicklung leichter, flexibler Photovoltaikmodule auf der Basis von ETFE und CIGS-Foliensolarzellen für die Architektur
Förderkennzeichen: II 3-F20-10-1-137 / SWD-10.08.18.7-12.06

Technische Universität Dresden

Fakultät Bauingenieurwesen
Institut für Baukonstruktion
Prof. Dr.-Ing. Bernhard Weller

www.bauko.bau.tu-dresden.de

28.04.14 CK 23/55

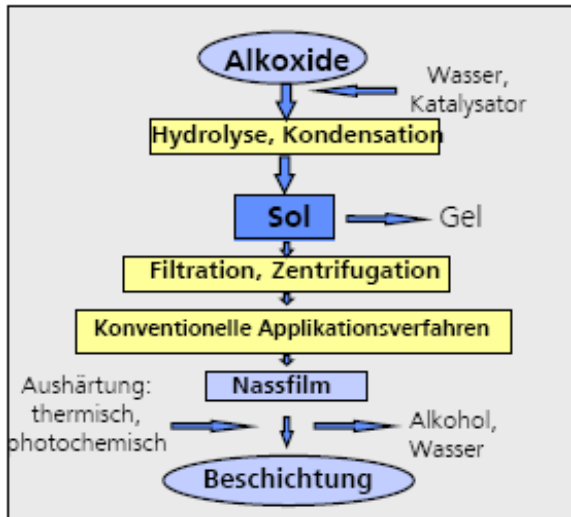


Bild 21 Darstellung zum schematischen Ablauf der Herstellung von ORMO-CER®-Schichten, entnommen aus [12].

Anorganische Aufdampf- oder Sputterschichten in Kombination mit Barrierelacken auf der Basis von anorganisch-organischen Hybridpolymeren sind eine weitere Möglichkeit zur signifikanten Erhöhung der Wasserdampfbarriere. Bild 22 zeigt den schematischen Aufbau eines solchen Verbundes. Ein Vorteil dieses Verfahrens ist die Kompensation makroskopischer Defekte der organischen Schicht durch die Hybridpolymerschicht, woraus sich eine Planarisierung der Folie ergibt.



Bild 22 Schematische Darstellung eines Verfahrens zur Kombination von Vakuum-Beschichtungsverfahren mit konventionellen Lackierverfahren, entnommen aus [12].

Der Herstellungsprozess der vakuumtechnischen Bandbeschichtung ist wohl am besten durch die Aluminium-Bedampfung von Verpackungsfolien wie z.B. PET bekannt. Jedoch hat diese Art der Beschichtung den Nachteil, dass das Licht an der Aluminium-Schicht reflektiert wird und die Transparenz im sichtbaren Spektralbereich verloren geht. Besser geeignet für transparente Beschichtungen sind hier Silizium- oder Aluminiumoxide. Grundsätzlich laufen diese Beschichtungen in drei Phasen ab. Zunächst wird das Schichtmaterial in den gasförmigen Zustand überführt, anschließend wird dieses Gas zum Substrat transportiert, wo es auf der Oberfläche kondensiert und eine dünne Schicht ausbildet. Dieses Verfahren wird als PVD-Verfahren (Physical Vapour Deposition) bezeichnet. Es gibt hier die Möglichkeiten des Aufdampfens und des Aufstäubens, wobei die Unterschiede in der Teilchenenergie und der Energiequelle liegen.

Im Gegensatz zum PVD-Verfahren wird beim Lackieren unter Atmosphärendruck gearbeitet. Meist geschieht dies an bahnförmigen Beschichtungsanlagen

Endbericht

Technologieentwicklung leichter, flexibler Photovoltaikmodule auf der Basis von ETFE und CIGS-Foliensolarzellen für die Architektur
Förderkennzeichen: II 3-F20-10-1-137 / SWD-10.08.18.7-12.06

Technische Universität Dresden

Fakultät Bauingenieurwesen
Institut für Baukonstruktion
Prof. Dr.-Ing. Bernhard Weller

www.bauko.bau.tu-dresden.de

28.04.14 CK 24/55

im Rolle zu Rolle Prozess. Der Lack wird in der Regel im flüssigen Zustand durch ein Auftragswerk auf das Substrat aufgetragen. Abhängig von der Viskosität des Coatings verwendet man zum Auftrag Raster- oder Glattwalzen. Die Trocknung des Lackes geschieht durch Heißluft, mit IR-Strahlung oder, wenn es sich um ein UV-ernetzendes System handelt, mit UV-Strahlung. In Bild 23 ist das grundlegende Verfahren eines Coatingprozesses dargestellt.

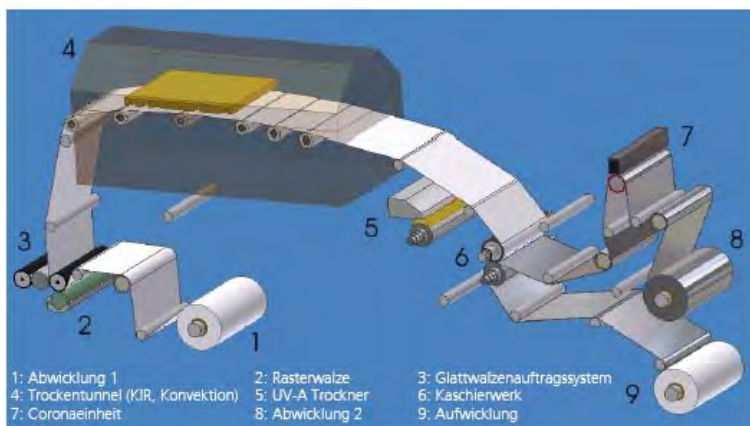


Bild 23 Darstellung eines Coatingprozesses, entnommen aus [12].

Eine ganz spezielle Methode des Auftrags von Coatings auf Substrate ist das Kaskadengießen. [13] Diese Verfahrenstechnik stammt ursprünglich aus der Fotoindustrie und ermöglicht einen gleichzeitigen Auftrag von bis zu 9 Schichten in einem einzigen Arbeitsschritt, weshalb kostengünstiger als beim Walzenauftrag gearbeitet werden kann. In Bild 24 ist der schematische Aufbau eines Kaskadengießers sowie dessen Funktionsprinzip dargestellt.

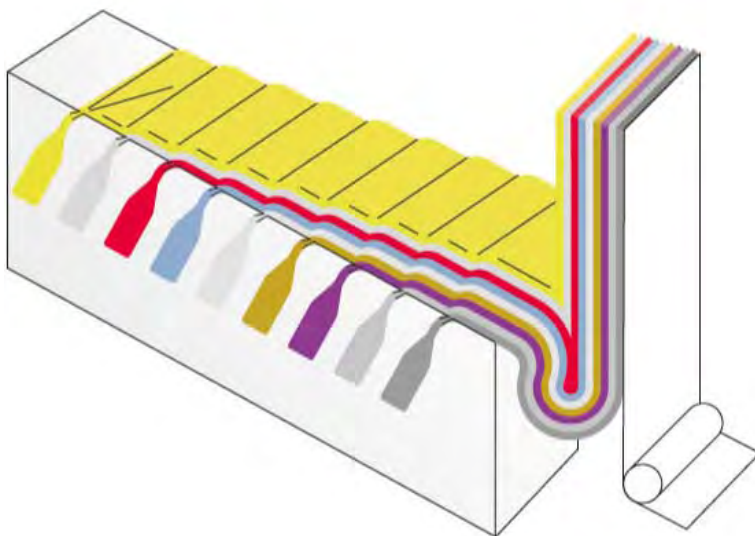


Bild 24 Schematische Darstellung eines Kaskadengießers, entnommen aus [14].

Dieses Verfahren ist nur durch die genaue Einstellung der Viskosität der einzelnen Schichten möglich und erfordert ein enormes Knowhow bei der chemischen

Endbericht

Technologieentwicklung leichter, flexibler Photovoltaikmodule auf der Basis von ETFE und CIGS-Foliensolarzellen für die Architektur
Förderkennzeichen: II 3-F20-10-1-137 / SWD-10.08.18.7-12.06

Technische Universität Dresden

Fakultät Bauingenieurwesen
Institut für Baukonstruktion
Prof. Dr.-Ing. Bernhard Weller

www.bauko.bau.tu-dresden.de

28.04.14 CK 25/55

Zusammenstellung der Coatings. Auch in sich fragile Schichten können im Verbund aufgetragen werden, wichtig ist hier vor allem, dass die Haftung zwischen der untersten Schicht und dem Substrat sowie der einzelnen Schichten untereinander gegeben ist. Grundsätzlich verwendet man auch hier eine Kombination von organischen und anorganischen Substanzen, um eine optimale Sperrwirkung zu erreichen. Bereits erfolgreich angewendet wurde dieses Verfahren bei der Einkapselung von OLEDs, die noch höhere Anforderungen an die Wasserdampfbarriere stellen als CIGS-Zellen.

Aus diesem Grund sollte das Kaskadengießen zur Aufbringung einer Barrierschicht auf ETFE in diesem Forschungsprojekt eingesetzt werden. Der Projektpartner Nowofol hat nach ersten vielversprechenden Laboruntersuchungen zur ETFE-Beschichtung mit diesem Verfahren einen Auftrag an einen Folienbeschichter erteilt. Dieser hatte bereits Erfahrungen mit der Aufbringung von Wasserdampfbarrierschichten im Bereich der Herstellung von OLEDs.

Auftrag einer Wasserdampfbarriere auf ETFE Folie

Die Beschichtungen der ETFE-Folien wurden im Forschungsprojekt durch einen beauftragten Dritten (InovisCoat GmbH, Monheim am Rhein) durchgeführt, weshalb aufgrund einer vorliegenden Geheimhaltungsvereinbarung mit der InovisCoat GmbH hier nur auf grundlegende Dinge eingegangen werden kann. Die exakte Anwendungstechnik sowie die chemischen Bezeichnungen der verwendeten Benetzungs- und Barriermittel sind entsprechend umschrieben.

Eine neue Herausforderung stellte hier das Substrat dar, auf dem die Barrierschicht(en) aufgetragen werden sollten. ETFE besitzt eine sehr geringe Oberflächenspannung und lässt sich somit nur sehr schlecht benetzen (siehe Abschnitt 3.2 - Haftungseigenschaften). Um die Benetzbarkeit zu verbessern, wurden zwei verschiedenen Substratvarianten verwendet. Eine mit Corona vorbehandelte ETFE Folie mit einer nun verbesserten Oberflächenspannung von ≥ 50 mN/m, sowie eine speziell geprimierte ETFE-Folie. Die geprimierte Variante erhöht zwar nicht merklich die Oberflächenspannung, ist aber auf eine Laminierung mit EVA ausgelegt und Stand der Technik beim Projektpartner Nowofol. Die Haftschrift muss dementsprechend ausgelegt werden. Auf Basis dieser beiden Substrate wurden auch die Versuche durchgeführt.

Ziel des ersten Schrittes war es nun eine Haftschrift zu entwickeln, die eine feste Verbindung mit dem Substrat eingeht. Die Haftung wurde durch einen einfachen Tesafilm Test geprüft und optisch beurteilt. Das heißt, es wird ein Standard Tesafilm auf die Folie geklebt und mit konstanter Geschwindigkeit abgezogen. Die Folie wird nun optisch begutachtet und auf etwaige Oberflächenbeschädigungen bewertet. Dieser Schnelltest hat sich in der Druckindustrie bewährt und liefert erste Ergebnisse zur Haftung zwischen Beschichtung und Substrat. Die Haftschrift besteht aus einer wässrigen Lösung, welche an der Luft durch Temperatur aushärtet. Die Schichten werden durch ein einfaches Rakel

Endbericht

Technologieentwicklung leichter, flexibler Photovoltaikmodule auf der Basis von ETFE und CIGS-Foliensolarzellen für die Architektur
Förderkennzeichen: II 3-F20-10-1-137 / SWD-10.08.18.7-12.06

Technische Universität Dresden

Fakultät Bauingenieurwesen
Institut für Baukonstruktion
Prof. Dr.-Ing. Bernhard Weller

www.bauko.bau.tu-dresden.de

28.04.14 CK 26/55

mit definierter Auftragsmenge und Abziehggeschwindigkeit auf eine 100 µm dicke ETFE-Folie aufgetragen. Die Tabelle 3 fasst die Ergebnisse zusammen.

Muster	Haftschicht	Substrat	Tesafilmtest
1/1	1	ET 6235 Z (Corona)	gute Haftung
1/2	1	ET 6235 Z (Primer)	gute Haftung
2/1	2	ET 6235 Z (Corona)	teilweise Ablösung
2/2	2	ET 6235 Z (Primer)	ganzflächige Ablösung

Tabelle 3 Ergebnisse zum Tesafilm-Test an verschiedenen Haftschichten.

Die Ergebnisse zeigen eindeutig, dass die Haftschicht die beste Verbindung zu den Substraten eingeht. Zwischen der Corona-Vorbereitung und der Primerung war optisch kein Unterschied festzustellen. Die Haftschicht 2 konnte den Abziehtest nicht bestehen.

Ein Problem das hier bereits festgestellt wurde, war die statische Aufladung der ETFE-Folie, die durch eine Corona Vorbereitung noch verstärkt wurde. Dies hatte zu Folge, dass sich Staubpartikel auf der Folie ablagerten, die für die weitere Verarbeitung problematisch sein könnten.

Im zweiten Schritt wurde versucht auf die Haftschicht 1 eine Barrierschicht aufzutragen. Diese Schicht wurde chemisch so ausgelegt, dass man eine optimale Verbindung zur Haftschicht erhält. Wie bereits erwähnt kann hier nicht exakt auf die chemische Formulierung der Barrierschicht eingegangen werden. Es handelt sich jedoch sowohl um organische als auch anorganische Verbindungen, welche einerseits optimal auf die Zwischenschicht ausgelegt sind und andererseits eine Wasserdampfbarriere gewährleisten. Eine einzige Barrierschicht kann möglicherweise nicht die komplette Barrierefunktion darstellen und muss mit verschiedenen Schichten kombiniert werden. Aufgebracht wurde die Barrierschicht für den ersten Versuch ebenfalls mittels eines Rakels. Die Ergebnisse dieser Versuchsreihe reichten aus, um eine erste Aussage über die Machbarkeit zu treffen. Erst bei einem positiven Ergebnis hinsichtlich Haftung und Barrierewirkung macht es Sinn auf den Loop-Coater zu wechseln, da dieser Schritt deutlich aufwändiger und teurer ist. Die Versuchsreihe ist in Tabelle 4 dargestellt.

Muster	Barrierschicht	Substrat
3/1	1 (A)	ET 6235 Z (Corona)
3/2	2 (AA)	ET 6235 Z (Corona)
4/1	1 (A)	ET 6235 Z (Primer)
4/2	2 (AA)	ET 6235 Z (Primer)
5/1	3 (BA)	ET 6235 Z (Corona)
6/1	3 (BA)	ET 6235 Z (Primer)

Tabelle 4 Versuchsreihe zur Aufbringung verschiedener Barrierschichten.

Wenn man die Ergebnisse rein optisch betrachte, sah man einige Fehlstellen auf der Folienoberfläche an denen die Folie nicht benetzt war und teilweise gab

Endbericht

Technologieentwicklung leichter, flexibler Photovoltaikmodule auf der Basis von ETFE und CIGS-Foliensolarzellen für die Architektur
Förderkennzeichen: II 3-F20-10-1-137 / SWD-10.08.18.7-12.06

Technische Universität Dresden

Fakultät Bauingenieurwesen
Institut für Baukonstruktion
Prof. Dr.-Ing. Bernhard Weller

www.bauko.bau.tu-dresden.de

28.04.14 CK 27/55

es Einschlüsse von Staubpartikeln. Diese Folienmuster wurden an den Projektpartner Solarion zur Herstellung von PV-Minimodulen (siehe Abschnitt 3.3) geschickt. Die daraus erhaltenen Ergebnisse zeigten deutlich, dass die Barrierefunktion bei keinem der Muster gegeben war.

Für eine optimale Qualität muss die ETFE-Folie absolut frei von irgendwelchen Verschmutzungen oder Staubpartikeln sein. Bei der Herstellung von ETFE wird die Folie unter Standardproduktionsbedingungen extrudiert, durchläuft mehrerer Kontrollstationen wie z.B. Dickenmessanlage oder Fehlstellendetektor, sowie einer Vorbehandlungsstation und wird anschließend aufgewickelt. Die Umgebung dieser Extrusionsanlage entspricht von der Sauberkeit und Staubbelastung, die einer Standardextrusionsanlage für Lebensmittelverpackungsfolien. Die Strecke, die die Folie von Extrusion bis zur Aufwicklung durchläuft kann bis zu 50 m betragen. Während dieser Zeit lädt sich die Folie statisch auf und zieht somit Staubpartikel an. Angebrachte Entladungsschienen während dem Prozess helfen nur sehr wenig. Aufgrund der elektrischen Entladung der Vorbehandlungsstation (Corona) wird dieser Effekt natürlich noch verstärkt. Die Rollenbreite der Mutterrolle beträgt 1550mm, daher muss in einem zweiten Schritt die Folie noch auf die gewünschte Breite konfektioniert werden. Dazu wird die Mutterrolle mit einer LDPE Folie verpackt, zu einer Schneidanlage transportiert und wieder ausgepackt. Die Konfektionierung passiert unter denselben Umweltbedingungen wie die Extrusion. Alle diese Schritte laufen folglich nicht unter Reinraumbedingungen ab. Die Beschichtung wird üblicherweise unter Reinraumbedingungen durchgeführt. Eine Folienproduktion im Reinraum wäre natürlich denkbar ist, war aber aufgrund von hohen erforderlichen Investitionskosten in diesem Projekt nicht umsetzbar. Eine andere Möglichkeit wäre eine Reinigung der Folie vor dem Beschichtungsprozess. Dies müsste aber auch wiederum in einem Reinraum geschehen und würde außerdem die Corona-Vorbehandlung zerstören. Aufgrund dieser Tatsachen waren weitere Entwicklungsbestrebungen in diese Richtung innerhalb des Projektes nicht wirtschaftlich bzw. sinnvoll. Es kann nur eine Folie verwendet werden, die absolut frei von Fremdmaterialien an der Oberfläche ist.

Haftungseigenschaften

Fluorpolymerfolien zeichnen sich durch eine bautechnisch erwünschte, sehr hohe Antiadhäsivität und damit durch eine extrem schlechte Benetzbarkeit aus. Die Benetzbarkeit ist aber in klebtechnischen Prozessen eine notwendige Voraussetzung für die Adhäsion und die Ausbildung von Haftungskräften. Ohne Benetzung der Oberfläche, also ohne molekulare Annäherung von Klebstoff und Substrat ist dagegen kein Haftungsaufbau möglich. Die niedrigen Oberflächenenergien der Fluorpolymere verhindern damit die Ausbildung reproduzierbarer, dauerhafter und belastbarer adhäsiver Verbindungen mit anderen Materialien.

Endbericht

Technologieentwicklung leichter, flexibler Photovoltaikmodule auf der Basis von ETFE und CIGS-Foliensolarzellen für die Architektur
Förderkennzeichen: II 3-F20-10-1-137 / SWD-10.08.18.7-12.06

Technische Universität Dresden

Fakultät Bauingenieurwesen
Institut für Baukonstruktion
Prof. Dr.-Ing. Bernhard Weller

www.bauko.bau.tu-dresden.de

28.04.14 CK 28/55

Mithilfe von Kontaktwinkelmessungen (siehe Bild 25), einem wichtigen Verfahren der Oberflächenanalyse, können die Benetzbarkeiten sowie die Oberflächenenergien von Folien ermittelt werden. Dies wurde an sowohl an ETFE als auch an PCTFE (Polychlorotrifluorethylen), EFEP (Copolymer aus Ethylen, Tetrafluorethylen und Hexafluorpropylen) und an PA (Polyamid) vorgenommen. Die Ergebnisse hierzu sind in Bild 26 dargestellt.

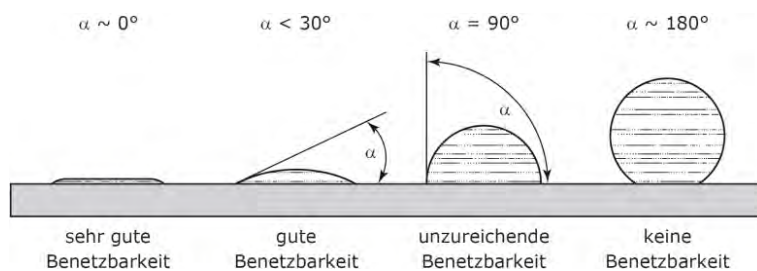


Bild 25 Schematische Darstellung der Oberflächenbenetzbarkeit in Abhängigkeit des Kontaktwinkels α , nach [15].

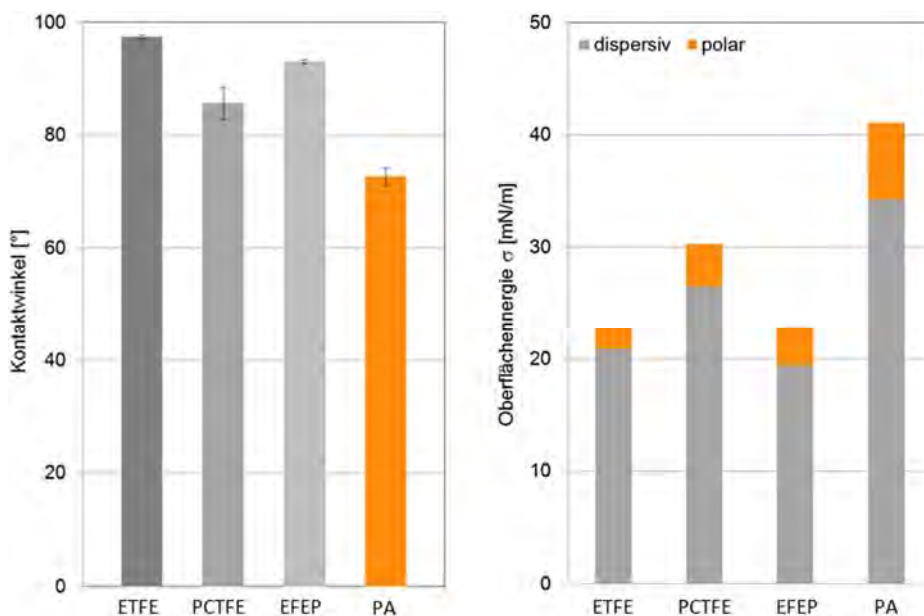


Bild 26 Kontaktwinkel (links) und Oberflächenenergien (rechts) verschiedener Folienmaterialien.

Die Kontaktwinkel aller untersuchten Materialien liegen im unzureichend benetzbaren Bereich und die Oberflächenenergien sind sehr niedrig. Als kritische Grenze für die Benetzbarkeit der Substrate mit Klebstoffe werden etwa 100 mN/m angenommen. [16]

Zur Optimierung von Oberflächen für den klebtechnischen Prozess gibt es verschiedene Verfahren. Ein Hauptaugenmerk liegt dabei auf Oberflächenaktivierungen durch Plasmatechnologien und durch Beschichtungen, insbesondere auf Abscheidungen von Silikatschichten mittels Flammensilikatisierung. Letztere

Endbericht

Technologieentwicklung leichter, flexibler Photovoltaikmodule auf der Basis von ETFE und CIGS-Foliensolarzellen für die Architektur
Förderkennzeichen: II 3-F20-10-1-137 / SWD-10.08.18.7-12.06

Technische Universität Dresden

Fakultät Bauingenieurwesen
Institut für Baukonstruktion
Prof. Dr.-Ing. Bernhard Weller

www.bauko.bau.tu-dresden.de

28.04.14 CK 29/55

erzeugen auf vielen Materialien nahezu vollständig benetzbare Oberflächen mit hoher Oberflächenenergie.

Die Anwendung der vorgestellten Verfahren auf ETFE wurde mit labortechnischen Anlagen durchgeführt. Die Atmosphärendruckplasmabehandlung kann dabei über die einstellbaren Parameter des Düsenabstands sowie der Verfahrensgeschwindigkeit gezielt auf die Materialeigenschaften adaptiert werden, so dass beispielsweise eine Temperaturbelastung der Folie ausgeschlossen werden kann. Mit diesem Verfahren konnte der Kontaktwinkel der ETFE-Folie auf 70° gesenkt werden. Dahingegen war die Anwendung der Flammensilikatisierung nicht erfolgreich, da keine Haftung der Silikatschicht auf der ETFE-Oberfläche bewirkt werden konnte.

Da der Projektpartner Nowofol über das Coronaverfahren zur Behandlung von ETFE-Folien mit Plasma unter Atmosphärendruck verfügt, wird diese Technologie zur Oberflächenvorbehandlung innerhalb des Forschungsprojektes verwendet.

Materialverbund

Das Applizieren von PV-Elementen auf Membran- und Kissenkonstruktionen erfordert spezielle konstruktive Lösungen. Membrankonstruktionen erhalten ihre Stabilität durch gekrümmte Oberflächen und mechanische Vorspannung. ETFE kann die signifikanten Oberflächenverformungen und Zugspannungen und sogar Tragwerksverformungen problemlos aufnehmen. Gleichzeitig verhindert seine hohe Dehnfähigkeit die Faltenbildung beim Aufspannen der "Haut". PV-Elemente besitzen keine derartige mechanische Leistungsfähigkeit. Deshalb sind geeignete Fügeverfahren notwendig, damit die unterschiedlichen Spannungs-Dehnungsverhalten sowie die verschiedenen Temperaturendehnungen von Folien und PV-Elementen nicht zur Delamination führen.

Auf diesen Anforderungen aufbauend wurden erste Konzepte zur Integration der mit der Referenzverkapselung verarbeiteten Solarzellen entwickelt. Hierbei kristallisieren sich die folgenden drei Varianten heraus:

- Flächige Vakuumlamination auf Corona-vorbehandelten ETFE-Zuschnitten zur Kissenverarbeitung.
- Partielle Lamination von ETFE-Zuschnitten an den Modulrandbereich, welche der Verschweißung der Module mit der Kissenstruktur dienen. Alternativ wäre hier auch Nähen denkbar.
- Als weitere Alternative wäre das Aufkleben von Solarmodulen auf oberflächenaktivierten ETFE-Folien denkbar.

Für die Verklebung von Solarmodulen mit ETFE-Folien kommen hierbei unterschiedliche Materialien in Frage. Untersuchungsergebnisse zu deren thermomechanischen Verhalten können Bild 27 entnommen werden.

Endbericht

Technologieentwicklung leichter, flexibler Photovoltaikmodule auf der Basis von ETFE und CIGS-Foliensolarzellen für die Architektur
Förderkennzeichen: II 3-F20-10-1-137 / SWD-10.08.18.7-12.06

Technische Universität Dresden

Fakultät Bauingenieurwesen
Institut für Baukonstruktion
Prof. Dr.-Ing. Bernhard Weller

www.bauko.bau.tu-dresden.de

28.04.14 CK 30/55

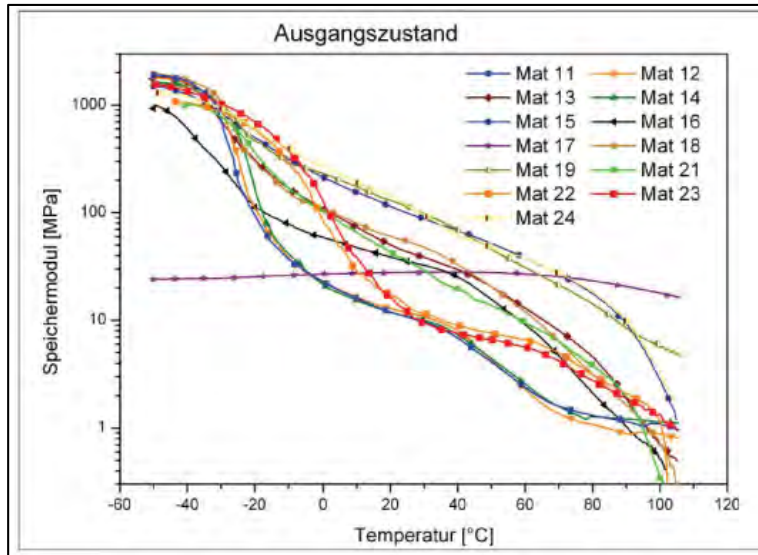


Bild 27 Abhängigkeit des Speichermoduls von Klebstoffen zur Vakuumlamination von der Temperatur.

Zuordnung der Materialien:

13, 16, 18 und 21 - Temperaturvernetzende EVA-PE-Copolymere

11, 12, 14, 15, 19, 22, 23 und 24 - Thermoplastische Polyolefine

17 - Thermoplastisches Silikonelastomer

Hier wird offensichtlich, dass sich bei niedrigen Temperaturen die meisten Materialien stark versteifen und bei hohen Temperaturen zur Erweichung neigen. Es könnte allerdings ein Material - ein thermoplastisches Silikonelastomer (Geniomer®) - ausgemacht werden, das über den gesamten Temperaturbereich konstante Materialeigenschaften zeigte. Neben diesen Eigenschaften spielt aber auch die Haftung zu den zu fügenden Materialien eine wesentliche Rolle. Das Einbettmaterial mit den stabilen thermomechanischen Eigenschaften wurde mit Corona-vorbehandelter ETFE zu einem Dreifach-Verbund (ETFE - Einbettmaterial - ETFE) laminiert und anschließend mechanisch mittels Schälversuch geprüft. Dabei wurde eine Maximalkraft von größer 40 N mit kohäsiivem Bruch im Einbettmaterial erreicht.

Anschließend wurde dieser Verbund einer Dampf-Heat-Lagerung (85 °C, 85 % rel. LF, 6 Wochen) unterzogen, um damit die Mindestanforderung für PV-Module abzudecken. Die nachfolgende mechanische Prüfung im Schälversuch ergab wiederum kohäsiivem Bruch im Einbettmaterial mit Maximalkräften von etwa 40 N. Lediglich eine Lagerung des Verbundes unter Normaltemperatur (23 °C) bei geringer relativer Luftfeuchte von maximal 30% über einen längeren Zeitraum (2 Monate) führte zu einem Haftungsverlust, in dem bei Schälversuchen adhäsives Versagen zwischen ETFE und Einbettmaterial auftrat und lediglich eine Maximalkraft von 5 N erreicht wurde. Nach einer anschließenden Lagerung unter Dampf-Heat-Bedingungen wurden wiederum kohäsiive Brüche mit deutlich höheren Kräften erhalten.

Daraus ist abzuleiten, dass eine Austrocknung des Verbundes, wiederum bedingt durch die hohe Wasserdampfdurchlässigkeit der ETFE-Folie, negative Auswirkungen auf die Haftfestigkeit hat. Dies bedeutet, dass in einer Freibewitterung unter trockenen Bedingungen bei gleichzeitiger Belastungen, beispielsweise durch Wind, Schäden in der Befestigung der PV-Module auf den ETFE-Kissen auftreten können.

Endbericht

Technologieentwicklung leichter, flexibler Photovoltaikmodule auf der Basis von ETFE und CIGS-Foliensolarzellen für die Architektur
Förderkennzeichen: II 3-F20-10-1-137 / SWD-10.08.18.7-12.06

Technische Universität Dresden

Fakultät Bauingenieurwesen
Institut für Baukonstruktion
Prof. Dr.-Ing. Bernhard Weller

www.bauko.bau.tu-dresden.de

28.04.14 CK 31/55

3.3 Arbeitspaket 3

Materialkennwerte

Biege weiche Werkstoffe wie Kunststofffolien verformen sich unter Last- (Konstruktionsdehnung) und Temperatureinwirkung (Kriechen, Relaxation). Die resultierenden Dehnungen werden über die Bestimmung von Materialkennwerten versuchstechnisch ermittelt. Dies erfolgte einerseits mit der Dynamisch Mechanischen Analyse (DMA), die für Detektion von Phasenumwandlungen (Glasübergangs-, Schmelzbereich) eingesetzt wird, und andererseits mittels Zugversuchen in der Universalprüfmaschine (UPM).

Neben einer Standard-ETFE-Folie wurden wiederum weitere Folienmaterialien in die Laboruntersuchungen aufgenommen. Dabei handelt es sich um PCTFE, EFEP sowie um PA. Anhand der Ergebnisse sollte die Eignung dieser Materialien für Hüllkonstruktionen im Vergleich mit ETFE-Folie bewertet werden.

Phasenumwandlungen im baurelevanten Temperaturbereich von -20 °C bis $+80\text{ °C}$ sind von besonderem wissenschaftlichem Interesse. Der Glasübergang als ein wichtiger Phasenübergang amorpher Polymere stellt die Erweichungstemperatur dieser Materialien dar und definiert damit deren maximale Einsatztemperatur. Bei teilkristallinen Kunststoffen beschreibt sie den Übergang von sprödem zu duktilem Werkstoffverhalten. Dies führt zu einer wesentlichen Änderung im thermomechanischen Verhalten (z.B. Verlust von Steifigkeit, erhöhte Fließfähigkeit). Daher ist eine genaue Kenntnis des Materialverhaltens für den spezifischen Einsatz der Folienmaterialien in Kissenkonstruktionen von hoher Bedeutung.

In Bild 28 sind die Ergebnisse der DMA-Analyse der Standard ETFE-Folie (NOWOFLON®ET) dargestellt. Der Glasübergangsbereich (T_g) dieses Materials beginnt bei 75 °C . Oberhalb dieser Temperatur verliert die ETFE-Folie nach und nach ihre Steifigkeit.

Endbericht

Technologieentwicklung leichter, flexibler Photovoltaikmodule auf der Basis von ETFE und CIGS-Foliensolarzellen für die Architektur
Förderkennzeichen: II 3-F20-10-1-137 / SWD-10.08.18.7-12.06

Technische Universität Dresden

Fakultät Bauingenieurwesen
Institut für Baukonstruktion
Prof. Dr.-Ing. Bernhard Weller

www.bauko.bau.tu-dresden.de

28.04.14 CK 32/55

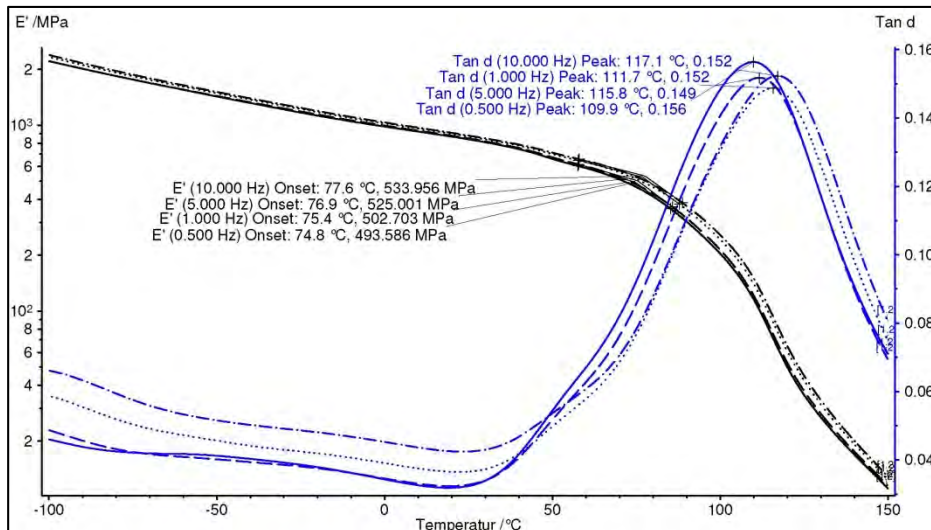


Bild 28 Ergebnisse der Dynamisch Mechanischen Analyse von ETFE-Folie (NOWOFLON®ET) aus Zugversuchen bei verschiedenen Frequenzen und im Temperaturbereich von -100 °C bis +150 °C.

Tabelle 5 fasst die experimentell mit der DMA bestimmten Glasübergangsbereiche aller untersuchten Folien zusammen. Es ist festzustellen, dass die Erweichung von PCTFE, EFEP und PA schon bei zum Teil deutlich niedrigeren Temperaturen beginnt als bei ETFE. Die Glasübergangsbereiche von ETFE, PCTFE und PA ziehen sich über einen weiten Temperaturbereich hin, wohingegen bei EFEP mit Erreichen der Glasübergangstemperatur ein sofortiger und vollständiger Steifigkeitsverlust auftritt.

Material	Glasübergangsbereich
ETFE	75 - 112 °C
PCTFE	34 - 96 °C
EFEP	64 - 67 °C
PA	15 - 38 °C

Tabelle 5 Glasübergangsbereiche verschiedener Folienmaterialien ermittelt mit Zugversuchen in der DMA bei einer Frequenz von 1 Hz.

In der UPM erfolgten einaxiale Zugversuche an Prüfkörpern (Prüfkörperform gemäß DIN EN ISO 527 Teil 2 [17]) auf Grundlage der DIN EN ISO 527 Teil 1 [17], welche die Verfahrensweise zur Ermittlung der Zugeigenschaften von Kunststoffen beschreibt. Das Versuchsprogramm umfasste dabei drei Standardtemperaturstufen im baurelevanten Bereich von -25 °C, +25 °C und +75 °C. Die Zugspannungs-Dehnungs-Diagramme von ETFE, PCTFE, EFEP und PA sind in Bild 29 dargestellt.

Endbericht

Technologieentwicklung leichter, flexibler Photovoltaikmodule auf der Basis von ETFE und CIGS-Foliensolarzellen für die Architektur
Förderkennzeichen: II 3-F20-10-1-137 / SWD-10.08.18.7-12.06

Technische Universität Dresden

Fakultät Bauingenieurwesen
Institut für Baukonstruktion
Prof. Dr.-Ing. Bernhard Weller

www.bauko.bau.tu-dresden.de

28.04.14 CK 33/55

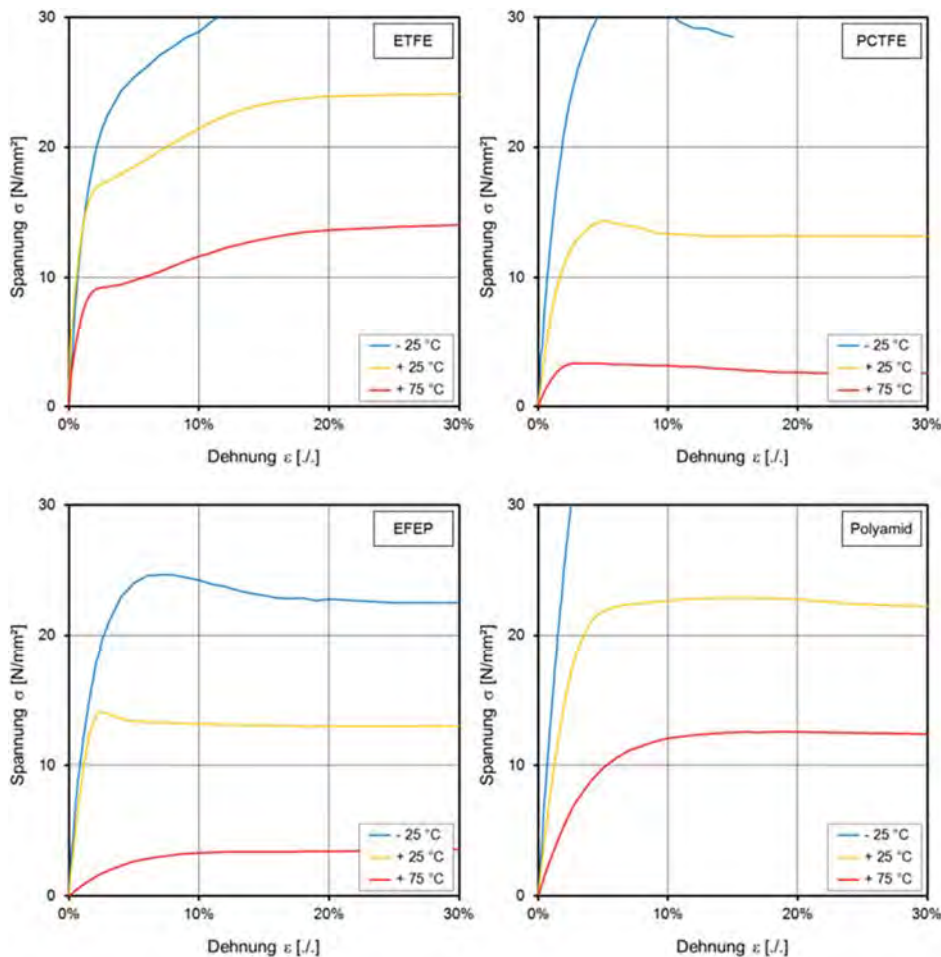


Bild 29 Zugspannungs-Dehnungs-Diagramme der Zugversuche an Folienmaterialien bei unterschiedlichen Temperaturen und einer Zuggeschwindigkeit von 10 mm/min zur Ermittlung der Materialkennwerte.

Alle untersuchten Folien besitzen ausgeprägte Streckgrenzen. Oberhalb dieser beginnen die Materialien zu fließen und es kommt zu einer bleibenden plastischen Verformung. Weiterhin zeigen alle Folien ein temperaturabhängiges Verhalten, wobei die ETFE-Folie bei niedrigen Zugspannungen ein gleiches E-Modul bei allen Temperaturen aufweist. Dies erlaubt in diesem Belastungsbereich eine temperaturunabhängige Bemessung. Ein solches Vorgehen ist insbesondere für die beiden anderen untersuchten Fluorpolymere PCTFE und EFEP nicht möglich, da für diese bei hohen Temperaturen nur sehr geringe Spannungen zulässig sind.

Auf Grundlage der vorgestellten DMA- und UPM-Untersuchungen zu den Materialkennwerten haben sich die Projektpartner für die ausschließliche Verwendung von ETFE als Kissenmaterial in allen Folienlagen entschieden.

Herstellung / Prüfung von PV-Minimodulen mit entwickelten Barrierefolien

Es wurden in Zusammenarbeit des Projektpartners Nowofol mit einem externen Beschichter insgesamt sechs verschiedene beschichtete Barrierefolien hergestellt, welche anschließend beim Projektpartner Solarion Beschichtungstests unterzogen wurden.

Endbericht

Technologieentwicklung leichter, flexibler Photovoltaikmodule auf der Basis von ETFE und CIGS-Foliensolarzellen für die Architektur
Förderkennzeichen: II 3-F20-10-1-137 / SWD-10.08.18.7-12.06

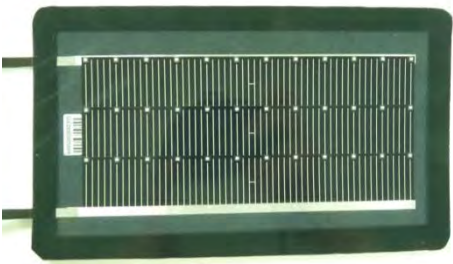
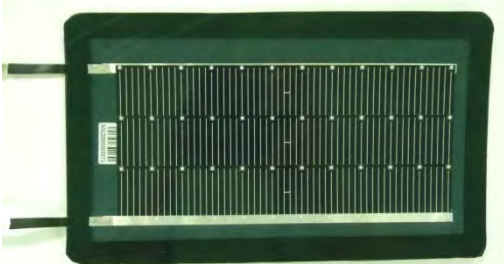
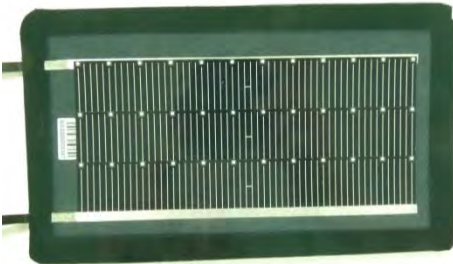
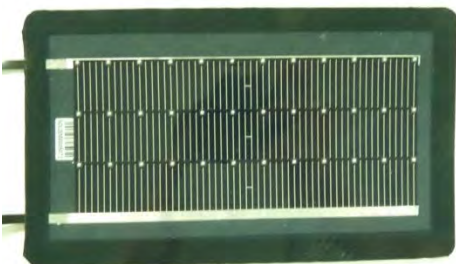
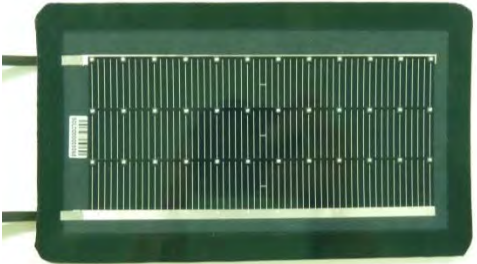
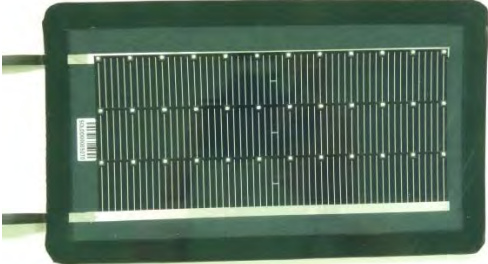
Technische Universität Dresden

Fakultät Bauingenieurwesen
Institut für Baukonstruktion
Prof. Dr.-Ing. Bernhard Weller

www.bauko.bau.tu-dresden.de

28.04.14 CK 34/55

Dabei wurden 6 Mini-Module gebaut, wobei bei jedem Modul eine unterschiedlich beschichtete Barrierefolie verwendet wurde. Die den Mini-Modulen zugeordneten Folienmuster sind der Tabelle 6 zu entnehmen. Der Aufbau der Barrierefolien ist in Tabelle 3 bzw. Tabelle 4 ersichtlich.

Modul SOLDD00005069 = mit Folienmuster 3/1 	Modul SOLDD00005071 = mit Folienmuster 4/2 
Modul SOLDD00005067 = mit Folienmuster 3/2 	Modul SOLDD00005072 = mit Folienmuster 5/1 
Modul SOLDD00005068 = mit Folienmuster 4/1 	Modul SOLDD00005070 = mit Folienmuster 6/1 

Diese Mini-Module bestanden aus einer Rückseitenfolie, einer Frontseitenfolie, einer CIGS-Zellmatrix und zwei Schichten Einbettungsmaterial. Der Aufbau ist in Bild 30 ersichtlich.

Tabelle 6 Bezeichnungen und Fotos der Minimodule mit verschiedenen Barrierefolien.

Endbericht

Technologieentwicklung leichter, flexibler Photovoltaikmodule auf der Basis von ETFE und CIGS-Foliensolarzellen für die Architektur
Förderkennzeichen: II 3-F20-10-1-137 / SWD-10.08.18.7-12.06

Technische Universität Dresden

Fakultät Bauingenieurwesen
Institut für Baukonstruktion
Prof. Dr.-Ing. Bernhard Weller

www.bauko.bau.tu-dresden.de

28.04.14 CK 35/55

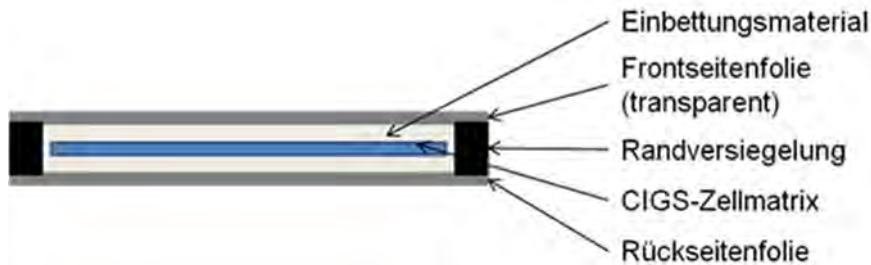


Bild 30 Aufbau eines flexiblen Mini-Solarmoduls.

Für die Herstellung wurden folgende Materialien benötigt:

- Fronseiten- (FSF) und Rückseitenfolie (RSF)
- Randversiegelungsmaterial (RVM)
- Einbettungsmaterial (EBM)
- Trägermaterial für Zellen: Glasvlies
- 3 CIGS-Solarzellen
- Leitklebstoffmaterial (LK)
- Leitbändchen und Front- und Rückseitensammelleiter
- diverse Arbeitsmittel

Die Herstellung erfolgte in zwei Schritten. Zuerst wurde die Zellmatrix hergestellt und anschließend das aus mehreren Schichten bestehende Modul (=Modulverbund). Für die Herstellung der Zellmatrix wurde eine Schicht Glasvlies mit Klebeband auf einer Glasplatte fixiert und ein mit Klebeband versehener Rückseitensammelleiter aufgebracht. In der Zellapplikationsanlage (ZAPPA) wurden bereits gelochte und mit einer Klebeschicht versehene Zellen ab der Mitte des Rückseitenkontaktes beginnend mit leichter Überlappung nebeneinander platziert und passgenau ausgerichtet.

Anschließend wurde manuell ein bereits gelochter Fronseitensammelleiter aufgeklebt. Die Punkt-Loch-Verschaltung der 3 Zellen erfolgte mit Hilfe der Klebstoffapplikationsanlage (KAPPA) oder per Hand mit einem Dispenser. Zur elektrischen Verschaltung diente ein silberhaltiger Leitklebstoff. Dieser wurde bei minus 40°C im Gefrierschrank gelagert und musste vor der Verarbeitung auf Raumtemperatur erwärmt werden.

Nach der Zellverschaltung und der Trocknung der Kontakte im Laminator (ca. 25 min bei 150°C) erfolgte das Anlöten der Leitbändchen an die beiden Sammelleiter zur Verlängerung der Kontakte. Schließlich wurde die Zellmatrix mit einer Seriennummer versehen und mit einem Blitzlicht-Sonnensimulator (Flasher) elektrisch vermessen.

Vor dem Zusammenbau des Modulsandwiches wurde überflüssiges Glasvlies entfernt und die Zellmatrix somit vom Glas gelöst. Im nächsten Schritt wurde die Innenseite der RSF mit mehreren Streifen Randversiegelungsmaterial umrandet und die erste Schicht EBM nach Abzug des Liners hineingelegt. Bevor auf die Zellen die zweite Schicht EBM kam und zum Abschluss die FSF (= entwickelte Barrierefolie aus ETFE) aufgelegt und fest angedrückt werden konnte, musste

Endbericht

Technologieentwicklung leichter, flexibler Photovoltaikmodule auf der Basis von ETFE und CIGS-Foliensolarzellen für die Architektur
Förderkennzeichen: II 3-F20-10-1-137 / SWD-10.08.18.7-12.06

Technische Universität Dresden

Fakultät Bauingenieurwesen
Institut für Baukonstruktion
Prof. Dr.-Ing. Bernhard Weller

www.bauko.bau.tu-dresden.de

28.04.14 CK 36/55

der Liner der Randversiegelung entfernt und an den entsprechenden Stellen zum Herausführen der Leitbändchen vorsichtig eingeschnitten werden.

Im Anschluss daran wurde das fertige Modulsandwich in Abhängigkeit der Schmelztemperatur des verwendeten EBM nach Herstellerangaben laminiert und anschließend erneut elektrisch vermessen. In Bild 31 bis Bild 35 kann die Herstellung der flexiblen Mini-Module nachvollzogen werden.

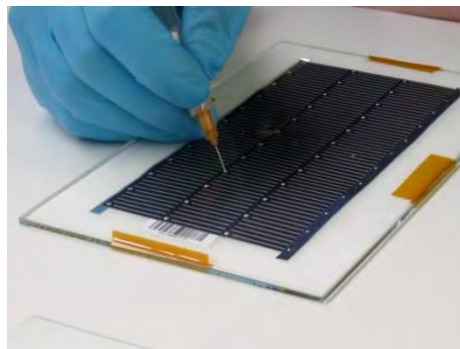
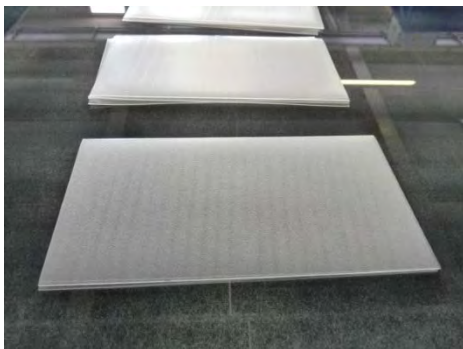


Bild 31 Zurechtgeschnittene Einbettungsmaterialien (links) und elektrische Verschaltung der Zellen mit einem Handdispenser unter Verwendung von silberhaltigen Leitklebstoff (rechts).

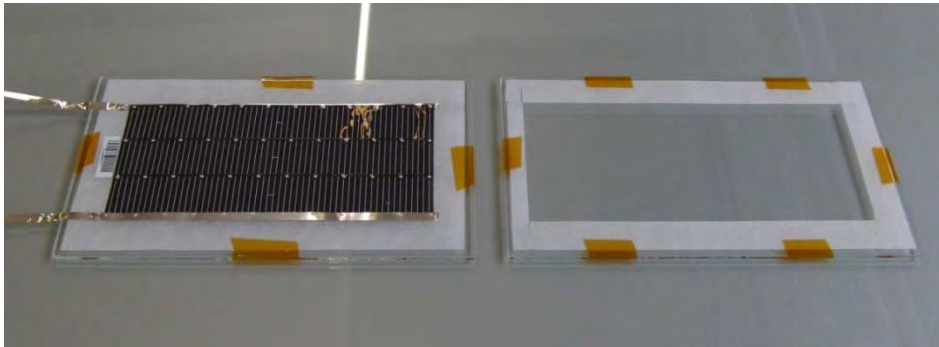


Bild 32 Vom Glas entfernte und bereits verschaltete Zellmatrix.

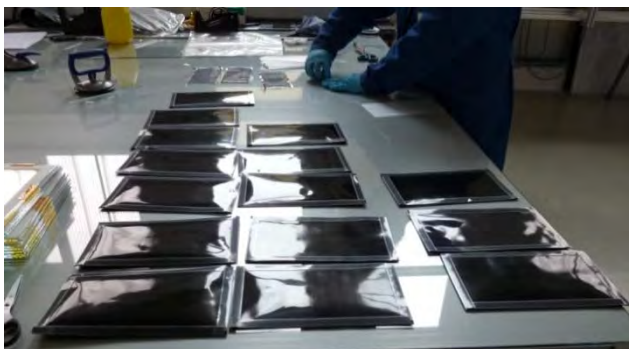


Bild 33 Aufbringen der Randversiegelung auf Rand der RSF.

Endbericht

Technologieentwicklung leichter, flexibler Photovoltaikmodule auf der Basis von ETFE und CIGS-Foliensolarzellen für die Architektur
Förderkennzeichen: II 3-F20-10-1-137 / SWD-10.08.18.7-12.06

Technische Universität Dresden

Fakultät Bauingenieurwesen
Institut für Baukonstruktion
Prof. Dr.-Ing. Bernhard Weller

www.bauko.bau.tu-dresden.de

28.04.14 CK 37/55

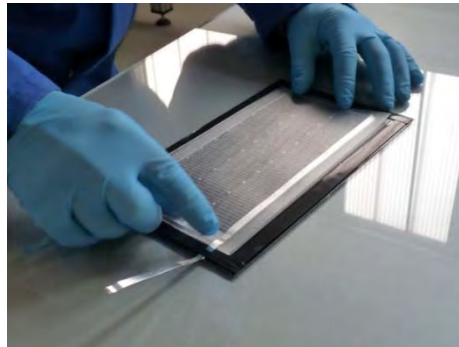
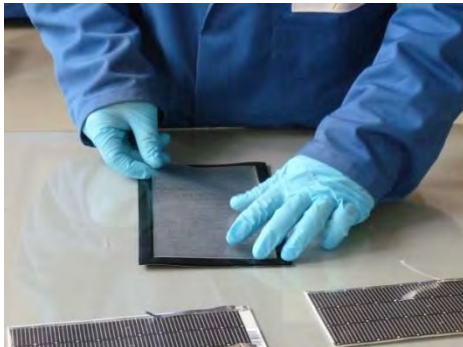


Bild 34 Einlegen der ersten Schicht Einbettungsmaterial mit ausreichendem Abstand zur Randversiegelung (links) und Einschneiden der Randversiegelung zum Rausführen des Leitbändchens und Auflegen der zweiten Schicht Einbettungsmaterial (rechts).



Bild 35 Laminieren des zusammengebauten Modulsandwiches zum gleichmäßigen Verpressen und Verschmelzen der einzelnen Materialschichten.

Um die Feuchtestabilität der Barrierefolien zu untersuchen, wurden die sechs hergestellten Mini-Module, auf Basis der PV-Prüfnorm DIN EN 61646 Abschnitt 10.13, in der Feuchte-Wärme-Klimakammer (Damp-Heat-Test / DHT) einer beschleunigten Alterung unterzogen. Ein durchgeführter DHT-Test gilt als bestanden, wenn ein in einer DHT-Klimakammer bewittertes Modul nach einer Prüfungsdauer von 1000 Stunden bei einer konstanten Temperatur von 85°C und einer relativen Luftfeuchte von 85% keine optischen Beschädigungen aufweist und es zu keinem Isolationsverlust und keinem nennenswerten Leistungsverlust (< 10 %) kommt.

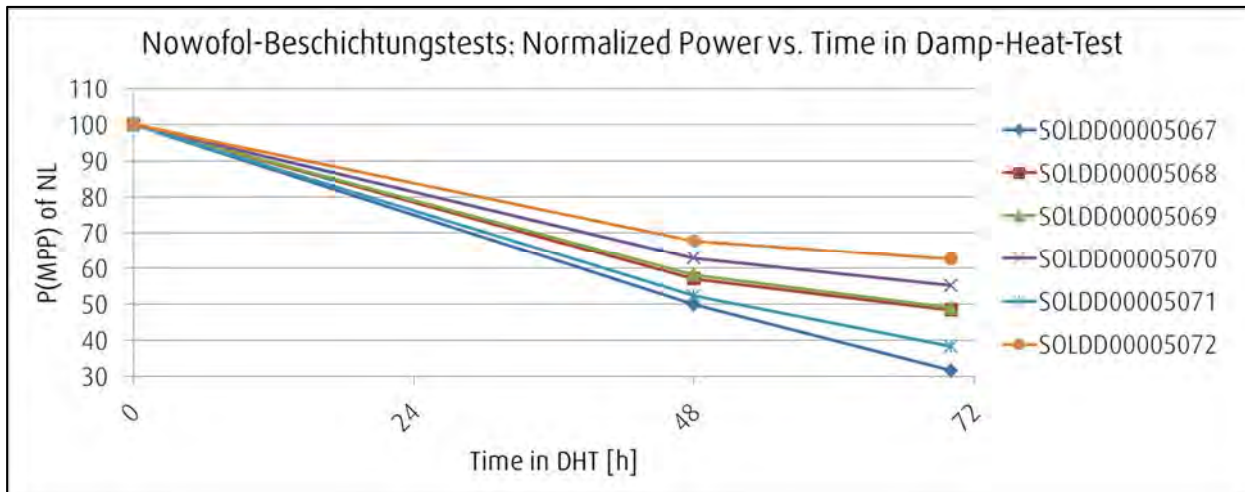
Der Leistungsverlauf der sechs gebauten Mini-Module ist im Diagramm in Bild 36 dargestellt.

Wie in dem Diagramm ersichtlich, ist bereits nach wenigen Stunden in der Wärme-Feuchte-Bewitterung (Damp-Heat-Test / DHT) ein starker Leistungseinbruch auf Grund der Eindringung von Feuchtigkeit festgestellt wurden. Dies ist ebenso bei dem Vergleich der Elektrolumineszenz-Bilder (EL-Bilder) vor und nach der Bewitterung der Module erkennbar (siehe Tabelle 7).

Endbericht

Technologieentwicklung leichter, flexibler Photovoltaikmodule auf der Basis von ETFE und CIGS-Foliensolarzellen für die Architektur
 Förderkennzeichen: II 3-F20-10-1-137 / SWD-10.08.18.7-12.06

Technische Universität Dresden
 Fakultät Bauingenieurwesen
 Institut für Baukonstruktion
 Prof. Dr.-Ing. Bernhard Weller
 www.bauko.bau.tu-dresden.de
 28.04.14 CK 38/55



Äußerlich haben die Module, mit Ausnahme einer leichten Wölbung keinen Schaden genommen. Da jedoch die Leistung aller Mini-Module bereits nach 48 Stunden im DHT deutlich kleiner als 90% der Ausgangsleistung betrug, wurde der Beschichtungstest nicht bestanden und nach 70 Stunden im DHT abgebrochen. Die Barrierewirkung kann damit als unzureichend angesehen werden.

Bild 36 Leistungsverlauf der sechs mit den beschichteten Barrierefolien gebauten Mini-Module.

Vor der Bewitterung im DHT	Nach der Bewitterung im DHT
 NL;0;SOLDD00005067	 DHT;70;SOLDD00005067
 NL;0;SOLDD00005068	 DHT;70;SOLDD00005068
 NL;0;SOLDD00005069	 DHT;70;SOLDD00005069

Tabelle 7 Vergleich der Elektrolumineszenz-Bilder (EL-Bilder) vor und nach der Bewitterung der Module im DHT.

Endbericht

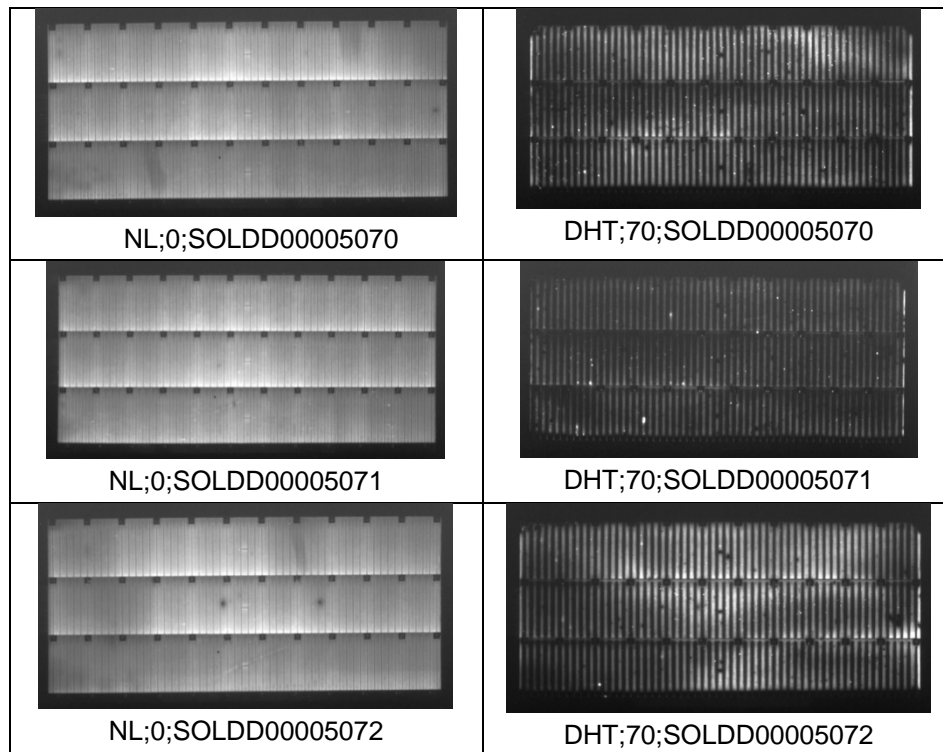
Technologieentwicklung leichter, flexibler Photovoltaikmodule auf der Basis von ETFE und CIGS-Foliensolarzellen für die Architektur
Förderkennzeichen: II 3-F20-10-1-137 / SWD-10.08.18.7-12.06

Technische Universität Dresden

Fakultät Bauingenieurwesen
Institut für Baukonstruktion
Prof. Dr.-Ing. Bernhard Weller

www.bauko.bau.tu-dresden.de

28.04.14 CK 39/55



3.4 Arbeitspaket 4

Entwicklung / Herstellung von PV-Modulen für ETFE-Kissen-Prototyp

Die Herstellung der PV-Module für den geplanten ETFE-Kissen-Prototyp erfolgte analog der Bauanweisung der Mini-Module für die Beschichtungstests (siehe Abschnitt 3.3 - Herstellung / Prüfung von PV-Minimodulen mit entwickelten Barrierefolien) vom Projektpartner Solarion.

Die ETFE-Kissenmodule waren jedoch deutlich größer (1290 x 550 mm) als die Mini-Module, haben demzufolge mehr Zellen (40 Stück) und keine offenen Kontaktbändchen, sondern frontseitig aufgebrachte Anschlussdosen. Weiterhin wurde keine der im Projekt entwickelten beschichteten Barrierefolien, sondern eine kommerziell erhältliche Barrierefolie verwendet.

Es wurden Versuche mit über den Modulrand hinausstehenden, rückseitig vollflächig laminierten ETFE-Folien durchgeführt. Der Überstand sollte eine Verschweißung des Moduls mit der ETFE-Folie des Kissens ermöglichen. Durch den Heißschrumpf des ETFE als verstreckte Folie wurden die Module jedoch krummgezogen, so dass eine weitere Verarbeitung nicht möglich war. Versuche zum Vorschrumpfen des ETFE führten zu keinem befriedigenden Ergebnis. Daher wurden letztendlich Module gebaut, bei denen das zur Verschweißung mit den Kissens vorgesehene ETFE streifenförmig an den Modulrändern heißlaminiert war. Eines der für den ETFE-Kissenteststand gebauten Module ist in Bild 37 dargestellt.

Endbericht

Technologieentwicklung leichter, flexibler Photovoltaikmodule auf der Basis von ETFE und CIGS-Foliensolarzellen für die Architektur
Förderkennzeichen: II 3-F20-10-1-137 / SWD-10.08.18.7-12.06

Technische Universität Dresden

Fakultät Bauingenieurwesen
Institut für Baukonstruktion
Prof. Dr.-Ing. Bernhard Weller

www.bauko.bau.tu-dresden.de

28.04.14 CK 40/55

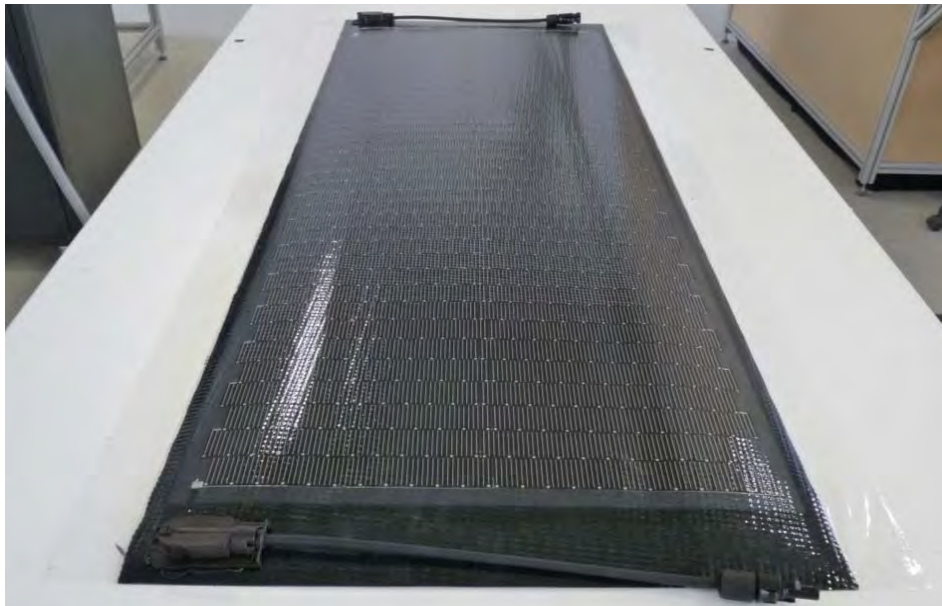


Bild 37 PV-Modul mit ETFE-Streifen an den Modulrändern zur Aufbringung auf den ETFE-Kissen-Prototyp.

Konkret, wurden die Module seitens vor der Auslieferung beidseitig mit jeweils zwei ca. 30 cm breiten ETFE-Folienstreifen versehen. Diese wurden, wie in Bild 38 ersichtlich rückseitig im Vakuum laminationsverfahren auflaminiert.

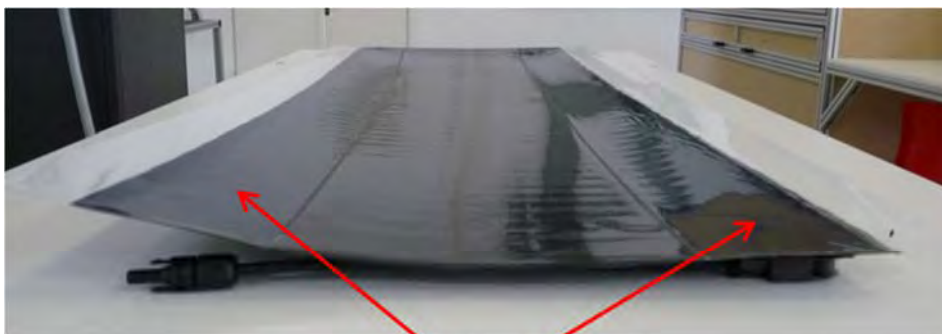


Bild 38 Jeweils auf der Modul-Längsseite beidseitig unter das Solarmodul laminierte ETFE-Folienstreifen.

**Zwei ca. (30 x 1290) mm breite
ETFE-Folienstreifen**

Um die sichere Verbindung zwischen ETFE und der Modulrückseite zu gewährleisten, wurden Haftungsversuche zwischen Laminiermaterial (Heißkleber) und ETFE durchgeführt (siehe Abschnitt 3.2 - Materialverbund). Durch die Auswahl eines geeigneten kommerziellen Produktes in Kombination mit durch Corona-Plasma oberflächenaktiviertem ETFE konnte hier eine sichere Verklebung erreicht werden.

Endbericht

Technologieentwicklung leichter, flexibler Photovoltaikmodule auf der Basis von ETFE und CIGS-Foliensolarzellen für die Architektur
Förderkennzeichen: II 3-F20-10-1-137 / SWD-10.08.18.7-12.06

Technische Universität Dresden

Fakultät Bauingenieurwesen
Institut für Baukonstruktion
Prof. Dr.-Ing. Bernhard Weller

www.bauko.bau.tu-dresden.de

28.04.14 CK 41/55

Entwicklung / Herstellung ETFE-Kissen-Prototyp

Die ETFE-Kissen-Prototypen wurden in Absprache der Projektpartner mit einer Größe von 2 m x 3 m entwickelt. Da ETFE-Bahnen in einer Breite von 1,55 m gefertigt werden, bestand die Notwendigkeit der Fertigung der einzelnen ETFE-Lagen aus mehreren Stücken. Um zusätzlich die darauf zu befestigenden PV-Module nicht in einem Nahtbereich anzuordnen, wurde die Herstellung einer Lage aus jeweils drei ETFE-Folien realisiert. Dabei wurden zwei kleine ETFE-Folien mit den Abmessungen 0,75 m x 2 m mit der langen Seite an eine größere ETFE-Folie (1,5 m x 2 m), die später die PV-Module tragen sollte, laminiert. Bild 39 zeigt die Details der einzelnen ETFE-Folien sowie eine daraus zusammengesetzte Lage des ETFE-Kissens. Das Verbinden der einzelnen ETFE-Folien erfolgte durch Lamination. Die Details der dabei entstehenden Naht sind in Bild 40 dargestellt.

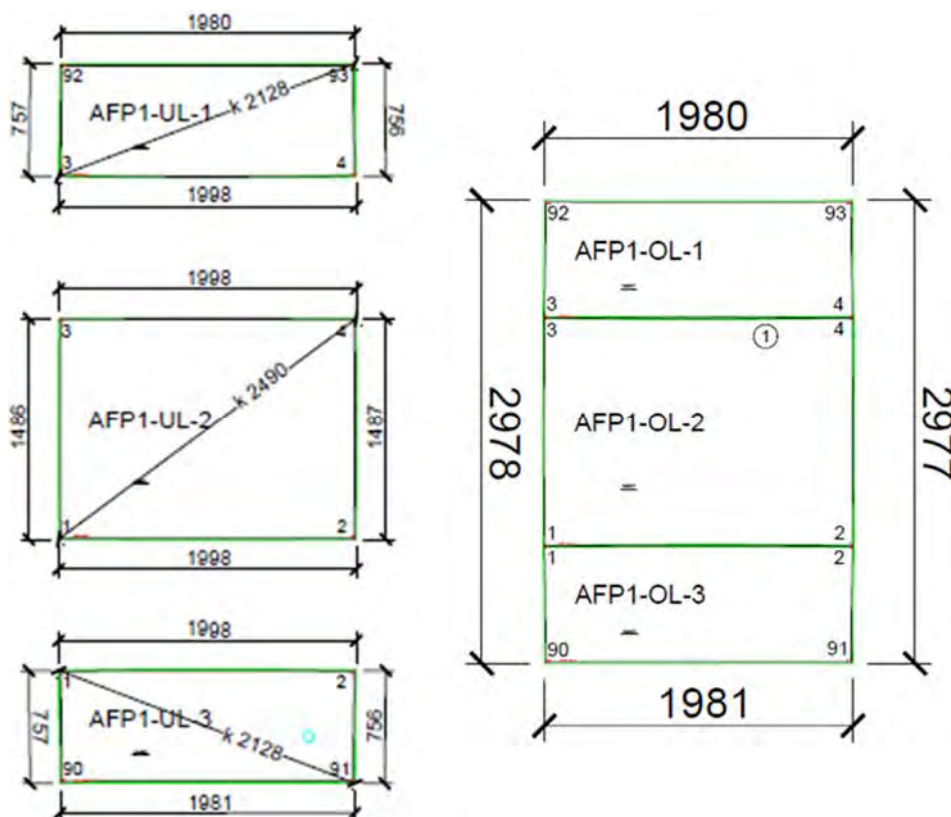


Bild 39 Links: Abmessungen der unterschiedlichen ETFE-Folien zum Zusammenfügen einer ETFE-Lage für die ETFE-Kissen-Prototypen. Rechts: Abmessungen einer gefügten ETFE-Lage.

Endbericht

Technologieentwicklung leichter, flexibler Photovoltaikmodule auf der Basis von ETFE und CIGS-Foliensolarzellen für die Architektur
Förderkennzeichen: II 3-F20-10-1-137 / SWD-10.08.18.7-12.06

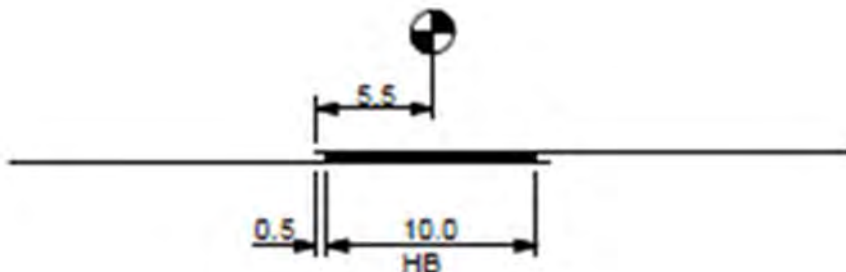
Technische Universität Dresden

Fakultät Bauingenieurwesen
Institut für Baukonstruktion
Prof. Dr.-Ing. Bernhard Weller

www.bauko.bau.tu-dresden.de

28.04.14 CK 42/55

Bild 40 Nahtdetail zum Verbinden zweier ETFE-Lagen.



Nach Herstellung der Einzellagen wurden die PV-Module mit Hilfe der angebrachten ETFE-Streifen auf das Mittelstück laminiert. Dazu war zunächst eine Längsanordnung der PV-Module geplant. Da die Ausrichtung der ETFE-Kissen-Prototypen am Aufstellungsort mit der Längsseite Richtung Süden erfolgen und die PV-Module jeweils gleichen Einstrahlungen der Sonne ausgesetzt sein sollten, wurde die Ausrichtung auf quer geändert. Die Lage der PV-Module ist in Bild 41 dargestellt.

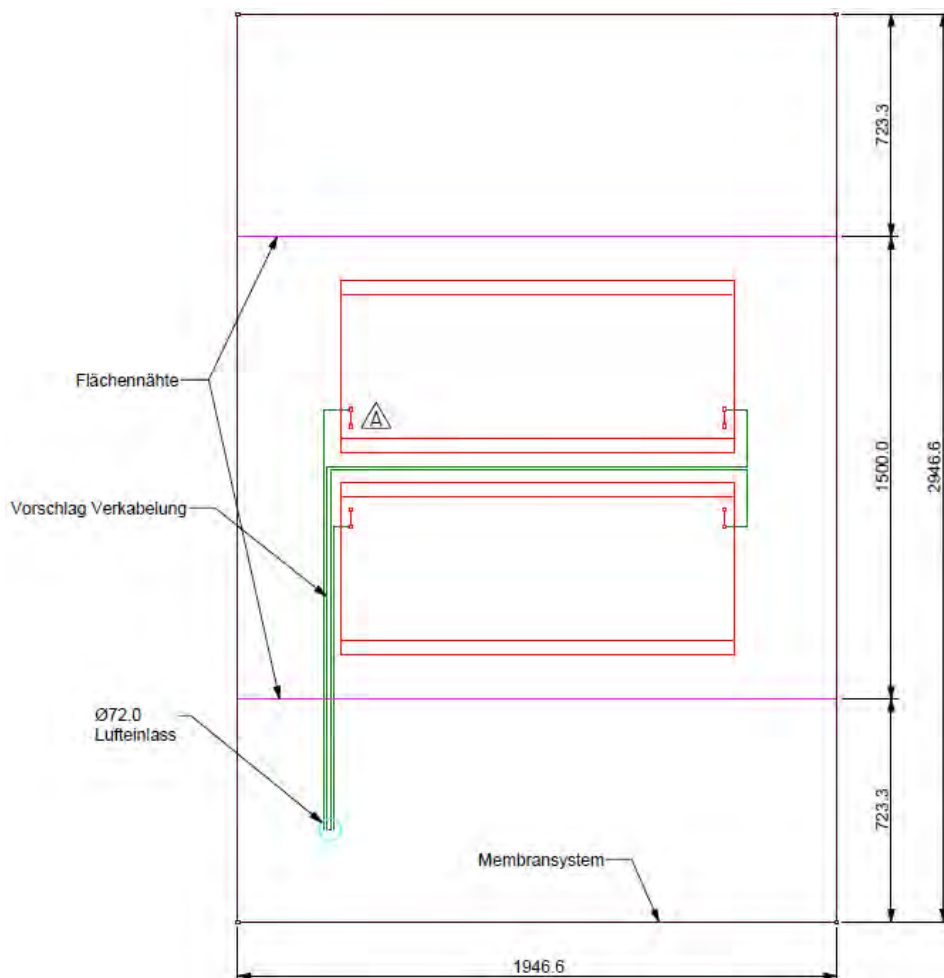


Bild 41 Lage der PV-Module auf einer ETFE-Lage - hier am Beispiel der Befestigung auf der Mittel-lage.

Endbericht

Technologieentwicklung leichter, flexibler Photovoltaikmodule auf der Basis von ETFE und CIGS-Foliensolarzellen für die Architektur
Förderkennzeichen: II 3-F20-10-1-137 / SWD-10.08.18.7-12.06

Technische Universität Dresden

Fakultät Bauingenieurwesen
Institut für Baukonstruktion
Prof. Dr.-Ing. Bernhard Weller

www.bauko.bau.tu-dresden.de

28.04.14 CK 43/55

Anschließend wurden die Einzellagen zu den ETFE-Kissen-Prototypen zusammengefügt. Auch dieser Prozessschritt erfolgte durch Laminieren. Die spätere Kissenbefestigung an den Unterkonstruktionen sollte über sogenannte Keder-schienen erfolgen, welche für die Befestigungen von ETFE-Kissen in Gebäuden als Stand der Technik gelten. Dazu wurde im Randbereich der ETFE-Kissen an allen Seiten ein Keder einlamiert, der später in eine zugehörige Schiene geschoben wurde (Bild 42).

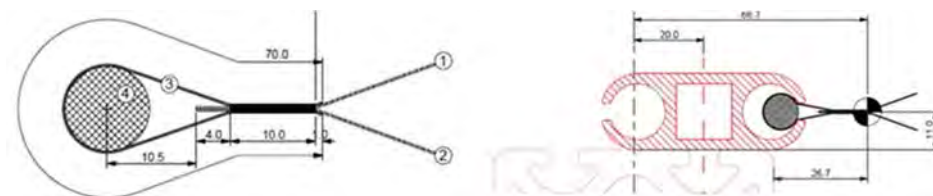


Bild 42 Details zur Ausführung des Keders der ETFE-Kissen-Prototypen und der Kederschiene auf der Unterkonstruktion.

Nach Installation der ETFE-Kissen-Prototypen auf die Unterkonstruktionen wurde die Luftversorgung angeschlossen. Vor die eigentliche Luftversorgungseinheit wurde dabei ein Adsorptionstrockner zur Luftentfeuchtung geschaltet. Beide Geräte wurden in einem beheizten Innenraum aufgestellt (Bild 43).

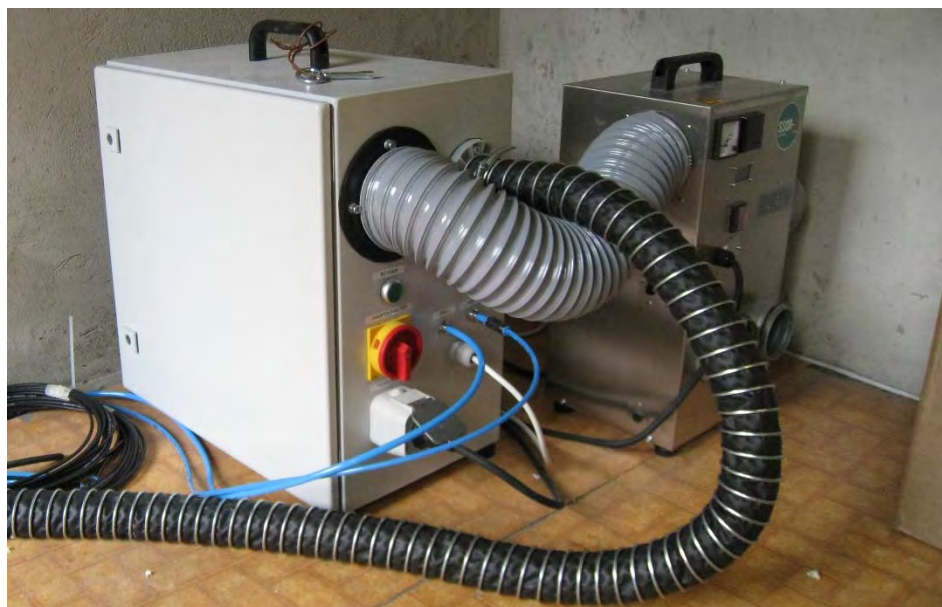


Bild 43 Luftversorgung (links) mit vorgeschaltetem Adsorptionstrockner (rechts).

Die getrocknete Luft wurde von der Luftversorgung über einen für den Außeneinsatz konzipierten Flexschlauch zu den Kissen geführt. Dabei erfolgte der Lufteintritt in die Kissen jeweils durch ein, an die ETFE-Unterseite laminiertes Lufteinlassventil (Bild 44). Die Befüllung der oberen ETFE-Kissenkammer wurde durch mehrere, in die ETFE-Mittellage gestanzte Löcher gewährleistet.

Endbericht

Technologieentwicklung leichter, flexibler Photovoltaikmodule auf der Basis von ETFE und CIGS-Foliensolarzellen für die Architektur
Förderkennzeichen: II 3-F20-10-1-137 / SWD-10.08.18.7-12.06

Technische Universität Dresden

Fakultät Bauingenieurwesen
Institut für Baukonstruktion
Prof. Dr.-Ing. Bernhard Weller

www.bauko.bau.tu-dresden.de

28.04.14 CK 44/55



Bild 44 Einlassventil für die Luftzuführung durch die untere ETFE-Lage eines ETFE-Kissen-Prototyps.

Eine Herausforderung stellte die Verkabelung der PV-Module in dem ETFE-Kissen-Prototypen mit innenliegenden PV-Elementen dar. Zum einen musste sichergestellt werden, dass die Kabel während des Transport und der Installation nicht verrutschen und andererseits mussten die Kabel aus dem Kissen herausgeführt werden. Ersteres wurde dadurch gelöst, dass die Kabel mehrfach, wie in Bild 45 gezeigt, durch Löcher in der ETFE-Mittellage geführt wurden. Das Herausführen der Kabel aus dem ETFE-Kissen gelang durch das Lufteinlassventil, so dass keine weitere Öffnung am ETFE-Kissen vorgesehen werden musste (Bild 46).



Bild 45 Kabelführung der innenliegenden PV-Module. Zur Stabilisierung wurden die Kabel durch die vorhandenen Löcher in der ETFE-Mittellage geführt.

Endbericht

Technologieentwicklung leichter, flexibler Photovoltaikmodule auf der Basis von ETFE und CIGS-Foliensolarzellen für die Architektur
Förderkennzeichen: II 3-F20-10-1-137 / SWD-10.08.18.7-12.06

Technische Universität Dresden

Fakultät Bauingenieurwesen
Institut für Baukonstruktion
Prof. Dr.-Ing. Bernhard Weller

www.bauko.bau.tu-dresden.de

28.04.14 CK 45/55

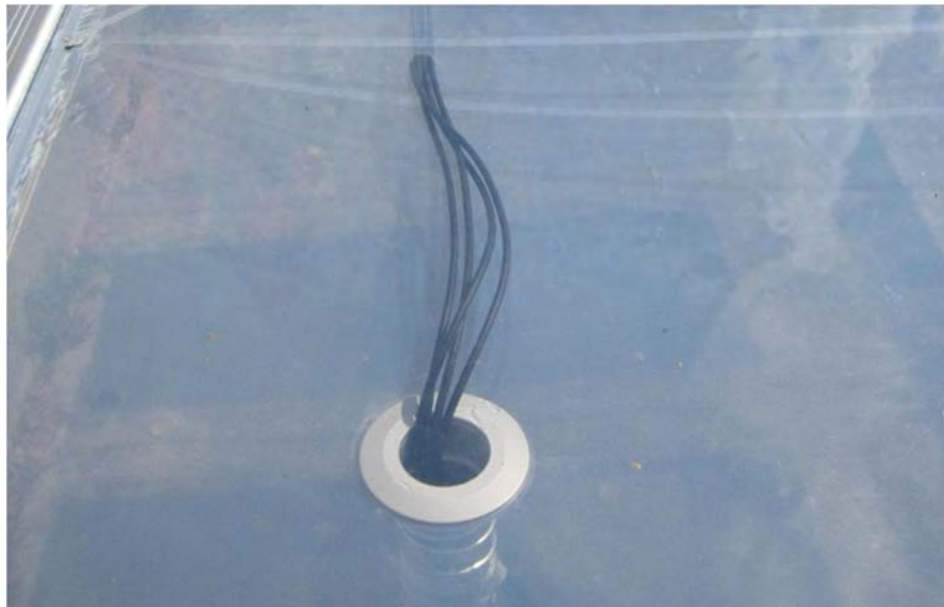


Bild 46 Auslass der Kabel der innenliegenden PV-Module durch das Einlassventil der Luftzuführung.

Untersuchungen an den ETFE-Kissen-Prototypen

Nach Abschluss aller Installationen wurde die Luftzufuhr gestartet und Verformung der ETFE-Kissen dokumentiert. Als maximale Stichhöhe konnte ein Abstand zwischen ETFE-Mittellage und ETFE-Oberlage von 22,5 cm gemessen werden. Diese ist aufgrund der größeren Steifigkeit der ETFE-Folie bei niedrigen Außentemperaturen etwas geringer. Das Gewicht der PV-Module, welche bei dem ETFE-Kissen-Prototyp mit außenliegenden PV-Modulen auf der Oberlage befestigt sind, spielt für die Stichhöhe keine Rolle. Dahingegen wird die Mittellage des ETFE-Kissen-Prototyps mit innenliegenden PV-Modulen etwas nach unten durchgebogen, da diese im Gegensatz zur Oberlage nicht durch die zugeführte Luft und den dadurch entstehenden Überdruck gestützt wird.

Während des Aufstellungszeitraums der ETFE-Kissen-Prototypen herrschten sehr unterschiedliche Wettersituationen. So herrschten Temperaturen zwischen -5 und 30 °C und es gab Niederschlag in Form von Regen und Schnee, was zur Entstehung Schnee- und Eisschichten auf den ETFE-Kissen führte. Die sich daraus ergebende Problematik des Eindringens von Feuchtigkeit zwischen PV-Modul und ETFE-Oberlage im Fall des ETFE-Kissen-Prototyps mit außenliegenden PV-Modulen wurde bereits beschrieben (Abschnitt 3.1 - Freibewitterungsprüfstand). Weiterhin sorgten in der Nähe stehende Bäume durch Laubabwurf im Herbst für eine nicht unwesentliche Verschmutzung der ETFE-Kissen. Während dies für den ETFE-Kissen-Prototyps mit innenliegenden PV-Modulen durch den Selbstreinigungseffekt der ETFE unproblematisch war und die Hauptverschmutzung hier durch Regen wieder abgespült wurde, verblieben beim ETFE-Kissen-Prototyps mit außenliegenden PV-Modulen insbesondere Verschmutzungen im Bereich der Befestigungsglaschen (Bild 47). Bei ansteigenden Temperaturen kann dies im Zusammenwirken mit der eindringenden Feuchtigkeit auch zum unerwünschten Wachstum von Algen führen. Daher wird

Endbericht

Technologieentwicklung leichter, flexibler Photovoltaikmodule auf der Basis von ETFE und CIGS-Foliensolarzellen für die Architektur
Förderkennzeichen: II 3-F20-10-1-137 / SWD-10.08.18.7-12.06

Technische Universität Dresden

Fakultät Bauingenieurwesen
Institut für Baukonstruktion
Prof. Dr.-Ing. Bernhard Weller

www.bauko.bau.tu-dresden.de

28.04.14 CK 46/55

für empfohlen die Befestigung der PV-Module umlaufend und ohne ETFE-Überstände auszuführen, auch wenn dadurch Feuchtigkeitsansammlungen im Zwischenraum von PV-Modul und ETFE-Oberlage durch die hohe Wasserdampfdurchlässigkeit der ETFE-Folie nicht gänzlich ausgeschlossen werden können.

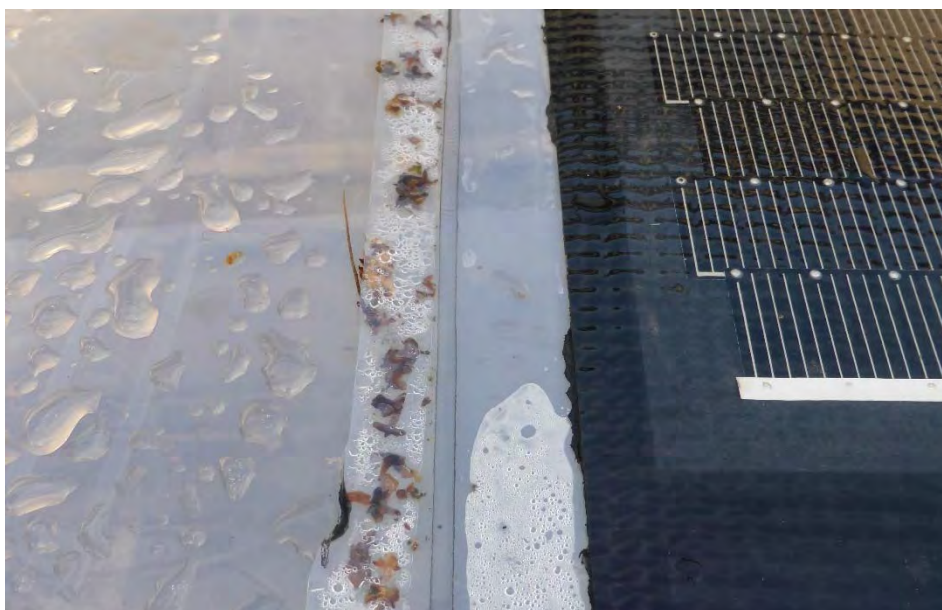


Bild 47 Verschmutzungen und Feuchtigkeit unter dem ETFE-Befestigungsstreifen der außenliegenden PV-Module.

Dem Projektpartner TU Dresden wurde vom Projektpartner Solarion Verkabelungsmaterial und leihweise das Kennlinienmessgerät cetisPV-CT-F1 und entsprechende Sensorik (Solarstrahlungssensor und Temperatursensor) zur Verfügung gestellt, um an den PV-Modulen der ETFE-Kissen-Prototypen Einstrahlungs-, Temperatur- und Leistungsmessungen durchzuführen.

Zunächst herrschten Witterungsbedingungen mit kalten Temperaturen und aufgrund der Aufbausituation zum Teil sehr geringen Einstrahlungsmengen. In Tabelle 8 sind exemplarisch für einige Messzeiträume die Messwerte dargestellt. Dabei war das Messsystem so eingestellt, dass die Ergebnisse für den PMPP (Punkt des Strom-Spannungs-Diagramms einer Solarzelle, an dem die größte Leistung entnommen werden kann) auf eine Normtemperatur von 25 °C korrigiert wurden. Es ergab sich, dass bei gleichen Einstrahlungen und etwa gleichen Temperaturen auch vergleichbare Werte für den PMPP für die PV-Module in den unterschiedlichen Positionen auf bzw. im ETFE-Kissen erhalten wurden. Einen großen Einfluss hatte die Bedeckung mit Schnee bzw. Eis, so dass die gemessene Einstrahlung in diesen Fällen erheblich reduziert war. Nach Beräumung der Kissen am 31. Januar 2014 konnten hierfür deutlich höhere Werte gemessen werden.

Endbericht

Technologieentwicklung leichter, flexibler Photovoltaikmodule auf der Basis von ETFE und CIGS-Foliensolarzellen für die Architektur
Förderkennzeichen: II 3-F20-10-1-137 / SWD-10.08.18.7-12.06

Technische Universität Dresden

Fakultät Bauingenieurwesen
Institut für Baukonstruktion
Prof. Dr.-Ing. Bernhard Weller

www.bauko.bau.tu-dresden.de

28.04.14 CK 47/55

Datum	Position der PV-Module	Temperatur in °C	Strahlung in W/m ²	PMPP	
13.11.2013	innen	5,7	5,9	3,1	
	außen	5,9	5,6	3,3	
14.11.2013	innen	8,2	94,7	1,6	
	außen	8,6	92,4	1,4	
18.12.2013	innen	-1,5	10,3	2,1	
	außen	-1,3	11,0	2,7	
	innen	-1,0	16,2	1,9	
	außen	-0,9	16,5	2,3	
	innen	0,5	32,8	1,5	
	außen	-0,7	33,3	2,0	
	innen	1,2	82,5	1,4	
	außen	1,2	80,9	1,5	
22.01.2014	innen	-0,7	3,5	9,4	Schnee
	außen	-0,7	3,0	4,3	Schnee
31.01.2014	innen	0,0	10,8	1,1	Eis
	außen	0,0	11,0	1,5	Eis
	innen	5,6	85,3	1,4	
	außen	5,6	86,2	1,4	

Tabelle 8 Messwerte zu Temperatur, Einstrahlung und PMPP unter unterschiedlichen Witterungsbedingungen.

Im Anschluss an diese Messungen wurde das Kennlinienmessgerät vom Projektpartner Solarion so umgestellt, dass die Messwerte nicht nachträglich auf die Normtemperatur korrigiert und reale Temperaturen und Einstrahlungen erfasst werden.

Mit diesen Einstellungen wurden jeweils Langzeitmessungen über eine Woche an den beiden ETFE-Kissen-Prototypen vorgenommen. Dabei wurden die Einstrahlung (Insol), die Temperatur und der PMPP (PmppUncorr) erfasst. Die Messergebnisse sind in den Diagrammen in Bild 48 und Bild 49 dargestellt. Der Vergleich der Messwerte zwischen den PV-Modulen in unterschiedlichen Positionen zeigt, dass im Bereich gleicher Einstrahlung sowohl die Temperatur als auch der PMPP bei den außenliegenden PV-Modulen geringer sind als bei den innenliegenden PV-Modulen. Bei diesem Messaufbau wurden die Temperaturen allerdings nicht direkt auf den PV-Modulen erfasst. Deshalb sollte im Anschluss an die Langzeitmessungen noch die konkrete Temperaturentwicklung auf den PV-Modulen gemessen werden.

Endbericht

Technologieentwicklung leichter, flexibler Photovoltaikmodule auf der Basis von ETFE und CIGS-Foliensolarzellen für die Architektur
Förderkennzeichen: II 3-F20-10-1-137 / SWD-10.08.18.7-12.06

Technische Universität Dresden

Fakultät Bauingenieurwesen
Institut für Baukonstruktion
Prof. Dr.-Ing. Bernhard Weller

www.bauko.bau.tu-dresden.de

28.04.14 CK 48/55

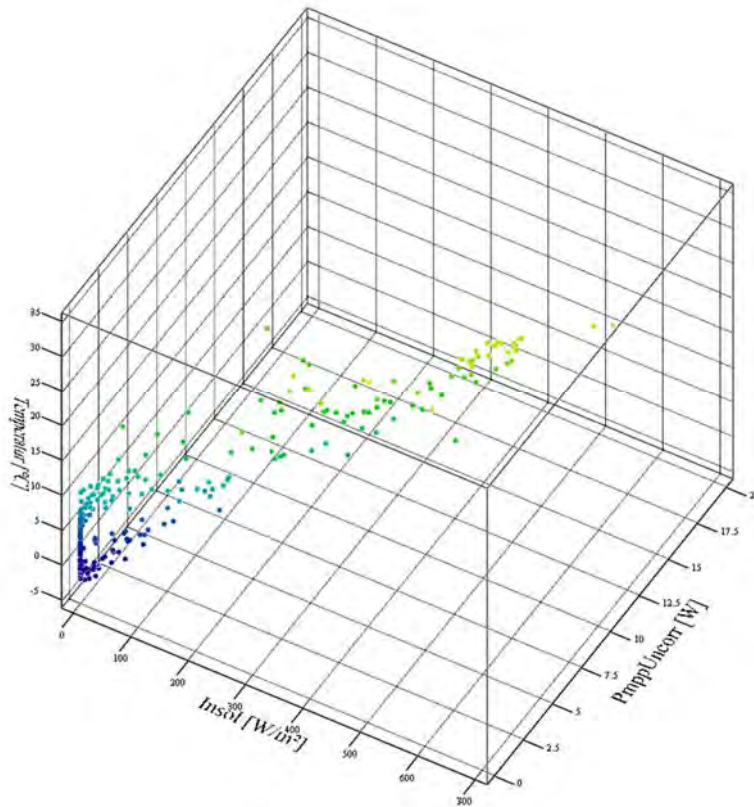


Bild 48 ETFE-Kissen-Prototyp mit außenliegenden PV-Modulen: Messwerte der Einstrahlung, der Temperatur sowie des PMPP.

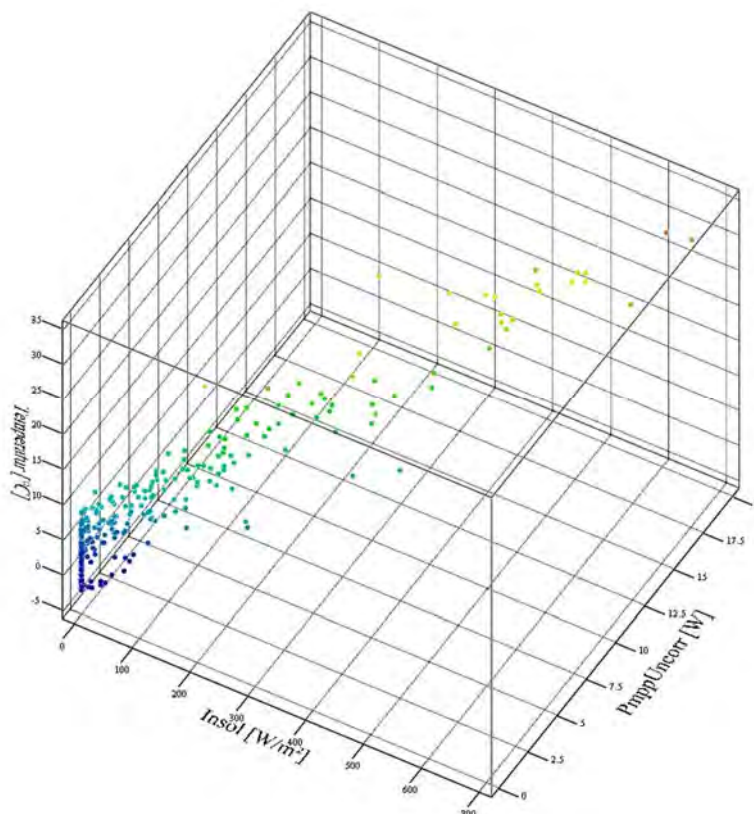


Bild 49 ETFE-Kissen-Prototyp mit innenliegenden PV-Modulen: Messwerte der Einstrahlung, der Temperatur sowie des PMPP.

Endbericht

Technologieentwicklung leichter, flexibler Photovoltaikmodule auf der Basis von ETFE und CIGS-Foliensolarzellen für die Architektur
Förderkennzeichen: II 3-F20-10-1-137 / SWD-10.08.18.7-12.06

Technische Universität Dresden

Fakultät Bauingenieurwesen
Institut für Baukonstruktion
Prof. Dr.-Ing. Bernhard Weller

www.bauko.bau.tu-dresden.de

28.04.14 CK 49/55

Dazu wurden die Positionen der Temperatursensoren nochmals verändert. Es wurden jeweils die Temperaturen direkt auf den Modulen (im Randbereich ohne Solarzellen) sowie an einer nahegelegener Kissenoberfläche aufgezeichnet. Die veränderten Positionen der Temperatursensoren sind in Bild 50 und Bild 51 dargestellt. Zusätzlich zu den Temperaturen wurden auch die jeweilige Einstrahlung und der PMPP erfasst. Die Messungen erfolgten in schneller Abfolge immer abwechselnd, so dass für beide Positionen der PV-Module bei vergleichbaren Einstrahlungswerten Ergebnisse für Temperatur und PMPP erhalten werden konnten.



Bild 50 Temperatursensoren auf und neben den innenliegenden PV-Modulen.



Bild 51 Temperatursensoren auf und neben den außenliegenden PV-Modulen.

Endbericht

Technologieentwicklung leichter, flexibler Photovoltaikmodule auf der Basis von ETFE und CIGS-Foliensolarzellen für die Architektur
Förderkennzeichen: II 3-F20-10-1-137 / SWD-10.08.18.7-12.06

Technische Universität Dresden

Fakultät Bauingenieurwesen
Institut für Baukonstruktion
Prof. Dr.-Ing. Bernhard Weller

www.bauko.bau.tu-dresden.de

28.04.14 CK 50/55

In den Diagrammen in Bild 52 und Bild 53 sind jeweils die Temperaturen auf dem PV-Modul im Vergleich mit der Temperatur auf der jeweiligen ETFE-Kissenlage aufgetragen.

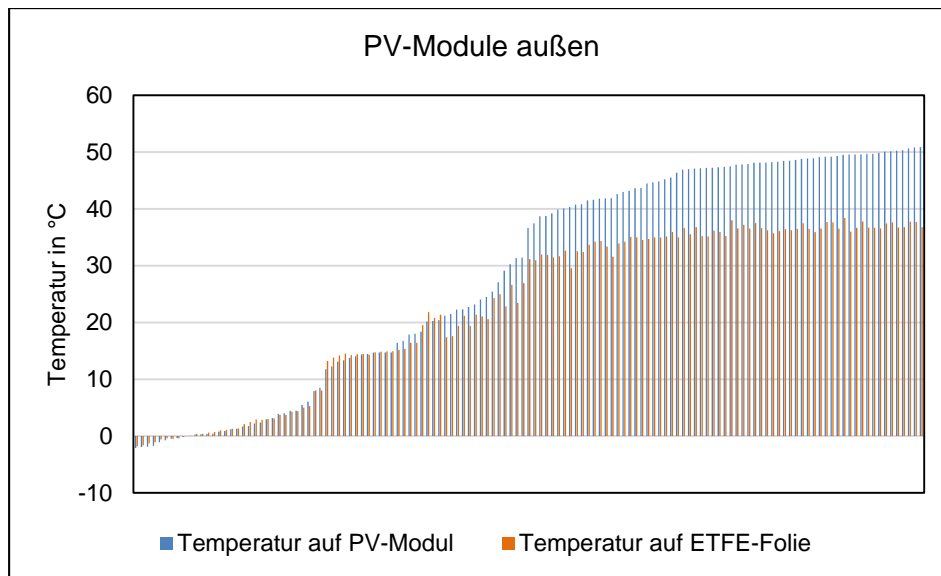


Bild 52 ETFE-Kissen-Prototyp mit außenliegenden PV-Modulen: Messwerte der Temperatur im Randbereich des PV-Moduls sowie auf der ETFE-Kissen-Oberlage.

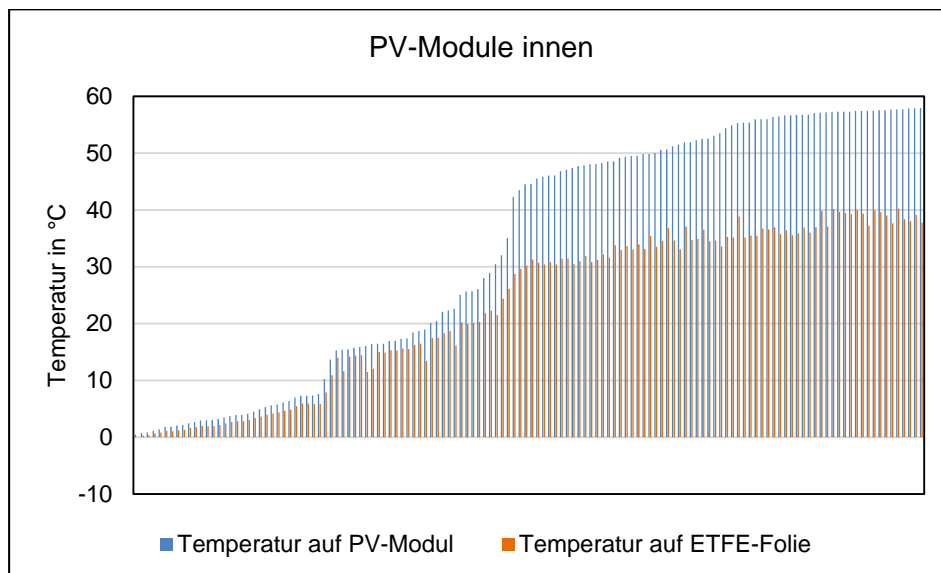


Bild 53 ETFE-Kissen-Prototyp mit innenliegenden PV-Modulen: Messwerte der Temperatur im Randbereich des PV-Moduls sowie auf der ETFE-Kissen-Mittellage.

Dabei ist festzustellen, dass die Temperaturentwicklung auf den ETFE-Folien vergleichbar ist, wobei innerhalb des ETFE-Kissens bei kalten Außentemperaturen etwas höhere Temperaturen herrschen, was mit der dauerhaften Zuführung von warmer Luft zusammenhängt. Die Maximaltemperaturen auf den ETFE-Folien liegen bei 40°C, wobei eine maximale Außentemperatur von 31 °C im gebäudenahen Schatten herrschte. Deutliche Unterschiede ergaben sich in den Messwerten der Temperaturen auf den PV-Modulen, da sich diese aufgrund der schwarzen Färbung mehr erwärmen. Die PV-Module, die auf der ETFE-Kissen-Oberlage befestigt sind, zeigten eine Maximaltemperatur von

Endbericht

Technologieentwicklung leichter, flexibler Photovoltaikmodule auf der Basis von ETFE und CIGS-Foliensolarzellen für die Architektur
Förderkennzeichen: II 3-F20-10-1-137 / SWD-10.08.18.7-12.06

Technische Universität Dresden

Fakultät Bauingenieurwesen
Institut für Baukonstruktion
Prof. Dr.-Ing. Bernhard Weller

www.bauko.bau.tu-dresden.de

28.04.14 CK 51/55

51 °C während die innenliegenden PV-Module hier einen Wert von 58 °C aufwiesen.

Eine solche Temperaturerhöhung wirkt sich auch entscheidend auf die Leistungsausbeute der PV-Module aus. Dazu finden sich in Bild 54 und Bild 55 entsprechende Diagramme, die die Temperatur und den PMPP in Abhängigkeit der Einstrahlung darstellen. Für die innenliegenden PV-Module wurden bei gleicher Einstrahlung eine höhere Modultemperatur und ein größerer PMPP gemessen.

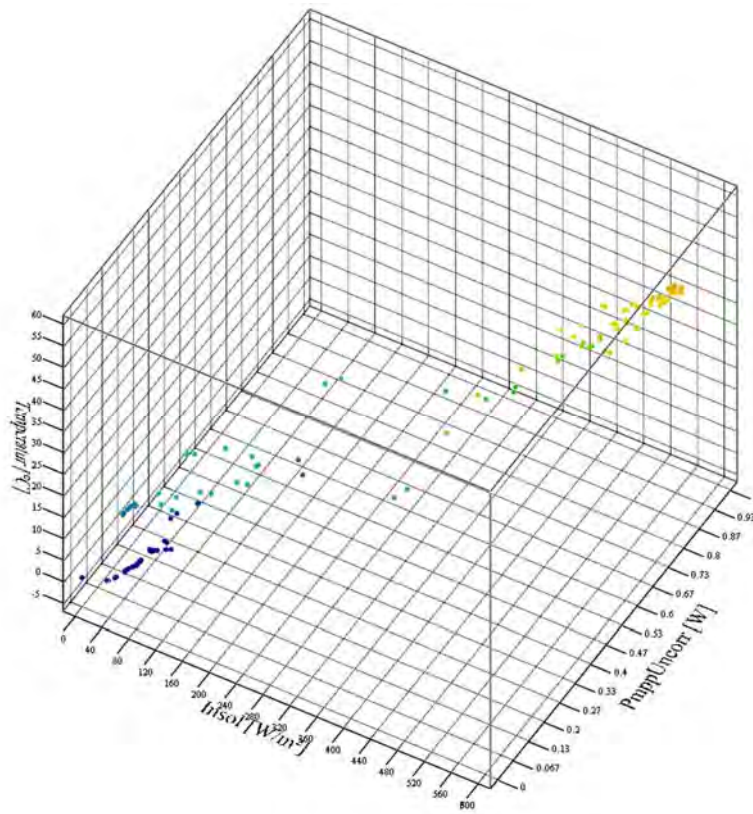


Bild 54 ETFE-Kissen-Prototyp mit außenliegenden PV-Modulen: Messwerte der Einstrahlung, der Temperatur im Randbereich des PV-Moduls sowie des PMPP.

Endbericht

Technologieentwicklung leichter, flexibler Photovoltaikmodule auf der Basis von ETFE und CIGS-Foliensolarzellen für die Architektur
Förderkennzeichen: II 3-F20-10-1-137 / SWD-10.08.18.7-12.06

Technische Universität Dresden

Fakultät Bauingenieurwesen
Institut für Baukonstruktion
Prof. Dr.-Ing. Bernhard Weller

www.bauko.bau.tu-dresden.de

28.04.14 CK 52/55

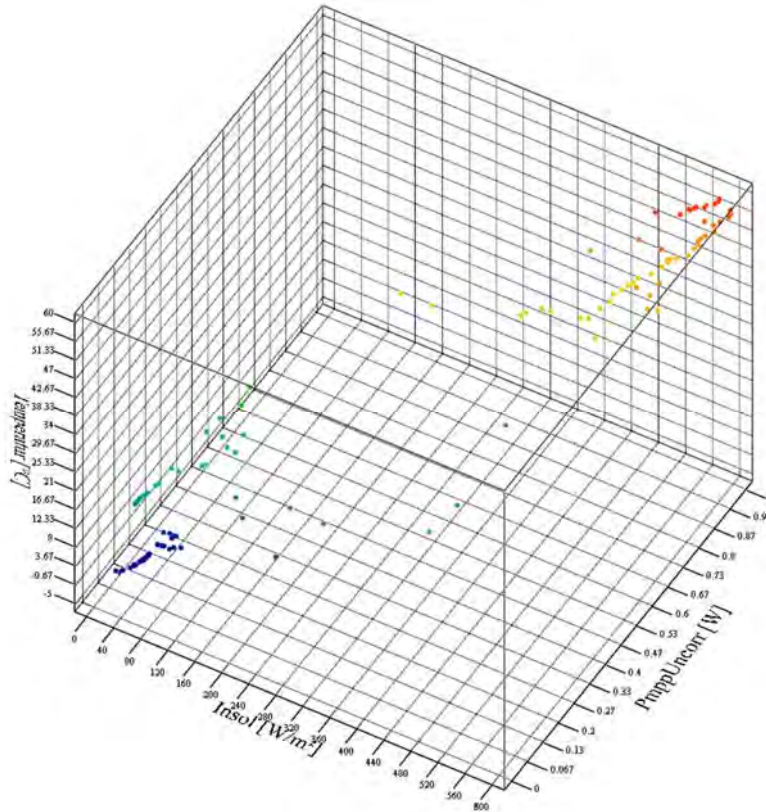


Bild 55 ETFE-Kissen-Prototyp mit innenliegenden PV-Modulen: Messwerte der Einstrahlung, der Temperatur im Randbereich des PV-Moduls sowie des PMPP.

Um feststellen zu können, ob die PV-Module während der Freibewitterung auf bzw. in den ETFE-Kissen einen Leistungsverlust erlitten haben, wurden die PV-Module zum Projektende von den Kissen geschnitten und im Sonnenlicht-Simulator („Flasher“) beim Projektpartner Solarion unter STC-Bedingungen gemessen. Eine solche Messung wurde an den PV-Modulen bereits vor der Montage auf die ETFE-Bahnen durchgeführt und dabei die Ausgangsleistung erfasst. Die Ergebnisse dieses Vorher-Nachher-Vergleichs lagen zum Abgabetermin des Endberichts noch nicht vor, können aber in Kürze beim Projektpartner Solarion eingesehen werden.

3.5 Arbeitspaket 5

Das Forschungsprojekt wurde jeweils mit einem Poster zu den Tagungen „Glasbau“ 2013 und 2014 vorgestellt. Dadurch wurde ein Publikum mit Interesse an der Errichtung von transparenten Gebäudehüllen erreicht. Zudem war eine Ausstellung eines der ETFE-Kissen-Prototypen vor deren Demontage zum Projektende zur Tagung „Glasbau 2014“ geplant. Aufgrund der hohen Brandschutzvorgaben am Veranstaltungsort im Hörsaalzentrum der Technischen Universität Dresden wurde aber der Betrieb elektrischer Anlagen und damit auch der Luftversorgung für die ETFE-Kissen untersagt. Damit konnte die Ausstellung letztendlich nicht realisiert werden.

Endbericht

Technologieentwicklung leichter, flexibler Photovoltaikmodule auf der Basis von ETFE und CIGS-Foliensolarzellen für die Architektur
Förderkennzeichen: II 3-F20-10-1-137 / SWD-10.08.18.7-12.06

Technische Universität Dresden

Fakultät Bauingenieurwesen
Institut für Baukonstruktion
Prof. Dr.-Ing. Bernhard Weller

www.bauko.bau.tu-dresden.de

28.04.14 CK 53/55

Während des Projektzeitraums fanden ein Kick-Off-Meeting und jeweils ein Projekttreffen bei den Projektpartnern statt.

28.08.2012	Kick-Off-Meeting	TU Dresden, Dresden
11.12.2012	1. Projekttreffen	TU Dresden, Dresden
25.04.2013	2. Projekttreffen	Nowofol, Siegsdorf
03.09.2013	3. Projekttreffen	Solarion, Dresden

Alle Projektpartner haben jeweils ihre Projektarbeiten in einer kurzen Präsentation vorgestellt und anschließend deren Ergebnisse sowie das weitere Vorgehen konstruktiv diskutiert. Zu den Treffen sind jeweils auch die externen Arbeitsgruppenmitglieder eingeladen worden, die durch fachliche Gespräche Anregungen zu den Projektarbeiten geben konnten. Weiterhin konnte ein Erfahrungsaustausch durch Betriebsbesichtigungen beim jeweiligen Projektpartner erzielt werden. Zu den Ergebnissen der Treffen wurde jeweils ein Protokoll angefertigt.

4 Zusammenfassung der Ergebnisse

Die Konstruktion von leichten, transparenten Gebäudehüllen aus ETFE-Kissen hat sich bereits vielfach in unterschiedlichsten Ausführungen bewährt. Schwerpunkt des abgeschlossenen Forschungsprojektes war die Kombination solcher Konstruktionen mit PV-Modulen auf Basis von hochflexiblen CIGS-Solarzellen.

Da ETFE-Folien mit ihrer sehr niedrigen Oberflächenspannung und den damit verbundenen geringen Haftungseigenschaften ein schwieriger Fügepartner sind, musste ein Fügeverfahren entwickelt werden, mit dem es trotzdem gelingt, PV-Module dauerhaft auf ETFE-Kissen zu befestigen. Es wurde die Lösung entwickelt, die PV-Module an ihrer Längsseite mit jeweils einem Streifen ETFE-Folie zu versehen, um dann das klassische Verfahren des Verschweißens von ETFE als Fügeverfahren zur Aufbringung der PV-Module auf die ETFE-Kissenlagen verwenden zu können. Dabei bestand die Herausforderung, ein geeignetes Material zu finden, um die ETFE-Streifen an die PV-Module zu laminieren. Mit dem thermoplastischen Silikonelastomer Geniomer[®] wurden zunächst Kleinteilprüfkörper aus ETFE hergestellt und diese dann mechanisch untersucht. Dabei zeigte sich, dass dieser Verbund ausreichend große Haftkräfte besitzt, um einem Haftungsverlust durch Verformung des biegeweichen Werkstoffs ETFE unter Last- und Temperatureinwirkung widerstehen zu können. Anschließend gelang es erfolgreich diesen Verbund auch mit den PV-Modulen herzustellen.

Um die PV-Module eben auf die ETFE-Kissenlagen laminieren zu können, mussten die PV-Module mit vorn liegenden und damit besonders wetterfest auszuführenden Anschlussdosen versehen werden. Das Anschweißen der PV-Module mit den ETFE-Streifen gelang problemlos ohne Schädigungen an den PV-Modulen zu verursachen.

Endbericht

Technologieentwicklung leichter, flexibler Photovoltaikmodule auf der Basis von ETFE und CIGS-Foliensolarzellen für die Architektur
Förderkennzeichen: II 3-F20-10-1-137 / SWD-10.08.18.7-12.06

Technische Universität Dresden

Fakultät Bauingenieurwesen
Institut für Baukonstruktion
Prof. Dr.-Ing. Bernhard Weller

www.bauko.bau.tu-dresden.de

28.04.14 CK 54/55

Es wurden zwei verschiedene dreilagige ETFE-Kissen-Prototypen hergestellt, wobei sich die PV-Module zum einen auf der ETFE-Oberlage und damit außen und zum anderen auf der ETFE-Mittellage und damit in der oberen Kammer des ETFE-Kissens befanden. An den aufgebauten ETFE-Kissen-Prototypen wurden physikalische und solartechnische Untersuchungen durchgeführt. Dabei sollte unter anderem geklärt werden, ob die sich die Anbringung der PV-Module im Kisseninneren als besonders günstig erweist, um die wasserempfindlichen CIGS-Solarzellen vor feuchtigkeitsbedingten Schäden schützen zu können. Allerdings zeigte sich, dass die Atmosphäre im Kisseninneren trotz dauerhafter Zuführung getrockneter Luft stark von den Umgebungsbedingungen abhing und bisweilen eine relative Luftfeuchte bis zu 70 % aufwies. Dies wurde durch die große Wasserdampfdurchlässigkeit der ETFE-Folien bedingt.

Um diese Wasserdampfdurchlässigkeit zu verringern, sollte eine Barrierschicht auf der ETFE-Folie aufgebracht werden. Die entwickelten Barrierschichten wurden auf PV-Minimodule appliziert und einem Damp-Heat-Test unterworfen. Keine der entwickelten Barrierschichten hielt dieser Umweltsimulationsprüfung stand. Aus diesem Grund wurde bei der Entwicklung und Herstellung der ETFE-Kissen-Prototypen auf eine herkömmliche Barrierefolie zurückgegriffen.

Die Untersuchungen an den ETFE-Kissen-Prototypen zeigten, dass die Leistungsausbeute der innenliegenden PV-Module vergleichsweise etwas höher war. Zudem besitzt die Anordnung im Kisseninneren den Vorteil, dass im Befestigungsbereich keine Verschmutzungen oder Wasseransammlungen auftreten. Dies kann aber auch bei den außenliegenden PV-Modulen durch umlaufendes und überstandsfreies Anschweißen der ETFE-Streifen erreicht werden. Die Anbringung der PV-Module auf der ETFE-Kissen-Oberlage erleichtert auch den Austausch defekter Module, der bei PV-Modulen innerhalb des ETFE-Kissens den gleichzeitigen Austausch des gesamten Kissens bedeutet.

Endbericht

Technologieentwicklung leichter, flexibler Photovoltaikmodule auf der Basis von ETFE und CIGS-Foliensolarzellen für die Architektur
Förderkennzeichen: II 3-F20-10-1-137 / SWD-10.08.18.7-12.06

Technische Universität Dresden

Fakultät Bauingenieurwesen
Institut für Baukonstruktion
Prof. Dr.-Ing. Bernhard Weller

www.bauko.bau.tu-dresden.de

28.04.14 CK 55/55

5 Literatur

- [1] A. LeCuyer: ETFE - Technologie und Entwurf. Basel, Boston, Berlin: Birkhäuser, 2008.
- [2] F. Kaltenbach: DETAIL Praxis - Transluzente Materialien: Glas - Kunststoff - Metall. München: Institut für internationale Architekturdokumentation, 2004.
- [3] M. Seidel: Tensile Surface Structures – A Practical Guide to Cable and Membrane Construction. Berlin: Ernst & Sohn, 2009.
- [4] R. Off: Bauen mit Membranen - Festes Kissen. Deutsches Architektenblatt 8. 2008, S.3.
- [5] K.-M. Koch: Bauen mit Membranen. München: Prestel, 2004.
- [6] DIN 4102-1:1998-05: Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen - Teil 1: Baustoffe; Begriffe, Anforderungen und Prüfungen. Berlin, Beuth, 1998.
- [7] DIN 13501-1:2010-01: Klassifizierung von Bauprodukten und Bauarten zu ihrem Brandverhalten - Teil 1: Klassifizierung mit den Ergebnissen aus den Prüfungen zum Brandverhalten von Bauprodukten. Berlin, Beuth, 2010.
- [8] J. Knippers: Edition DETAIL - Atlas Kunststoffe und Membranen. München: Institut für internationale Architekturdokumentation, 2010.
- [9] K. Moritz: ETFE-Folie als Tragelement. Dissertation. München: TU München, Fakultät für Architektur, Institut für Entwerfen und Baukonstruktion, Lehrstuhl für Tragwerksplanung, 2007.
- [10] K. Müller et al.: Permetionsmessungen von Folien. Kunststoffe 7. 2011, S. 75-80.
- [11] J. Fahlteich et al.: Transparente Barrierschichten auf flexiblen Polymer substraten - Vergleich und Bewertung verschiedener Beschichtungsverfahren für Einzel- und Mehrschichten. Vakuum in Forschung und Praxis 23 (4). 2011, S. 29-37.
- [12] K. Vasko: Schichtsysteme für Verpackungsfolien mit hohen Barriereigenschaften. Dissertation. München: TU München, Wissenschaftszentrum Weihenstephan für Ernährung, Landnutzung und Umwelt, 2006.
- [13] InovisCoat GmbH: Verbundmaterial und Verfahren zum Herstellen eines derartigen Verbundmaterials. Patent DE102006043216A1. Leverkusen, 2007.
- [14] www.inoviscoat.de
- [15] W. Brockmann et al.: Klebtechnik - Klebstoffe, Anwendungen und Verfahren. Weinheim: Wiley-VCH, 2005.
- [16] G. Habenicht: Kleben: Grundlagen, Technologien, Anwendungen. Berlin, Heidelberg: Springer, 2006.
- [17] DIN EN ISO 527:2012-06: Kunststoffe - Bestimmung der Zugeigenschaften. Berlin, Beuth, 2012.