

# Solarzellenverkapselung für Polycarbonatmodule

Dr.-Ing. Eva Bittmann  
Vereidigte Sachverständige für Kunststoffe  
werkstoff&struktur  
Staffelsteiner Straße 6  
96274 Herreth

Tel. 09573 / 340324  
Fax 09573 / 340325  
[bittmann@werkstoff-und-struktur.de](mailto:bittmann@werkstoff-und-struktur.de)  
[www.werkstoff-und-struktur.de](http://www.werkstoff-und-struktur.de)

Oliver Mayer, Marcus Zettl, Omar Stern  
GE Global Research  
Freisinger Landstrasse 50  
D-85748 Garching b. München

Tel. 089 / 5528-3432  
Fax 089 / 5528-3102  
[marcus.zettl@research.ge.com](mailto:marcus.zettl@research.ge.com)  
[www.ge.com](http://www.ge.com)

## 1. Einleitung

Transparente Kunststoffe, insbesondere Polycarbonat (PC), eignen sich aus verschiedenen Gesichtspunkten für die Anwendung in Photovoltaikmodulen. Zum einen reduzieren sie gegenüber herkömmlichen verglasten Modulen deutlich das Gesamtgewicht. Außerdem weist der Kunststoff eine hohe Bruchfestigkeit sowie Zähigkeit auf. Auch das flexible Fertigungsverfahren, die Kunststoffextrusion, bietet vielfältige Möglichkeiten der Werkstoffmodifizierung oder Oberflächengestaltung.

Das Gesamtkonzept „Modul“ ist allerdings auf den Werkstoff Glas abgestimmt. So ist zu prüfen, ob sich die bislang im Verbund verwendeten Materialien auch für die Kunststoffverglasung eignen. Auch die Herstellungsverfahren, z.B. das Laminieren von Folien, bedarf der Überprüfung bzw. Anpassung. In erster Linie sollte im Rahmen der vorliegenden Recherche geklärt werden, welche Verkapselungs-

materialien für ein PC-verglastes Photovoltaikmodul zum Einsatz kommen können und welche Vor- und Nachteile sie gegenüber einem herkömmlichen Modul aufweisen. Der prinzipielle Aufbau eines herkömmlichen PV-Moduls ist in Bild 1 dargestellt.

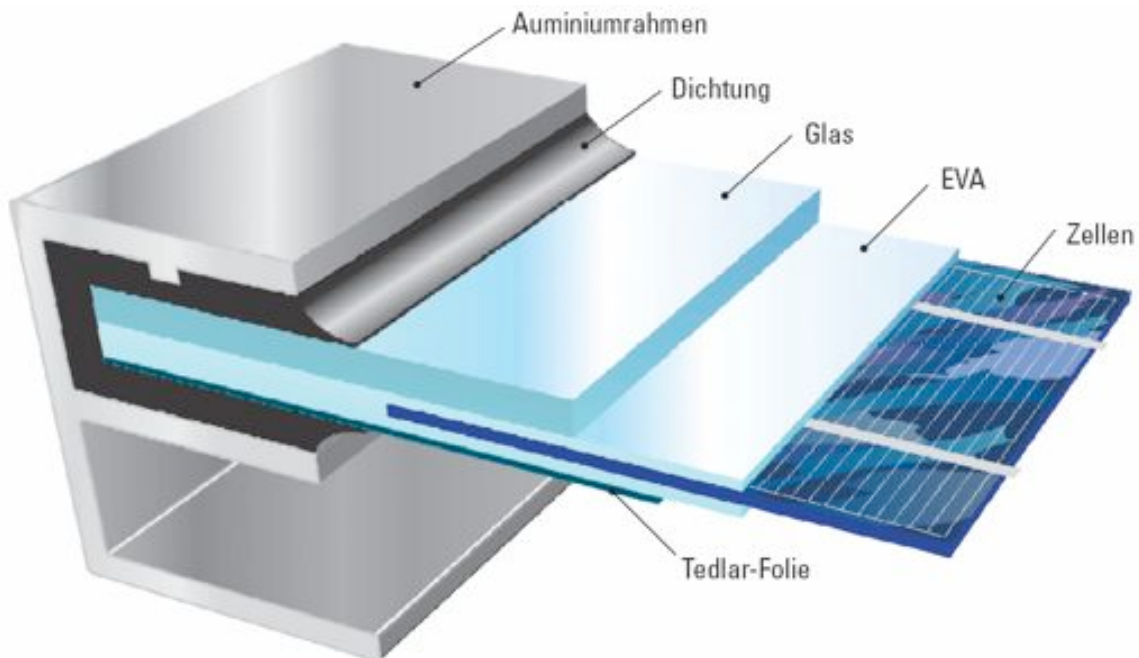


Bild 1: Prinzipieller Aufbau eines Photovoltaikmoduls [DGS – Berlin]

## 2. Der Werkstoff Polycarbonat

Kunststoffe allgemein finden immer mehr Eingang in alle Bereiche der Technik, da sie meist kostengünstig, mit geringem Energieaufwand und kurzen Zykluszeiten hergestellt werden können. Sie bieten hohe Gestaltungsfreiheit der Konstruktion sowie viele Möglichkeiten der Funktionsintegration – beispielsweise lassen sich Montagevorrichtungen, Dichtungen o.ä. direkt im Fertigungsprozess in den Kunststoff einbringen.

Der Werkstoff Polycarbonat (PC) ist ein amorpher technischer Thermoplast, der sich durch hohe Transparenz sowie hohe Festigkeit und Steifigkeit auszeichnet. PC ist wegen der herausragenden Zähigkeit eines der wenigen polymeren transparenten Konstruktionsmaterialien, das hohe Schlagbeanspruchungen erträgt. Polycarbonat ist daher als Glasersatz in bruchkritischen Anwendungen, wie z.B. bei Motorradhelmvisieren, Sportbrillen und in der Medizintechnik im Einsatz.

Eigenschaft	Kennwert	Norm
Lichttransmission	88-90 %	ASTM D1003
Trübung	< 0,8 %	ASTM D1003
Zug-E-Modul	2.350 N/mm <sup>2</sup>	ISO 527
Zug-Streckspannung	63 N/mm <sup>2</sup>	ISO 527
Zug-Bruchdehnung	100 %	ISO 527
Kerbschlagzähigkeit Izod, 23 °C	12 kJ/mm <sup>2</sup>	ISO 180/1A
Kerbschlagzähigkeit Izod, -30 °C	10 kJ/mm <sup>2</sup>	ISO 180/1A
Wärmeformbeständigkeit Vicat B50	140 °C	ISO 306

Tabelle 1: Werkstoffkennwerte von Polycarbonat für Außenanwendungen [Lexan 123 R]



Bild 2: Dach der Amsterdam Arena, bestehend aus Lexan solar control IR® [Sabic Innovative Plastic]

Im Bauwesen hat sich Polycarbonat in Form von Massiv- und Stegplatten, z.B. zur Gestaltung transparenter Dächer (Stadien, Bahnhöfe etc.), seit Jahrzehnten bewährt. Konzepte zur Langzeitbeständigkeit von PC-Bauteilen auch unter Freibewitterung sind konsequent weiterentwickelt worden. Insbesondere neuartige UV-Beschichtungen ermöglichen heutzutage Lebensdauern von mehr als 20 Jahren und erfüllen somit die Anforderungen an PV-Module und Gebäudeelemente. Diese Eigenschaften bieten besonders für die gebäudeintegrierte Photovoltaik eine Vielzahl an Anwendungsmöglichkeiten. Tabelle 1 listet einige wesentliche Kennwerte von Polycarbonat auf. In Bild 2 ist eine typische Außenanwendung von UV-stabilisiertem PC dargestellt.

### **3. Solarzellenverkapselung - Grundsätzliche Erwägungen**

Herkömmliche Photovoltaikmodule bestehen aus einer oberen Glasschicht, unter der sich beidseitig eingekapselte Solarzellen befinden. Die Rückseite kann ebenfalls aus Glas bestehen (Doppelglasmodule) oder aber aus abdichtender Folie (Glas-Folien-Module, s. Bild 1). Das Material zur Einkapselung der Solarzellen ist in den überwiegenden Fällen Ethylen-Vinylacetat EVA. Da sich letzteres zwar prinzipiell bewährt hat, es aber dennoch Optimierungspotenzial gibt, wurden Verkapselungsmaterialien auf Basis andere Kunststoffe bzw. Kautschuke entwickelt.

Die Fragestellung zu vorliegender Recherche war:

***Welches Einkapselungsmaterial eignet sich für den Einsatz in einem Photovoltaikmodul mit Polycarbonat-Verglasung?***

Die Recherche umfasst mehrere Werkstoffe, zu denen Informationen zu folgenden Themen gesammelt wurden:

- Grundsätzliche Eignung des Werkstoffs für die Solarzellenverkapselung
- Kompatibilität zu Polycarbonat
- Verarbeitungsverfahren.

Prinzipiell kann man zwei Sorten von Verkapselungen unterscheiden, und zwar Laminierfolien und Gießharze, wobei erstere in Volumen Anwendungen etabliert sind. Nachfolgende Materialbeschreibungen gliedern sich entsprechend Bild 3 in Gießharze (Polyurethangießharz und Silicongießharz, evtl. auch Fluorsilicon und Epoxid) sowie Laminierfolien (EVA, TPU, PVB, Ionomer).

Moderne Materialentwicklungen gehen dahin, den komplexen Anforderungen an Lebensdauer, Dichtigkeit und Designfreiheit von PV-Modulen mit Hilfe sogenannter Multilayerverkapselungen zu begegnen.

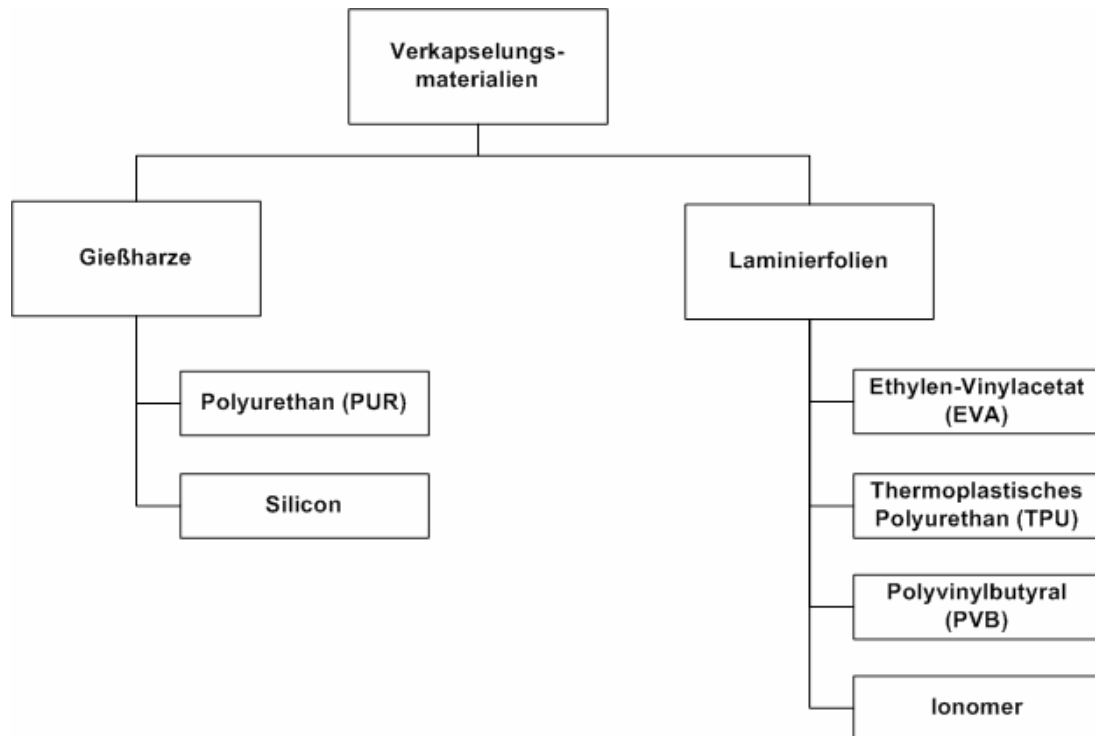


Bild 3: Einteilung verschiedener möglicher Verkapselungsmaterialien für PV-Module

## 4. Verkapselungsmaterialien

### 4.1 Gießharze

In der recherchierten Literatur finden sich Hinweise auf zwei Gießharz-Materialien, Polyurethan und Silicon, für die Verkapselung von Solarzellen. Gießharze können vermutlich aufgrund ihres gelartigen Charakters besseren Ausgleich thermomechanischer Spannungen gewährleisten, z.B. bei der Kombination von Substraten mit starken Unterschieden im Ausdehnungsverhalten (PC / Solarzellen). Allerdings handelt es sich um vernetzende Systeme, d.h. im Verlauf der Verkapselung findet eine Reaktion zwischen zwei oder mehr reaktiven Ausgangsstoffen statt, aus denen das Gießharz gebildet wird. Dies kann zu vergleichsweise langen Zykluszeiten führen. Ebenso sind die Verarbeitungsmethoden möglicherweise aufwändiger als beim Folienlaminieren.

#### **4.1.1 Polyurethan-Gießharz (PUR)**

Auf dem Markt existieren bereits PC-Dünnschicht-Module, bei denen die Solarzellen mittels PUR-Gießharz eingebettet sind. Diese Module besitzen Abdeckungen aus PC (und PMMA) und werden z.B. auf Booten oder an Bushäuschen installiert. Durch die weiche, gelartige PUR-Masse wird das unterschiedliche Ausdehnungsverhalten von PC und Siliciumzellen kompensiert. Bei dem Gießharz handelt es sich um ein reaktives Polyurethan-System auf Basis eines modifizierten Isocyanates. Polyurethane entstehen durch Reaktion von Isocyanaten mit Polyolen. Zusätzlich gibt man Katalysatoren zur Beschleunigung der relativ langsamen Härtingsreaktion zu.

Prinzipiell ist anzunehmen, dass geeignete PUR-Gießharze eine recht gute Verträglichkeit zu PC aufweisen. Zu beachten ist aber, dass die Gruppe der PUR-Elastomere eine große chemische Bandbreite aufweist, so dass die Kompatibilität einzeln zu prüfen ist. Durch die chemische Reaktion im Fertigungsprozess kommt das PC zudem in Kontakt mit den niedermolekularen Ausgangskomponenten Isocyanat und Polyol, gegebenenfalls sogar über längere Zeiträume, falls die Aushärtung nicht vollständig verläuft. Weitere Vorbehalte gegenüber PUR liegen z.B. in der Feuchteempfindlichkeit.

Insgesamt ist zu vermuten, dass nach heutigem Kenntnis- und Entwicklungsstand keine kommerziell verfügbaren Polyurethane in der Lage sind, in einer Modulkonstruktion mit Polycarbonatverschiebung die laut Norm geforderte Langzeitstabilität zu erbringen.

#### **4.1.2 Silicon-Gießharz**

Silicon ist ein klassisches Material für die Verkapselung elektronischer Komponenten. Es kann, ähnlich Polyurethan, auch weich-gelartig eingestellt werden. Die Firma Dow bietet mit dem Werkstoff Sylgard 184 explizit ein Vergussmaterial für herkömmliche Photovoltaikmodule (Glas) an. Diese 2K-Vergussmasse ist seit über 20 Jahren im Feld erprobt; eine gute UV-Stabilität ist anzunehmen. Als Anwendungen im Bereich Verkapselung gibt es Solarleuchten, allerdings mit Glasabdeckung. Das Sylgard 184 wird aber auch als Einbettungsmaterial bei PMMA-Verschiebung von sogenannten „solar concentrators“ verwendet.

## **Kombination PC-Silicon-Gießharz:**

Für die Haftung des Sylgard auf diversen Substraten (auch Kunststoff) existiert eine Palette an Primern. Es wurden erste Untersuchungen zur Haftung von Siliconklebern auf Kunststoffen (auch PC) durchgeführt. Dabei stellte sich heraus, dass sie die unterschiedlichen thermischen Ausdehnungen zwischen Polycarbonat und der Solarzelle hervorragend ausgleichen können. Durch ihre Elastizität schützen sie die Solarzelle, indem sie Vibrationen und Stöße, wie sie z.B bei Hagel oder Transport und Montage entstehen, abdämpfen.

Bei der Handhabung ist darauf zu achten, dass keine Lufteinschlüsse zwischen der Solarzelle und der Polycarbonatplatte entstehen. Dies kann durch Silicone mit niedriger Viskosität erreicht werden.

## **4.2 Laminierfolien**

Zum Ende der Recherche hat sich herausgestellt, dass die Kombination von Kunststoffverschiebungen mit den dünnen Laminierfolien möglicherweise ungünstig ist. Der große Unterschied in den thermischen Ausdehnungskoeffizienten von Solarzellen und Kunststoff kann durch eine Laminierfolie im Gegensatz zur Gießharzverkapselung vermutlich nicht aufgefangen werden. Demgegenüber hat es offenbar aber bereits auch positive Entwicklungsansätze gegeben. Die nachfolgenden Informationen, die vorher erarbeitet wurden, sind unter diesem Aspekt zu betrachten.

### **4.2.1 Ethylen-Vinylacetat (EVA)**

EVA ist das klassische Verkapselungsmaterial für PV-Module mit Glasabdeckung. Aufgrund der Massenanzahl ist es kostengünstig, hat aber als Nachteile eine vergleichsweise schlechte Lagerstabilität der Ausgangskomponenten, lange Zykluszeiten wegen der notwendigen Vernetzung und eine nicht optimale UV-Beständigkeit. Daher schied dieses Material bei der Erarbeitung eines neuen Modulkonzeptes bislang aus.

### **4.2.2 Thermoplastisches Polyurethan (TPU)**

Thermoplastisches Polyurethan ist u.a. als Folie erhältlich. Für Photovoltaik-anwendungen kommen aliphatische, witterungsbeständige TPU zum Einsatz.

Lieferanten sind z.B. PP GmbH mit Etimex Vistasolar TPU und Bayer MaterialScience mit Desmopan. Das zugehörige Verarbeitungsverfahren, das vakuumfreie kontinuierliche Laminieren, wurde patentiert.

Vorteile von TPU gegenüber EVA:

- Thermoplastisch verarbeitbar, d.h. kurze Laminierzeiten, recycle- bzw. reparierfähig
- Verarbeitung im Rollenlaminator (kein Vakuum)
- Weniger Probleme mit der Lagerstabilität der Ausgangskomponenten.

### **Kombination PC-TPU:**

Diese Werkstoffkombination gilt prinzipiell als kompatibel, wie entsprechende Verträglichkeitstabellen und Anwendungen, v.a. aus dem Bereich 2-Komponenten-Spritzgießen, zeigen.

Auch bei TPU ist die Feuchteempfindlichkeit zu beachten. Module müssen sehr gut gekapselt werden, um Wassereindringen zu vermeiden. Bei Glas-Folien-Modulen empfiehlt sich beispielsweise eine Rückseitenfolie mit TPT-Aluminium-Kombination. Das im TPU enthaltene Silan dient als Haftvermittler zwischen PC und der Folie.

### **4.2.3 Polyvinylbutyral (PVB)**

PVB-Folie ist bekannt aus der Verglasung. Man setzt sie als Schicht in Verbundsicherheitsglas ein, z.B. bei Automobil-Windschutzscheiben, in schusssicherem Glas etc.

In den letzten Jahren gibt es Bestrebungen, dieses PVB als EVA-Ersatz in der Photovoltaik einzusetzen. Vorteile gegenüber EVA sind bessere UV-Stabilität und bessere Haftung an Glas. Die UV-Transparenz ist fast genauso gut wie bei EVA. Nachteilig ist jedoch die Feuchteempfindlichkeit von PVB, die aber verbessert werden konnte. Laminierzeiten können etwa auf die Hälfte reduziert werden, ein Autoklav ist nicht erforderlich.

## **Kombination PC-PVB:**

Es gibt vereinzelt Literaturhinweise zu Verbunden aus PC und PVB. Allerdings scheint der Weichmacheranteil im PVB für die Langzeitstabilität des PCs kritisch zu sein. Von einer Anwendung ist daher vermutlich abzuraten.

### **4.2.4 Ionomer**

Surlyn® ist ein thermoplastisch verarbeitbares, transparentes Ethylen-Methacrylsäure-Copolymer (E/MAA), ein sog. Ionomer, das kommerziell als Folie und für Spritzgießteile vertrieben wird. Langjährige Folienanwendungen gibt es z.B. in der Verpackungsindustrie, es existiert aber auch eine Photovoltaik-Version des Surlyn. Vorteile von Ionomer gegenüber EVA sind:

- Thermoplastisch verarbeitbar, d.h. kurze Laminierzeiten, recycle- bzw. reparierfähig
- Weniger Probleme mit der Lagerstabilität der Ausgangskomponenten
- Weniger starke Vergilbung auch ohne UV-Stabilisatoren
- längere und bessere Haftung an den umgebenden Komponenten
- Hoher Durchgangswiderstand, hohe Zähigkeit, nicht-korrosiv

Bislang gibt es keine dokumentierten positiven Erkenntnisse über eine Kombination von Ionomer und PC für die Photovoltaik.

## **5. Zusammenfassung**

Im Rahmen der vorliegenden Recherche sollten Werkstoffe, die sich für eine Verkapselung von Solarzellen in einem Polycarbonat-PV-Modul eignen, gesucht und einander hinsichtlich ihrer Anwendungseignung gegenübergestellt werden.

Prinzipiell gibt es zwei Möglichkeiten der Modulverkapselung: Gießharze sind bei Kunststoffverglasungen vermutlich vorteilhafter, weil sie in der Lage sind, das im Verbund herrschende unterschiedliche thermische Ausdehnungsverhalten zu kompensieren. Laminierfolien mögen eine bessere Automatisierbarkeit ermöglichen und führen zu einem sehr kompakten Modulverbund, sind aber wegen ihrer begrenzten Dehnbarkeit möglicherweise nur die zweite Wahl.

Die nachfolgende Tabelle zeigt in einer Übersicht die Vor- und Nachteile der jeweiligen Verkapselungswerkstoffe.

	<i>PUR</i>	<i>Silicon</i>	<i>EVA</i>	<i>TPU</i>	<i>PVB</i>	<i>Ionomer</i>
Feuchteinfluss	schlecht	mittel	mittel	schlecht	mittel	gut
Verarbeitung	mittel	mittel	schlecht	gut	gut	gut
Langzeitstabilität	mittel	gut	mittel	gut	mittel	gut
PC-Verträglichkeit	mittel	gut	unbekannt	gut	schlecht	unbekannt
Ausdehnungsverhalten des Verbunds	gut	gut	schlecht	schlecht	schlecht	schlecht

Tabelle 2: Übersicht über die recherchierten Verkapselungsmaterialien mit ungefähre Bewertung relevanter Eigenschaften