

Kunststoffe in der Photovoltaik

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

www.werkstoff-und-struktur.de

Kunststoffe sind trotz viel versprechender Möglichkeiten in der Photovoltaik noch recht unterrepräsentiert – von Siegelschichten und wenigen Anwendungen in der Peripherie abgesehen.

Im folgenden werden Chancen und Risiken des Kunststoffeinsatzes aufgrund Struktur und Eigenschaften dieser Materialien sowie anhand von Analogien mit bereits bestehenden Außenanwendungen beleuchtet. Weiter werden gängige Prüfmethode vorgestellt, anhand derer man die Langzeiteignung von Kunststoffen für den Außeneinsatz abschätzen kann. Abschließend folgt eine Darstellung innovativer, bereits realisierter Kunststoffanwendungen in der Photovoltaik.

1. Kunststoffe für den Außeneinsatz

Die Baubranche ist mit 11 Mio. t Kunststoffverbrauch (Deutschland 2004) zweitgrößter Kunststoffmarkt. Insbesondere Profile und Rohre, aber auch Dämm-Materialien, Folien und Abdeckungen, die meist aus günstigen Standardthermoplasten bestehen, werden in Außenbereichen eingesetzt. Weitere Kunststoffanwendungen im Freien sind Anlagenkomponenten wie z.B. Windrotoren. In zunehmendem Maße verwendet auch die Automobilindustrie Kunststoffe im Karosseriebereich. Nachfolgend werden die maßgeblichen Kunststofftypen für Außenanwendungen vorgestellt. Detaillierte Werkstoffinformationen sind z.B. unter [1] erhältlich.

1.1 PVC (Polyvinylchlorid)

PVC ist einer der kostengünstigsten Thermoplaste und steht mengenmäßig im Bauwesen trotz vielfacher Diskussionen um Umwelt- und Gesundheitsgefährdung immer noch an erster Stelle. Insbesondere in hellen Einfärbungen ist PVC dank seiner chemischen Struktur, aber auch wegen einer Vielzahl an Zusatzstoffen gut beständig gegenüber Außenwitterung und zudem brandhemmend. Besonders bewährt hat sich PVC im Freien als Profilwerkstoff für Fenster, des weiteren in Form von Dachrinnen und Fallrohren. Neben dem für Formteile verwendeten Hart-PVC (PVC-U) dient weichgemachtes PVC (PVC-P) z.B. für Dachbahnen und Teichfolien sowie Kabelummantelungen.

1.2 PE (Polyethylen) und PP (Polypropylen)

Die sogenannten Polyolefine werden im wesentlichen im Rohrleitungsbau eingesetzt. Des weiteren kommt PE als Folie im Bau zur Anwendung, z.B. als Dampfsperre oder Abdeckung. Dachbahnen auf Polyolefinbasis sind häufig speziell modifiziert. Die Witterungsbeständigkeit der Polyolefine ist mäßig; sie müssen entsprechend stabilisiert werden. Polypropylen hat gegenüber Polyethylen Defizite in der Kältezähigkeit, ist jedoch in der Wärme stabiler.

1.3 Technische Thermoplaste

Die Technischen Thermoplaste mit Kosten von über 2 €/kg werden in der Regel dort vorgesehen, wo hohe Ansprüche an Festigkeit, Steifigkeit und Zähigkeit, Chemikalienbeständigkeit etc. gestellt werden.

Das schlagfeste Styrolpolymer ASA (Acrylnitril-Styrol-Acrylat) eignet sich für tragende Bauteile, die der Witterung ausgesetzt sind, z.B. Haustüren und Satellitenschüsseln. Dachziegeln, Fassadenelementen und Regenrinnen kommt die beliebige Einfärbbarkeit des ASA zugute.

In hochwertigen Automobilkarosserien werden modifizierte Polyphenylenether (PPE) eingesetzt, die hohe Wärmeform- und Chemikalienbeständigkeit aufweisen. Auch Polyester, meist in Form von Blends, findet man im Außenbereich (Kühlergrills, Smart-Karosserie). Teilweise werden diese Werkstoffe zur Verbesserung mechanischer Eigenschaften auch mit Füllstoffen oder Fasern verstärkt (s. 1.5.2).

Zu den Technischen Thermoplasten gehören auch die transparenten Kunststoffe Polymethylmethacrylat (PMMA) und Polycarbonat (PC), die sich als Glasersatz mit niedrigem Gewicht und hohem Designpotential für Steg- und Massivplatten vielfach durchgesetzt haben.

1.4 Polyurethane (PUR)

Hauptsächliches PUR-Produkt in der Bauindustrie sind Isolierschäume. Es sind jedoch auch kompakte Materialien erhältlich- von elastomer bis zäh-hart. PUR entstehen während der Formgebung aus zwei Komponenten, die sehr variable chemische Struktur besitzen können. Spezielle witterungsbeständige Polyurethane haben sich z.B. als elastomere Bodenbeläge und als harter Integralschaum für Fenster bewährt.

1.5 Composites

1.5.1 Faserverstärkte Duroplaste

Glasfaserverstärkte Duroplaste (GFK), die ebenfalls in einer 2-Komponenten-Reaktion entstehen, bewähren sich schon seit langem im Außeneinsatz, so z.B. für Klärbeckenabdeckungen, Tanks, Rohre und Industriekamine bis hin zu Brückenkonstruktionen. Im Automobil werden Karosserien daraus gefertigt, Boote und Segelflugzeuge bestehen aus GFK. Auch Gehäuse von Flachkollektoren für Solarthermie gibt es in GFK-Ausführung. Dank einer leicht applizierbaren Außenhaut (Gelcoat, Lack) und einer gegenüber den Thermoplasten deutlich geringeren chemischen Alterung ist die Freiluftstabilität faserverstärkter Duroplaste ausgezeichnet – die Verarbeitungsverfahren sind jedoch meist aufwändiger.

1.5.2 Verstärkte Thermoplaste / Polyurethane

Die gängigsten faserverstärkten Thermoplaste basieren auf PP und werden i.a. nicht in Freiluftanwendungen eingesetzt. Spezialitäten finden sich bei Automobilkarosserien (s. 1.3) oder wie z.B. der faserverstärkte Hochleistungsthermoplast Polyphenylsulfid (PPS) in Flugzeug-Flügelkomponenten. Wood-Plastic-Composites sind sehr preisgünstige Materialien, die meist in Profilform angeboten werden. Sie bestehen aus Holzmehl und

einem thermoplastischen Kunststoff und dienen in erster Linie für Terrassen- und ähnliche Anwendungen. Faserverstärkte Polyurethane dienen als Karosseriekomponenten.

2. Alterung von Kunststoffen

Das Langzeitverhalten von Kunststoffen ist meist problematischer als bei Metallen oder auch mineralischen Werkstoffen. In der Photovoltaik ist angesichts angestrebter Lebensdauern von 25 Jahren die Alterung durch Temperatureinfluss, mechanische Belastung und Bewitterung zu berücksichtigen.

2.1 Physikalische und chemische Alterung

Kunststoffe, insbesondere Thermoplaste, unterliegen nicht nur im Einsatz, sondern auch bereits während ihrer Verarbeitung vielfältigen Einflüssen, die zu Alterungserscheinungen (Verspröden, Verfärbung etc.) führen können.

Die *physikalische Alterung* umfasst dabei im wesentlichen Effekte wie Aufnahme und Abgabe niedermolekularer Bestandteile, Nachkristallisation, Umorientierung von Molekülketten und Abbau verarbeitungsbedingter Eigenspannungen.

Daneben spricht man von der chemischen Alterung, die auf Reaktionen des Kunststoffs mit Sauerstoff oder aggressiven Chemikalien zurückzuführen ist, woraus meist eine Spaltung der Molekülketten und damit eine Herabsetzung des Eigenschaftsniveaus resultiert. Als Auslöser der chemischen Alterung wirken dabei erhöhte Einsatztemperaturen oder energiereiche Strahlung. Die häufigste Ursache für chemische Alterung ist die Oxidation, wobei man thermo-oxidative (Wärme + Sauerstoff) und photo-oxidative Prozesse (UV-Strahlung + Sauerstoff) unterscheidet. Um die Oxidation zu verhindern, setzt man Stabilisatoren zu, die die durch den Sauerstoff gebildeten aggressiven Radikale abfangen (Antioxidantien) oder die UV-Strahlung unschädlich machen (UV-Stabilisatoren). Erstere verbrauchen sich jedoch während des Kunststoffeinsatzes, so dass der Abbau des Kunststoffs nur entsprechend verzögert wird. Auch bei Recyclat kann durch bereits erfolgten Einsatz oder durch Mehrfachverarbeitung bereits ein Stabilisatorabbau eingetreten sein.

2.2 Thermomechanische Alterung

Kunststoffe weisen ein besonderes, oft kritisches thermomechanisches Langzeitverhalten auf, das im Prinzip der physikalischen Alterung zugerechnet werden kann und sich vor allem im konstruktiven Materialverbund auswirkt. Verantwortlich dafür sind insbesondere der hohe thermische Ausdehnungskoeffizient in der Größenordnung von 100-200 ppm und die Spannungsrelaxation.

Thermische Ausdehnung:

Bei Temperaturänderung ist ein Kunststoff, der sich im Verbund mit Metall oder einem mineralischen Werkstoff befindet, einer Dehnungsbehinderung unterworfen, weil die Dehnung des letzteren wegen dessen niedrigen Ausdehnungskoeffizienten und hohen E-Moduls vernachlässigbar gering ist. So entstehen Wärmespannungen, die eine verstärkte Beanspruchung des Kunststoffes bedeuten:

$$\sigma = -E \cdot \alpha \cdot \Delta T.$$

mit α = thermischer Längenausdehnungskoeffizient, T = Temperatur, σ = Spannung, E = Elastizitätsmodul

Die Realität ist deutlich komplexer als beschrieben, da der thermische Ausdehnungskoeffizient von der Temperatur und der E-Modul von Temperatur, Zeit, Belastung und Belastungsgeschichte abhängen [2]. Fasern und Füllstoffe reduzieren den Ausdehnungskoeffizienten erheblich.

Spannungsrelaxation:

Unter Relaxation versteht man das Abnehmen einer Spannung in einem Kunststoff, der einer konstanten Deformation unterworfen ist. Vereinfachend kann dieses Werkstoffverhalten mit Entschlafungen der Makromoleküle erklärt werden. Bei hoher Temperatur werden diese Prozesse beschleunigt, Bild 1, so dass Kunststoffe ein temperatur- und zeitabhängiges Verformungsverhalten aufweisen: in der Kälte und bei schneller Beanspruchung verhalten sie sich spröder.

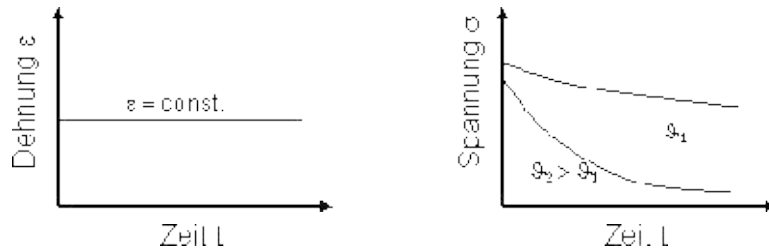


Bild 1: Relaxation von Kunststoffen: Bei konstanter Dehnung fällt die Spannung zeit- und temperatur (θ)-abhängig ab.

Ein typisches Beispiel aus dem Bauwesen veranschaulicht das Zusammenspiel von Wärmespannungen und Relaxationsvorgängen: Eine Kunststoffschicht befindet sich im festen Verbund mit einer Betonwandung. Schwankt, bedingt durch Außentemperatur und Sonneneinstrahlung, die Temperatur der Oberfläche, so erhält man einen zyklischen Verlauf der thermisch induzierten Spannungen in der Kunststoffschicht. In Bild 2 ist dieser Verlauf für eine Anfangstemperatur von 30°C , gefolgt von Abkühlung, Aufheizung, Abkühlung etc. dargestellt. Der Anstieg der Zugspannung beim Abkühlen ist auf die unterdrückte Kontraktion, die Amplitude im Druckbereich auf die unterbundene Ausdehnung beim Aufheizen zurückzuführen. Dadurch jedoch, dass bei erhöhter Temperatur die Spannungen schneller relaxieren, sind die Druckspannungen deutlich geringer als die Zugspannungen. Die Amplituden verschieben sich, so dass auch bei Wegnahme der Wechsellast eine Zugspannung im Werkstoff verbleibt, die die Lebensdauer beeinträchtigen kann.

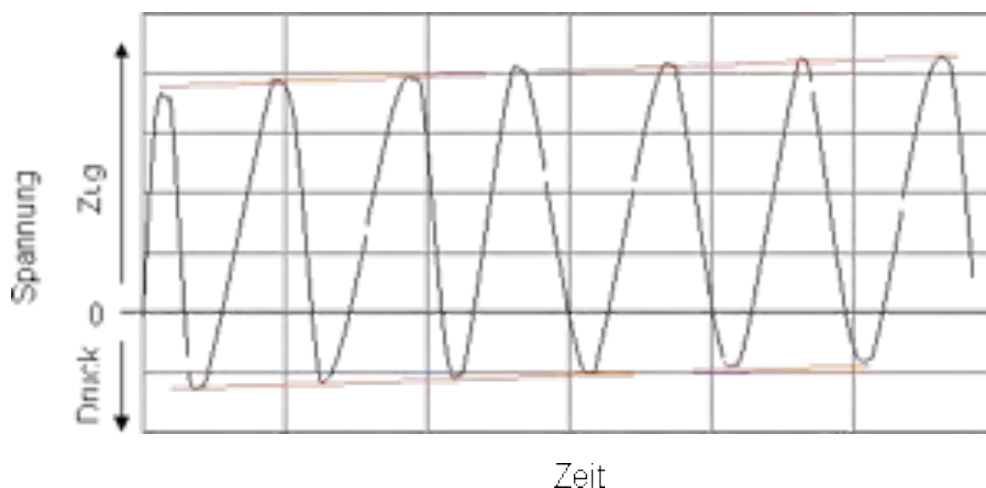


Bild 2: Spannungen im Kunststoff eines Verbundes bei thermischer Wechselbelastung

Muss man mit überwiegender Wärmeeinwirkung rechnen, sind Relaxationsvorgänge von besonderem Gewicht – dies ist dort besonders zu beachten, wo Kunststoffe Dicht-,

Schnapp- oder ähnliche Funktionen übernehmen. Bei Kälteeinfluss wird das Problem der Thermospannung dringlicher. Für komplexe thermische Belastungen empfehlen sich Abschätzungen mit Hilfe sogenannter Zeit-Temperatur-Belastungskollektive.

(Anm.: Die Relaxation stellt einen Spannungsabfall bei konstanter Dehnung dar. Bei konstanter Kraft dagegen verformen sich Kunststoffe allmählich, man spricht vom „Kriechen“).

3. Genormte Prüfmethode für das Alterungsverhalten

3.1 Temperatur-Zeit-Grenzen DIN 53446, DIN IEC 216, VDE 0304, UL 746 B

Die Ermittlung von Temperatur-Zeit-Grenzen kennzeichnet das Alterungsverhalten von Kunststoffen insoweit, als diese die zeitliche Beständigkeit bei relevanten Einsatztemperaturen angeben. Als beständig wird dabei ein Kunststoff i.a. dann bezeichnet, wenn ein für die Anwendung wichtiger Eigenschaftskennwert, z.B. die Zugfestigkeit, einen festgelegten Grenzwert, z.B. 50% seines Ausgangswertes, nicht unterschreitet. Dazu wird aus vergleichsweise kurzfristiger Ofenlagerung bei hohen Temperaturen auf lange Zeiten bei niedrigeren Temperaturen extrapoliert. Eine neben der Wärmeeinwirkung zusätzliche äußere Belastung (mechanisch, chemisch...) ist dabei nicht vorgesehen.

Für die Prüfung werden Werkstoffproben bei mindestens drei verschiedenen Temperaturen unterschiedlich lang gelagert und anschließend der betrachtete Eigenschaftswert gemessen. In der Eigenschaftskurve werden diese Werte über der Warmlagerungszeit aufgetragen, Bild 3. Für jede Temperatur ergibt sich ein Schnittpunkt mit der horizontalen Linie des Eigenschaftsgrenzwertes. Die zugehörigen x-Werte werden in der Temperatur-Zeit-Kurve über der Warmlagerungstemperatur (als $1/\vartheta$) aufgetragen.

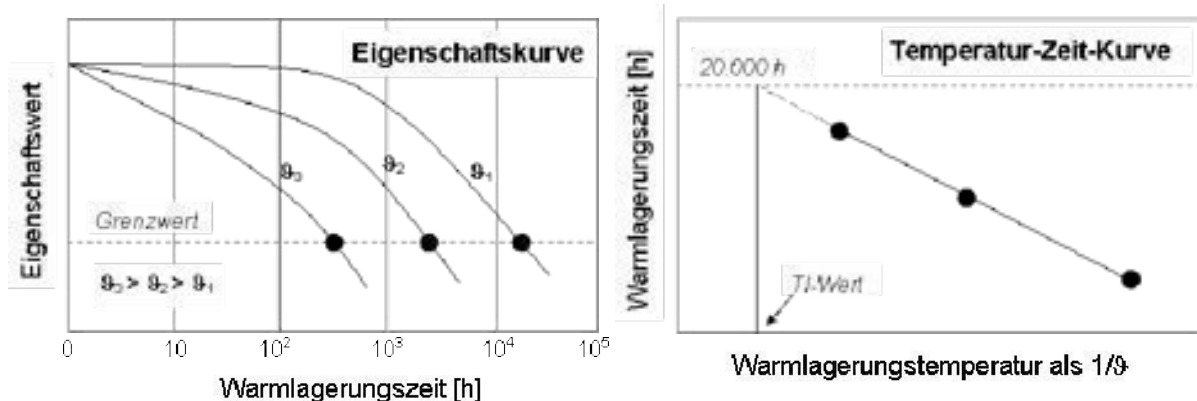


Bild 3: TI-Wert-Bestimmung: oben Auftragung ermittelter Kennwerte über der Zeit, unten Auftragung der „Grenzwert-Warmlagerungszeiten“ über $1/\vartheta$

Aus der Extrapolation der resultierenden, näherungsweise linearen Kurve lassen sich die Lebensdauern bei beliebigen Temperaturen ablesen. Der Temperaturindex (TI) ist diejenige Temperatur, bei der unter thermisch-oxidativer Belastung eine Lebensdauer von 20.000 Stunden zu erwarten ist.

3.2 Zeitstandversuch

Dieser Versuch betrachtet neben dem Wärmeeinfluss auch denjenigen statischer mechanischer Belastung. Für Rohre unter Innendruckbelastung ist er seit langer Zeit ein wesentliches Prüfinstrument (z.B. DIN 16887). Die Prüfkörper verformen sich bei vorgegebener Temperatur unter einer festen Spannung langsam, d.h. sie „kriechen“, bis zum Bruch. Die jeweilige Standzeit bis zum Bruch (ggfs. auch bis zu einem bestimmten Verformungsgrad) und die zugehörige Spannung bilden einen Messpunkt der Kurve. Entsprechende Kurven werden bei mehreren Temperaturen erstellt, und eine Extrapolation um eine Dekade ist üblich, Bild 4.

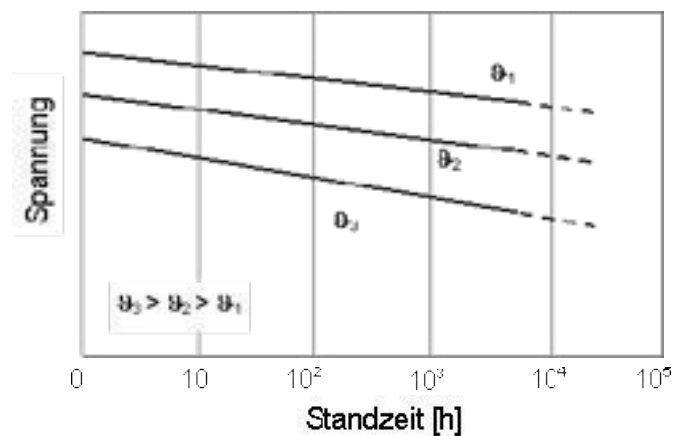


Bild 4: Zeitstandversuch: Meßkurven aus Wertepaaren Spannung-Standzeit bis zum Bruch, für verschiedene Temperaturen

3.3 Dynamische Prüfungen

Tragende Kunststoffbauteile sind häufig nicht nur ruhenden, sondern schwankenden Belastungen ausgesetzt, wodurch sie verhältnismäßig früher versagen. Zur Charakterisierung der Schwingungsbeanspruchung polymerer Werkstoffe gibt es Beispiele aus verschiedenen Branchen, häufig auch in Form sinnvoller Belastungskollektive.

3.4 Künstliche Bewitterung

In der Photovoltaik wird zur Begutachtung der Module mit kristallinen Solarzellen hinsichtlich Umwelteinflüssen (Strahlungs-, thermische und mechanische Beanspruchung) derzeit auf die Norm IEC (oder EN) 61345 zurückgegriffen. Zum Bestehen der Tests sind entsprechend Grenzwerte für Leistungsdegradation, Isolationsfestigkeit und sichtbare Veränderungen festgelegt. Studien [3] haben jedoch gezeigt, dass sich damit über die Lebensdauer eines Solarmoduls innerhalb der Garantiezeiten von bis zu 25 Jahren keine verlässlichen Aussagen machen lassen. Es fehlen die Feuchteeinwirkung, die bei Kunststoffen synergetisch mit UV-Strahlung wirkt, sowie Vorgaben zur spektralen Lichtzusammensetzung. Die überhöhte Strahlungsleistung (max. 5fach gegenüber Sonnenlicht) verhindert die Korrelation zur Freibewitterung. Näherungsweise wird eine Freibewitterung von ca. 3-4 Jahren in gemäßigttem und maximal 1,5 Jahren in tropischem Klima simuliert

Eine optimale Vorgehensweise ist daher noch in Diskussion. Für Kunststoffkomponenten erscheint die EN ISO 4892-2 sinnvoll, die eine Korrelation mit der Globalstrahlung erlaubt und auch Feuchtezyklen (18 min innerhalb 2 h) mit einbezieht. So werden beispielsweise PVC-Fensterprofile geprüft, bei denen nach Bestrahlung u.a. bestimmte Grenzwerte für die Veränderungen in Farbe, Schlagzähigkeit und Biegefestigkeit einzuhalten sind. Eine deutliche Verlängerung der Prüfzeit ist jedoch in Kauf zu nehmen. Es gibt Erfahrungen, dass bei der vorgesehenen Bestrahlungsstärke von 60 W/m^2 (300-400nm) etwa 900 h Bestrahlung einem Jahr Freibewitterung in mitteleuropäischem Klima entsprechen.

4. Innovative Kunststoffanwendungen in der Photovoltaik

Bild 5 zeigt einen möglichen Aufbau eines PV-Moduls in der kristallinen Standard-Modultechnik, anhand dessen Optimierungsmöglichkeiten mittels Kunststoffeinsatz dargestellt werden sollen.

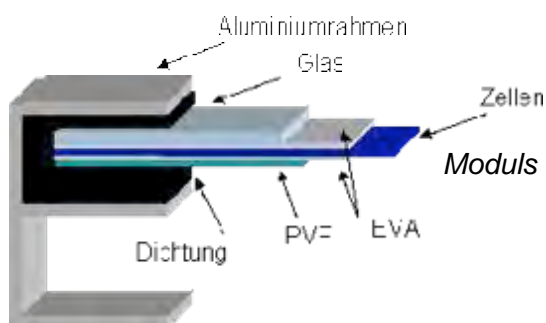


Bild 5: Typischer Aufbau eines PV- (Glas-Folie)

4.1 Ersatz des Aluminiumrahmens

Die Montage des stabilisierenden Aluminiumrahmens ist teuer, ebenso wie die Gewinnung des Metalls und seine Verarbeitung. Ein in der Automobiltechnologie bewährtes Polyurethan-Elastomer wird wegen seiner guten Fließfähigkeit bei geringen Verarbeitungsdrücken für diese Anwendung erprobt. Dabei werden zuerst auf die äußere Scheibe die Solarzellen-Strings mit einer Schmelzklebefolie auflaminiert. Danach wird das Laminat auf der Rückseite und am Rand nach dem RIM (resin injection molding)-Verfahren mit dem Polyurethan-Schaum in einem Schuss umspritzt. Dadurch ist dauerhafter Schutz der empfindlichen Solarzellen gegen Feuchtigkeit und Schmutz gewährleistet, Bild 6 links oben [4,5].

Zur Verlegung von Glas-Glas-Modulen auf geneigten Dächern wurde eine Modulkassette aus dem witterungsbeständigen und recyclingfähigen Werkstoff ASA entwickelt [6]. Das Solarsystem erfüllt somit gleichzeitig die Funktion der solaren Stromerzeugung und einer langlebigen Dacheindeckung, Bild 6 rechts oben. Eine weitere Möglichkeit der Integration von Modulen in die Dacheindeckung bietet der sogenannte Solarziegel, Bild 6 unten [7].

6.2 Ersatz der Glasabdeckung

Glas gehört zu den wenigen Materialien, die über lange Zeiträume hochtransparent sind. Nachteilig ist jedoch neben der Bruchneigung und dem hohen Gewicht die geringe geometrische Variabilität. Als Alternativen für autarke PV-Stromversorgung bei hoher Gestaltungsfreiheit bieten sich extrudierte, tiefgezogene Kunststoffplatten aus PC oder PMMA an: Als vandalismussichere Freiflächen-Überdachungen, z.B. an Bushaltestellen, als bruchsicere Bootsdächer auf See oder im Fassadenbereich. Dabei wird das Solarmodul als Sandwich ausgeführt, der als obere Abdeckung über eine transparente Massivplatte verfügt. Die untere Schicht kann dabei transparent, opak oder eingefärbt als Massiv- oder als wärmedämmende Stegplatte ausgeführt sein. Zur Vermeidung ausdehnungsbedingter Scher- und Druckkräfte auf die Solarzellen kommen als Einbettmedium gelartige Gießharze zum Einsatz [8,9].

Neben starren Modulen mit polykristallinen Zellen beginnt sich die Dünnschichttechnologie zu etablieren. In Verbindung mit witterungsbeständigen, hochtransparenten Fluorpolymerfolien als äußere Modulhülle sind so flexible Module möglich. Die Folien erzeugen aufgrund des niedrigen Brechungsindex weniger Reflexion und als herkömmliche Module, und die geringe Oberflächenenergie verlangsamt die Verschmutzung [10].



Bild 6: PV-Dachinstallationen mit Kunststoffen

*Links oben: Module mit PUR-Rahmen (linke Hälfte) sind neben erhöhter Wirtschaftlichkeit auch optisch ansprechender als Aluminiumrahmen
(Quelle: Bayer MaterialScience)*

*Rechts oben: Solarstrom-System PV 700 mit Glasmodulen auf ASA-Modulkassetten, die ergänzend zur herkömmlichen Dacheindeckung verlegt werden
(Quelle: Lafarge Dachsysteme)*

*Links unten: In Dachziegel aus Mischkunststoffen befinden sich rahmenlose Solarmodule
(Quelle: Innoteg)*

*Rechts unten: Verschweißen einer EVALON®-Solar-Dachbahn mit integrierten Dünnschichtmodulen
(Quelle:Alwitra)*

Diese Fluorkunststoffe finden beispielsweise Einsatz als oberste Schicht von polymerverkapselten Dünnschichtmodulen einer sogenannten Solar-Dachbahn. Die Module sitzen auf Dichtschichten aus einer bewährten EVA-PVC-Legierung, was Stromversorgung und Dachabdichtung in einem bietet, Bild 6 rechts unten [11].

6.3 Verkapselungsmaterialien und weitere Folien

Die direkte obere und untere Verkapselung von Solarzellen besteht traditionell aus EVA (Ethylvinylacetat). Nachteilig sind begrenzte Lagerstabilität des Ausgangsmaterials, lange Vernetzungszeiten und die Neigung zu Delaminationen von den Wafern. Alternativ lassen sich hier recycling- und reparaturfähige Folien aus Thermoplastischem Polyurethan (TPU) verwenden [5,12], die zusätzlich bessere Siliciumhaftung aufweisen. Es kommen hier ebenfalls sogenannte Ionomere zum Einsatz [10,13]. Auch für Backsheets und als bruchsicere Glasbeschichtung sind innovative Folien auf dem Vormarsch [10].

7. Literatur

- [1] Domininghaus, H.: Die Kunststoffe und ihre Eigenschaften, Springer Verlag Berlin 1997
- [2] Schmachtenberg, E., Schröder, O., Yazici, M.: Mechanische Belastbarkeit unter Temperatureinfluss, in: Ehrenstein, G.W., Pongratz, S.: Thermische Einsatzgrenzen von Kunststoffen in Verarbeitung und Anwendung, Springer VDI Verlag, Düsseldorf, 2000
- [3] Abschlussbericht zum TÜV-Projekt 26110399 „Verifikation des Prüfstandards IEC 61345“, 2001
- [4] Stollwerk, G. et.al.: Kunststoff-Verkapselungen für Solarmodule, Kunststoffe 8/2004, S. 98-100
- [5] www.bayermaterialsscience.de
- [6] www.basf.de , www.lafarge-dachsysteme.de
- [7] www.innoteg.at
- [8] Wielpütz, A.: Kunststoff, Architektur und Photovoltaik, Kunststoffe 1/2004, S. 86-88
- [9] www.sunovation.de
- [10] www.photovoltaics.dupont.com
- [11] www.alwitra.de
- [12] www.etimex-pp.com
- [13] www.jura-plast.de