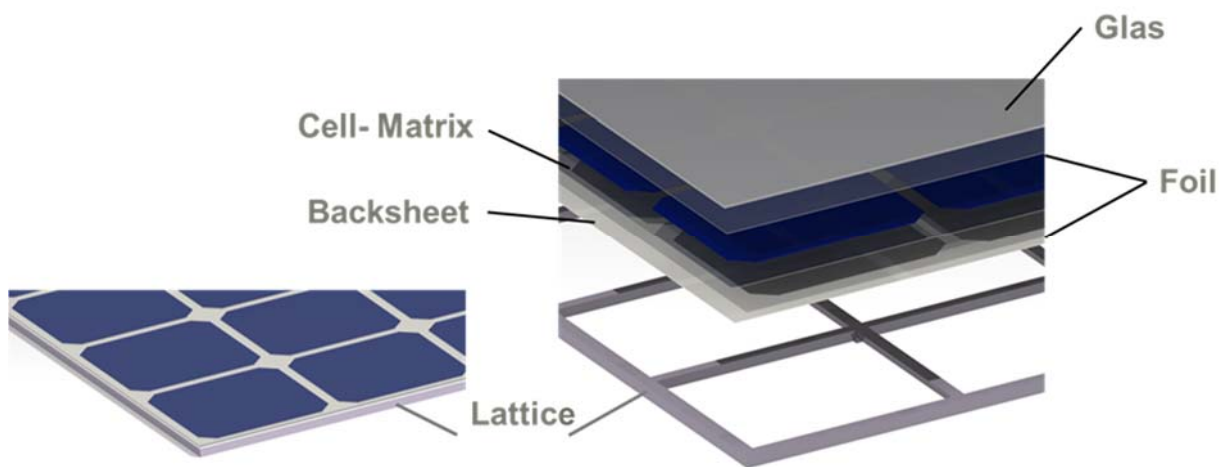




Schlussbericht

U-LIGHT

Ultraleichte PV-Module





Zürich University of Applied Sciences



**School of
Engineering**

IEFE Institute of Energy Systems
and Fluid Engineering

Datum: 10.01.2019

Ort: Winterthur

Auftraggeberin:

Bundesamt für Energie BFE
Forschungsprogramm Energie
CH-3003 Bern
www.bfe.admin.ch
energieforschung@bfe.admin.ch

Auftragnehmer/in:

ZHAW Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften
School of Engineering
Institut für Energieeffizienz und Fluidengineering IEFE
CH-8400 Winterthur
<https://www.zhaw.ch/de/engineering/>

Autor/in:

Dr. Markus Klenk, ZHAW / SoE / IEFE, markus.klenk@zhaw.ch
Dr. Hartmut Nussbaumer, ZHAW / SoE / IEFE, hartmut.nussbaumer@zhaw.ch

BFE-Bereichsleitung:

Dr. Stefan Oberholzer, stefan.oberholzer@bfe.admin.ch

BFE-Programmleitung:

Dr. Stefan Nowak, stefan.nowak@netenergy.ch

BFE-Vertragsnummer:

SI/501280-01

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen sind ausschliesslich die Autoren dieses Berichts verantwortlich.



Zusammenfassung

Das im Rahmen des solar-era.net Programms durchgeführte U-Light Projekt hatte zum Ziel, das Gewicht von PV-Systemen deutlich zu reduzieren. Es wurden dabei Verfahren entwickelt, um Module mit Glas/Backsheet- und Glas/Glas-Aufbau leichter und trotzdem stabil zu gestalten. Dies wurde durch die Verwendung dünneren Glases, als es bei den aktuell gängigen Modulen der Fall ist und der Anbringung einer mechanisch unterstützenden Struktur, erreicht. Die unterstützende Struktur kann sowohl am Modul selbst angebracht oder als Teil der Unterkonstruktion ausgelegt werden. Die Module entsprachen, auch bei Verwendung sehr dünner Gläser der Stärke 0.8 mm, den Anforderungen gemäss der Norm für Qualifikationstests von kristallinen Siliziummodulen. Darüber hinaus wurden in dem Projekt ultraleichte Module mit spezifischen Gewichten $\leq 2.5 \text{ kg/m}^2$ mit ETFE-Folien und anderen Alternativen zu Glas aufgebaut.

Insbesondere die Glas/Backsheet- und Glas/Glas-Module, in Kombination mit ihren speziell designten Unterkonstruktionen, könnten in technischer Hinsicht industriell vermarktet werden. Der Markt für derartige Produkte ist jedoch beschränkt. Die Kosten für dünnes Solarglas liegen derzeit zudem weit oberhalb derer für Gläser mit Standarddicken. Die im Projektverlauf entwickelten Konzepte können in entsprechenden Anwendungen in Abhängigkeit von der Marktlage, wie auch von der Verfügbarkeit kostengünstigen, dünnen Solarglases, zum Einsatz kommen.

Résumé

Dans le projet U-Light, des modules solaires légers ont été développés. Deux approches différentes ont été suivies pour réduire le poids des modules par zone. Une approche est liée à la réduction de poids d'un verre/feuille de fond standard et de modules verre/verre en réduisant l'épaisseur du verre en combinaison avec une structure de support mécanique. L'autre approche consistait à utiliser une nouvelle combinaison de matériaux. La structure réalisée était constituée en ETFE et en feuilles d'encapsulation donnant lieu à un module flexible mécanique avec des poids spécifiques $\leq 2,5 \text{ kg/m}^2$.

Les concepts développés au cours du projet peuvent être appliqués dans les applications correspondantes s'il existe une demande du marché et si un verre solaire mince et économique est disponible.

Summary

In the U-Light-project lightweight solar modules have been developed. Two different approaches have been followed to reduce the weight per area of the modules. One approach is related to the weight reduction of standard glass/backsheet- and glass/glass-modules by reducing the thickness of the glass in combination with a mechanical supporting structure. The other approach was to use new material combinations. For the realized structures ETFE-foils instead of glass were used, resulting in modules with specific weights of $\leq 2.5 \text{ kg/m}^2$. The concepts, which were developed in the course of the project, can be applied in corresponding applications if there is demand from the market and if cost-effective, thin solar glass is available.





Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung.....	3
Résumé.....	3
Summary	3
Inhaltsverzeichnis	5
Abkürzungsverzeichnis	6
1 Einleitung	7
2 Ausgangslage	7
2.1 Hintergrund / Stand der Technik	7
2.2 Ziele der Arbeiten	7
3 Arbeitsplanung	8
3.1 Glas/Glas und Glas/Folie.....	8
3.2 Module mit Kunststoffeinbettung	9
4 Resultate.....	11
4.1 Module ohne Glas auf der Basis alternativer Materialien.....	11
4.2 Glas/Glas- und Glas/Backsheet-Module	18
4.3 Bifaziale, hocheffiziente « Zebra »-Solarzelle integriert im entwickelten Laminataufbau	34
5 Diskussion der Ergebnisse	37
6 Schlussfolgerungen	39
7 Ausblick.....	39
8 Publikationen	41
9 Referenzen	42
10 Anhänge	44
10.1 Anhang 1: Photon Artikel.....	44



Abkürzungsverzeichnis

ARC	Anti reflective coating; Antireflexbeschichtung
BIPV	Building integrated PV; gebäudeintegrierte PV
GFK	Glasfaserverstärkter Kunststoff
CTM	Cell to module; Zelle zu Modul
CFK	Kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff
DH	Damp heat; Feuchte-Hitze
EL	Elektrolumineszenz
EP-Harz	Epoxidharz
ETFE	Ethylen-Tetrafluorethylen
EVA	Ethylen-Vinylacetat
FEP	(Tetra)Fluorethylen-Propylen
IBC	Interdigitated back contact; ineinandergreifender Rückkontakt
I_{mpp}	Current (maximum power point); Strom (am Punkt maximaler Leistung)
ISC	International Solar Energy Research Center
I_{sc}	Current (short circuit); Kurzschlussstrom
IV	Strom/Spannung
PC	Polykarbonat
PCCL	Polymer Competence Center Leoben GmbH
PET	Polyethylenterephthalat
P_{mpp}	Power (maximum power point); Leistung (am Punkt maximaler Leistung)
PMMA	Polymethylmethacrylat; Plexiglas
PTFE	Polytetrafluorethylen; Teflon
PV	Photovoltaik
TC	Temperature cycle; Temperaturwechsel (zyklisch)
TPU	Thermoplastisches Polyurethan
U_{mpp}	Voltage (maximum power point); Spannung (am Punkt maximaler Leistung)
U_{oc}	Voltage (open circuit); offene Klemmenspannung
UV	Ultraviolett
UV/VIS	Ultraviolet/visible; ultraviolett/sichtbar
W_p	Watt Peak; Leistung unter Standard-Testbedingungen
ZHAW	Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften



1 Einleitung

Leichtbaumodule könnten in verschiedenen Anwendungen zum Einsatz kommen. So haben Dächer von Industriebauten oftmals keine statischen Reserven, um die Last einer Photovoltaikanlage zu tragen. Auch für die Verwendung auf Gewächshäusern oder Carports könnten leichte Module interessant sein. Um diesen Markt für die Photovoltaikindustrie zu erschliessen, sind Module in Kombination mit angepassten Unterkonstruktionen zu entwickeln, welche, im Vergleich zum Stand der Technik, niedrigere Systemgewichte erreichen.

2 Ausgangslage

2.1 Hintergrund / Stand der Technik

Eine Gewichtsreduktion bei Modul oder Unterkonstruktion durch Materialeinsparungen wird in den meisten Fällen zu einer verringerten Stabilität führen. Damit eine ausreichende mechanische Stabilität erreicht wird, müssen neue Materialien und Designs der Module in Kombination mit angepassten Unterkonstruktionen zum Einsatz kommen. Leichtbaumodule wurden bereits von mehreren Forschungsgruppen entwickelt und erfolgreich eingesetzt. Diese Module sind jedoch meist für Spezialanwendungen ausgelegt, wobei sehr leichte aber auch teure Materialien zum Einsatz kommen.

2.2 Ziele der Arbeiten

Neben der Gewichtsreduktion unter Aufrechterhaltung der Stabilität sollten mit den entwickelten Lösungen niedrige Energiegestehungskosten erreicht werden.

Im Hinblick auf die Modulentwicklung wurden im Wesentlichen zwei Ziele verfolgt. Zum einen sollten mit dünnen Gläsern ($< 2\text{ mm}$) leichte Glas/Glas- und Glas/Backsheet-Module, bestehend aus 60 Solarzellen ($156\text{ mm} \times 156\text{ mm}$) und mit einem spezifischen Gewicht $< 12\text{ kg/m}^2$, entwickelt werden. Diese sollten zudem die relevanten Anforderungen der entsprechenden Norm (IEC 61215) erfüllen. Bei Laminaten mit dünnem Glas sind dabei insbesondere die mechanischen Belastungstests und der Hagelbeschuss von Interesse. Zum anderen sollte mit PV-Modulen aus Kunststoff ein nochmals deutlich geringeres spezifisches Gewicht von $\leq 2.5\text{ kg/m}^2$ erreicht werden. Für beide Ansätze wurden angepasste Unterkonstruktionen, respektive Konzepte zur mechanischen Stabilisierung, entwickelt.

Neben dem Einsatz neuer Materialien, insbesondere bei den Kunststoffmodulen, wurden im Projekt auch Einbettmaterialien und Backsheets von Isovoltaic Solinex weiterentwickelt und angewandt. Mit der Kombination aus einem hochtransparenten Einbettmaterial (Transmittanz $> 89\%$; UV Cut-off $< 320\text{ nm}$, Dicke $100\text{--}200\text{ }\mu\text{m}$, Laminationszeit $< 10\text{ Min.}$) und einem hochreflektierenden Backsheet (Reflektivität $> 90\%$; $400\text{--}800\text{ nm}$) sollen, in Verbindung mit den im Projekt zu optimierenden Solarzellen, hohe Modulwirkungsgrade und niedrige Moduleinbettungsverluste erreicht werden. Über eine Dickenreduktion des Einbettmaterials können zudem die Kosten gesenkt werden.

Zur Verbesserung der Energiegestehungskosten wurden hocheffiziente, bifaziale Solarzellen (Ziel: 21.7% Wirkungsgrad) mit einem neuen Zellenkonzept entwickelt, das zudem den Verzicht von Bypass-Dioden ermöglicht. Dabei sollte die Sperrkennliniencharakteristik so angepasst werden, dass ein schädigungsfreier Modulbetrieb ohne Bypass-Dioden ermöglicht wird. Neben einer Steigerung des Ertrags durch den hohen Wirkungsgrad und die Bifazialität sollte somit zusätzlich auf Modulkomponenten verzichtet werden können. Insgesamt sollte mit einer bifazialen Ausführung ein



leistungsbezogenes Kosteneinsparungspotenzial von 30 %, gegenüber dem Stand der Technik bei Projektbeginn, realisiert werden.

Die entwickelten Komponenten sollten in Modulen verbaut und getestet werden. Das U-Light Projekt wurde im Rahmen des internationalen solar-era.net Programms durchgeführt. Die Partner ergänzten sich bei der Probenherstellung und Komponentenprüfung, wie auch bei der Entwicklung durch ihre Spezialisierung in den Bereichen Material, Zelle und Modul. So konnte die ZHAW bei der Auslegung und Materialauswahl der glasfreien Module auf das Wissen und die Erfahrung der Kunststoffspezialisten PCCL und Isovoltaic Solinex zurückgreifen und konnte von dort Material beziehen. Andererseits konnten die Komponenten und Materialien, wie auch die leistungsfähigen Solarzellen des ISC Konstanz, in den Solarmodulen getestet werden. Das ISC Konstanz und die ZHAW ergänzten sich wiederum bei ihren Möglichkeiten zur Modulherstellung und Charakterisierung.

3 Arbeitsplanung

Die technisch ausgerichteten Arbeitspakete untergliederten sich, entsprechend der oben beschriebenen Ziele und Aufgaben, in die Bereiche Modul-, Material- und Zellenentwicklung. Ein vorgesehenes Arbeitspaket Glasentwicklung konnte aufgrund des Ausscheidens des Partners Vetro Solar in einer frühen Phase des Projekts nicht durchgeführt werden. Geeignetes Glas wurde daher von kommerziellen Anbietern bezogen.

Der Schwerpunkt der ZHAW lag im Arbeitspaket WP4 (Modulentwicklung). Im Folgenden wird der Lösungsweg in diesem Arbeitspaket beschrieben.

Das Arbeitspaket WP4 teilt sich mehrere Unteraufgaben auf:

1. Designphase
2. Herstellungsphase
3. Modultests
4. Outdoor tests

Die jeweiligen Unteraufgaben unterschieden sich jeweils für die Module mit Glas als Frontmaterial (Glas/Glas und Glas/Backsheet) und die glasfreien Modulkonzepte.

3.1 Glas/Glas und Glas/Folie

Basierend auf den hocheffizienten Solarzellen, verbesserten Einbettungsmaterialien mit höherer Transmittanz bzw. erhöhter Reflektivität, sowie Gläsern mit einer Stärke von kleiner 2 mm und entsprechenden mechanischen Eigenschaften, sollten Glas/Glas- und Glas/Backsheet-Module mit geringem Gewicht und hoher Effizienz aufgebaut, elektrisch charakterisiert und in Alterungstests auf ihre Langzeitstabilität hin untersucht werden.

In der ersten Phase konzentrierten sich die Arbeiten auf die Herstellung von kleineren Modulen im Format 340 mm x 340 mm. Zunächst wurden Glas/Glas- und Glas/Backsheet-Module mit Materialien nach dem derzeitigen Stand der Technik, mit Gläsern der Stärke von 2 mm und verschiedenen Einbettungsmaterialien, hergestellt. Die Module wurden optisch und elektrisch vermessen und die Prozessparameter für den Laminationsprozess wurden optimiert. Nachdem ein optimales Prozessfenster mit dem neuen Laminator gefunden wurde, wurden Glas/Glas- und Glas/Backsheet-Lamine mit 60 Solarzellen gefertigt und charakterisiert. Aus neuen, bereits von Partnern



vorgetesteten Einbettfolien und Backsheets, wurden zunächst Kleinmodule gefertigt und diese anschliessend elektrisch und mechanisch charakterisiert. Kleinmodule wurden zudem in der Klimakammer der ZHAW getestet, um deren thermomechanische Langzeitstabilität zu prüfen. Dabei wurden teilweise auch Testreihen mit UV-Bestrahlung in der Klimakammer durchgeführt.

Die mechanische Stabilität der Module wurde insbesondere mittels statischer Belastungstests intensiv untersucht. Dabei wurden verschiedene Konfigurationen von rückseitigen Stützstrukturen realisiert, um ein möglichst geringes spezifisches Gewicht, bei ausreichender Steifigkeit, zu erhalten. Die Durchbiegung unter Last wurde dabei jeweils auch mit dem entsprechenden Verhalten kommerzieller Standardmodule verglichen.

Die Module wurden nach Labortests auf dem Dach der ZHAW in Winterthur und am ISC über einen Zeitraum von 12 Monaten getestet. Dabei wurden sie wiederholt begutachtet und elektrisch charakterisiert um Defekte zu erkennen und das Degradationsverhalten zu messen.

Schliesslich wurden die entwickelten Modulstrukturen mit den im Projektverlauf entwickelten hocheffizienten Solarzellen bestückt, welche einen Verzicht der Bypass-Dioden im Modul erlauben. Entsprechend der Vorgaben wurden leichtgewichtige Glas/Glas- und Glas/Backsheet-Module mit 60 Solarzellen hergestellt, welche die relevanten Tests gemäss IEC 61215 bestehen und über angepasste Montagesysteme kostengünstig befestigt werden können.

3.2 Module mit Kunststoffeinfbettung

Neben Glas/Glas- bzw. Glas/Backsheet-Modulen wurden auch Module aus Kunststoffen aufgebaut und auf ihre elektrischen und mechanischen Eigenschaften hin untersucht.

Die ZHAW verfolgte in Zusammenarbeit mit den Partnern vor allem zwei unterschiedliche Ansätze.

Ansatz 1: Verwendung von glasfaserverstärktem Kunststoff (GFK).

Bei diesem Verfahren werden die Strings in mehrere Lagen von Glasfasermatten eingebettet. Anschliessend werden diese mit einer Folie oben und unten luftdicht verschlossen. Auf der einen Seite wird Epoxidharz angeboten. Auf der anderen Seite wird ein Unterdruck angelegt, sodass das Harz in das Glasfasergewebe einströmt und sich bei geeigneter Prozessführung gleichmässig über den Solarzellen verteilt. Nach Aushärtung erhält man ein sehr leichtes, mechanisch stabiles PV-Modul. Zum Schutz des Epoxidharzes gegen eine Verringerung der Transparenz durch UV-Strahlung muss gegebenenfalls eine weitere Folie als UV-Blocker eingesetzt werden.

Eine andere Möglichkeit zur Verwendung von glasfaserverstärktem Kunststoff basiert auf GFK-Platten. Die Zellen sind dabei in EVA oder vergleichbare Materialien eingebettet, das Glas wird durch alternative Materialien wie ETFE (Ethylen-Tetrafluorethylen) oder wieder glasfaserverstärkten Kunststoff ersetzt. Dabei sind zahlreiche Materialkombinationen und Strukturen möglich.

Ansatz 2: Verwendung thermoplastischer Kunststoffe, zum Beispiel von Polycarbonat, Acrylglas oder Ionomeren.

Hierzu steht eine Vielzahl von Materialien zur Verfügung, deren Verarbeitung jeweils gemäss den spezifischen Eigenschaften erfolgen muss. Ein wesentlicher Teil der Vorarbeiten besteht in der umfassenden Suche nach potenziell geeigneten Produkten, welche im Hinblick auf Verarbeitbarkeit und Eigenschaften günstig sind. Dabei sind insbesondere die Transparenz und die UV-Stabilität wichtige Faktoren. Durch die thermoplastischen Kunststoffe sollte prinzipiell auch eine Formgebung der Lamine möglich sein, ein potenzieller Vorteil gegenüber dem starren Glas/Glas- oder



Glas/Backsheet-Aufbau. Entsprechend könnten die Lamineigenschaften durch entsprechende 3D-Profilgebung verbessert oder modifiziert werden (siehe Abbildung 1).

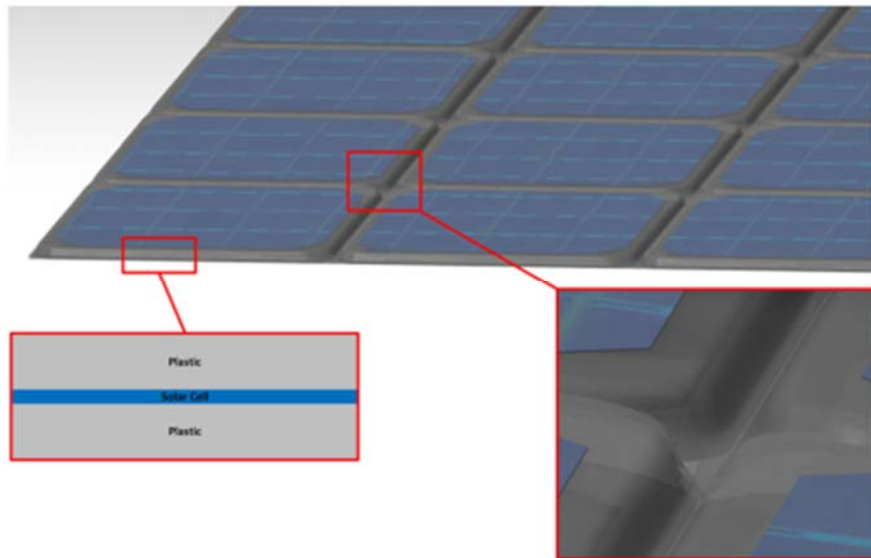


Abbildung 1: Profil eines Moduls aus Kunststoffen mit 3D-Profil. Durch die thermoplastischen Kunststoffe sollte prinzipiell auch eine Formgebung der Lamine möglich sein, ein potentieller Vorteil gegenüber dem starren Glas/Glas- oder Glas/Backsheet-Aufbau.

Alle kunststoffbasierten Ansätze wurden im Hinblick auf die Materialien und Prozesse intensiv mit dem Polymer Competence Center Leoben GmbH (PCCL) diskutiert. Zunächst wurden erste Prototypen von Modulen an der ZHAW hergestellt. Die ZHAW verfügt über die entsprechenden Einrichtungen, um glasfaserverstärkte und thermoplastische Kunststoffe zu verarbeiten und entsprechende PV Module zu fertigen. Die Prototypen konnten mit den an der ZHAW befindlichen UV/VIS-Spektrometern und I/V-Messeinrichtungen optisch und elektrisch charakterisiert werden.

Die mechanische Belastbarkeit wurde mittels statischer Belastungstests untersucht. Durch Elektrolumineszenzmessungen wurde untersucht, ob die Solarzellen bei den jeweiligen Herstellungsverfahren mechanisch zu stark belastet werden und dies zu Mikrorissen in den Solarzellen führte. Bei den neuen Herstellungsverfahren von Modulen wurde untersucht, ob es möglich ist, das Moduldesign so anzupassen, dass eine einfachere und kostengünstigere Montage in einem PV-System für Leichtbaumodule möglich ist.

Kunststoffmodule wurden nach Labortests auf dem Dach der ZHAW in Winterthur im PV-Outdoor-Labor über einen Zeitraum von 12 Monaten getestet und regelmässig elektrisch vermessen, um Defekte oder eine Degradation festzustellen.

Am Ende des entsprechenden Arbeitspaketes wurden Kunststoffmodule mit einer Fläche von 1m^2 und einem spezifischen Gewicht von weniger als 2.5 kg/m^2 aufgebaut.



4 Resultate

4.1 Module ohne Glas auf der Basis alternativer Materialien

Im Gegensatz zu den vergleichsweise konventionellen Laminaten mit dünnem Glas kann bei den auf alternativen Materialien basierenden Ansätzen kaum auf etablierte Prozesse und Materialien zurückgegriffen werden. Selbst wenn ein Material bereits von anderen Gruppen für PV-Applikationen eingesetzt wurde [AE_2012] [EB_2008] [Patent_1996], haben Kunststoffe eine sehr grosse Bandbreite an Eigenschaften [KFI_2012], abhängig von der Zusammensetzung, den beigemischten Additiven oder vor allem auch von der Prozessführung. Manche der auf Kunststoffen basierenden Ansätze, welche auf den ersten Blick zur Herstellung von PV-Modulen gut geeignet wären, scheiden aufgrund der zu erwartenden, geringen Langzeitstabilität aus. Beim Ersetzen der frontseitigen Abdeckung aus Glas entfällt zudem jene Komponente, welche den gesamten Schichtaufbau mechanisch stabilisiert. Der geschichtete Aufbau aus mehreren Materialien, inklusive Solarzellen und Verbindern, ist zudem hinsichtlich der unterschiedlichen thermischen Ausdehnungskoeffizienten und hinsichtlich der Haftung zwischen den Komponenten äusserst herausfordernd.

Schutzschicht 1	Einbettmaterial 1	Einbettmaterial 2	Schutzschicht 2
	Giessharz (Bsp. Epoxidharz + Glasfaser), Silikon,...	Giessharz (Bsp. Epoxidharz + Glasfaser), Silikon,...	PC, GFK, PMMA (mit und ohne Struktur)
ETFE, PET, FEP,...	Ionomer	Ionomer	ETFE (bifazial)
PC, PMMA	TPU, Giessharz, Kautschuk, Ionomer..	TPU, Giessharz, Kautschuk, Ionomer..	PC, PMMA
	Ionomer	Ionomer	
	PMMA	PMMA	

Tabelle 1: Potentielle Materialien für Schutzschichten und Einbettmaterialien. Im Hinblick auf die abgekürzten Materialbezeichnungen wird auf das Abkürzungsverzeichnis verwiesen.

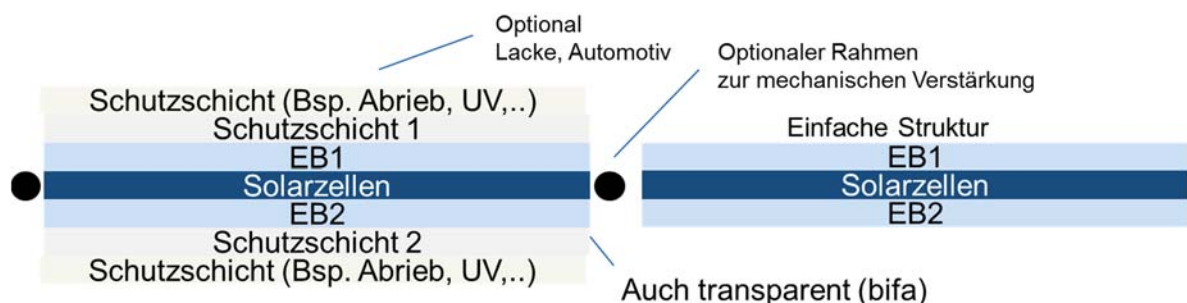


Abbildung 2: Struktur der des Modulaufbaus mit Kunststoffen. Zusätzlich können UV- und abriebschützende Beschichtungen eingesetzt werden. Als weitere Option ist der eingebettete Rahmen, beispielsweise aus GFK angedeutet, der die mechanischen Eigenschaften verbessert. Als Einbettmaterialien (EB) kommen die Tabelle 1 aufgeführten Stoffe in Frage.

In Zusammenarbeit mit den Projektpartnern PCCL und Isovoltaic Solinex wurden zahlreiche Ansätze und Materialien evaluiert, wobei mehrere Optionen als ungeeignet verworfen wurden. Die Verwendung einiger weiterer Materialien oder Materialkombinationen zur Modulherstellung, wurde bereits von



Anderen demonstriert [EPFL_2008] [Evonik_2013] [DAS_2017] [Mage_2011]. Eine Wiederholung bereits geleisteter Entwicklungsarbeit erschien nicht zielführend und mit den gegebenen Ressourcen teilweise auch nicht möglich. Ein Beispiel hierfür ist das zertifizierte Modul des österreichischen Kunststoffspezialisten DAS [DAS_2017], bei welchem das Frontglas durch eine transparente GFK-Lage unter einer ETFE-Folie ersetzt wird. Tabelle 1 zeigt einen Auszug potenziell geeigneter Materialien für die Schutzschichten und Einbettmaterialien (EB), welche in unterschiedlichen Strukturen verwendet werden können (siehe Abbildung 2).

Andere Ansätze wurden experimentell verifiziert und erwiesen sich als nicht praktikabel oder mit zu hohem Entwicklungsbedarf verbunden, als dass sie in diesem Projekt umsetzbar wären. So erwies sich das Vergiessen einer Zellenmatrix mit den getesteten Materialien als problematisch. Das Vergiessen von PMMA führte bei grösseren Volumina zu Spannungen und Verformungen sowie zu Bläschenbildung. Auch das Einziehen von Harz oder anderer Vergussmassen über einen Vakuumprozess erwies sich als zu aufwendig für grosse Flächen, zu herausfordernd bezüglich der Prozessierung (Verschieben der Zellmatrix, Aushärtung, Füllung) und zu wenig aussichtsreich im Hinblick auf die Materialeigenschaften. Aus derartigen Überlegungen heraus wurden mehrere Ansätze eingestellt oder zunächst zurückgestellt.

Unter Berücksichtigung der obigen Faktoren wurden vor allem zwei aussichtsreiche Konzepte näher evaluiert. Prototypen wurden in Form von Kleinmodulen, überwiegend als vierzellige Kleinmodule, wurden aufgebaut und charakterisiert.

Die eine Grundstruktur basiert auf einer dünnen GFK-Grundplatte, über welcher die Zellenmatrix in zwei konventionellen EVA-Lagen eingebettet ist und die frontseitig durch eine dünne ETFE-Folie abgedeckt wird. Die Gesamtstruktur wird wie ein konventionelles Modul laminiert, wobei auf der Frontseite ein Gitter aufgelegt werden muss, um ein ungleichmässiges Schrumpfen der ETFE-Folie während der Lamination zu unterdrücken. In einer anderen Ausführung wurde statt des ETFE ein transparentes Backsheet des Projektpartners Isovoltaic Solinex benutzt. Durch die geringere Transparenz ergibt sich hieraus jedoch, von einer etwas höheren Steifigkeit des Laminats abgesehen, kein Vorteil.

Der zweite Ansatz basierte auf einem beidseitig transparenten, symmetrischen Aufbau, auch um bifaziale Zellen einsetzen zu können. Dabei wird auf eine Supportstruktur, im zuletzt beschriebenen Fall die GFK-Platte, verzichtet. Dem Schrumpf der Materialien wird durch den symmetrischen Aufbau begegnet. Die Abdeckung der Front- und Rückseite erfolgte durch ein transparentes Backsheet des Herstellers Isovoltaic Solinex (vgl. Abbildung 3). Auch dieser Ansatz wurde in einem Laminationsprozess hergestellt.

Diese sehr leichtgewichtigen Lamine aus beiden Ansätzen sind für Spezialanwendungen vergleichbar zum Faltdachkonzept der Firma DHP [DHP_2018] gedacht, bei welchen Hagelschäden nicht zu befürchten sind. Für einen Einsatz mussten Lösungen entwickelt werden welche eine Aufständigung der sehr dünnen Lamine mit geringer Biegefestigkeit erlauben [Photon_2016] [EUPVSEC_2016].

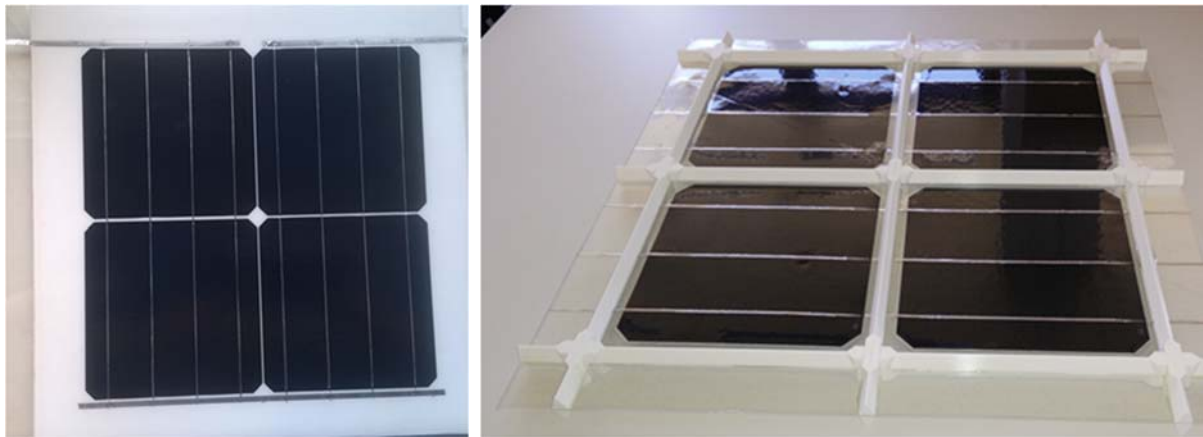


Abbildung 3: Vierzelliges Modul mit dünner GFK-Grundplatte (links). Die Zellen-Matrix ist in EVA eingebettet, frontseitig wurde eine dünne ETFE-Folie aufgebracht und rückseitig weisses EVA benutzt. Rechts ist ein vierzelliges Laminat mit symmetrischem Aufbau gezeigt. Die Abdeckung der Front- und Rückseite erfolgt durch ein transparentes Backsheet des Herstellers Isovoltaic Solinex. Das Laminat ist zwischen den Trägern einer beidseitigen Gitterstruktur platziert. Der symmetrische Aufbau gewährleistet, dass die Zellenmatrix auf der neutralen Faser liegt und die Zellen bei Biegung somit nicht auf Zug oder Druck belastet werden.

Im Rahmen des Projektes wurde hierfür ein neues Konzept verfolgt, um die mechanische Steifigkeit, auch bei Modulen, welche lediglich aus flexiblen Folien bestehen, zu erreichen. Selbst bei heutigen Standardmodulen ist bei Belastung der Laminatfläche, mit Gewichten wie in der Norm gefordert, ein deutliches Durchbiegen oder « Schüsseln » erkennbar. Bei Standardmodulen wird die Steifigkeit des Moduls im Wesentlichen durch das Glas und einen umlaufenden Rahmen gewährleistet. Durch den Wegfall des steifen Glases muss die Laminatfläche unterstützt werden. Im einfachsten Fall kann dies durch das flache Auflegen auf einen ebenen Untergrund (Platte, Dachfläche) erfolgen. Um ein möglichst geringes Gewicht zu erreichen, wurde bei dem von uns untersuchten Konzept auf eine durchgehende Platte verzichtet. Stattdessen erfolgt eine Aufteilung in kleinere Einheiten zwischen Trägerelementen. In der Folge entsteht daraus eine gitterartige Trägerstruktur. Bei sehr feiner Unterteilung können hieraus auch Teilelemente mit einzelnen Zellen realisiert werden. Diese kleinen Module könnten folgenden Eigenschaften aufweisen:

- Probleme, wie sie einem konventionellen Rahmen um ein grossflächiges Laminat entstehen, werden reduziert.
- Die mechanischen Anforderungen an die Einbettmaterialien der Solarzelle werden reduziert.
- Der Rahmen kann aus einem oberen und unteren Teil bestehen, wodurch ein symmetrischer Modul Aufbau realisiert werden kann. Dies ist günstig, wenn die empfindlichen Zellen entlang der neutralen Faser positioniert sind.
- Im Rahmen können elektrische Verbindungen und elektrische Bauteile, wie beispielsweise Bypass-Dioden etc., eingearbeitet sein.
- Die Rahmenteile können Befestigungselemente integrieren.
- Durch die Modularität des Aufbaus ist die Modulgrösse anpassbar. Zusammenhängende Dach- oder Fassadenflächen sind mit einzelnen kleinen Elementen, bestehend aus beispielsweise 1er-, 4er-, 6er- ... Elementen, aufbaubar. Dies kann genutzt werden, um die Dach- und Fassadenflächen optimal zu belegen.



Erste Modelle entsprechender Module wurden entwickelt (siehe Abbildungen 4-8). Rahmenelemente wurden dabei mit Hilfe von 3-D Drucktechnologie gefertigt. Im Falle einer industriellen Umsetzung würde der Kunststoffrahmen aus GFK-Elementen bestehen. Entsprechende Bauteile lassen sich in Grossserien kostengünstig im Spritzgussverfahren herstellen.

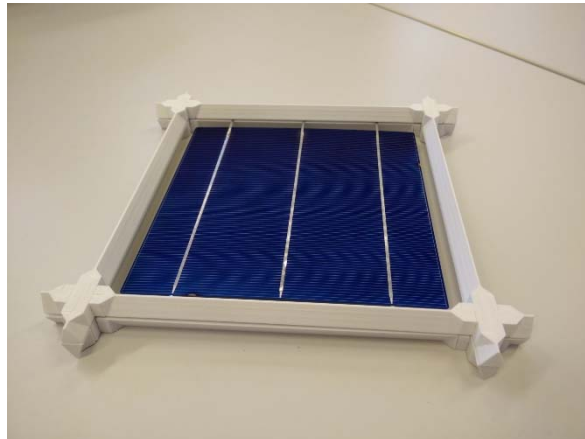


Abbildung 4: Rahmen aus Kunststoff, der mit 3-D Drucktechnologie hergestellt wurde. Die Einbettung der Solarzellen kann mit unterschiedlichen Materialien erfolgen. Potenzielle Einbettmaterialien sind in Tabelle 1 aufgeführt.

In Abbildung 5 ist ein bifaziales Folien/Folien-Modul mit einer symmetrischen Rahmenstruktur auf der Front- und Rückseite gezeigt. Hierbei soll die mechanische Konstruktion die Rückseite nicht verschatten.

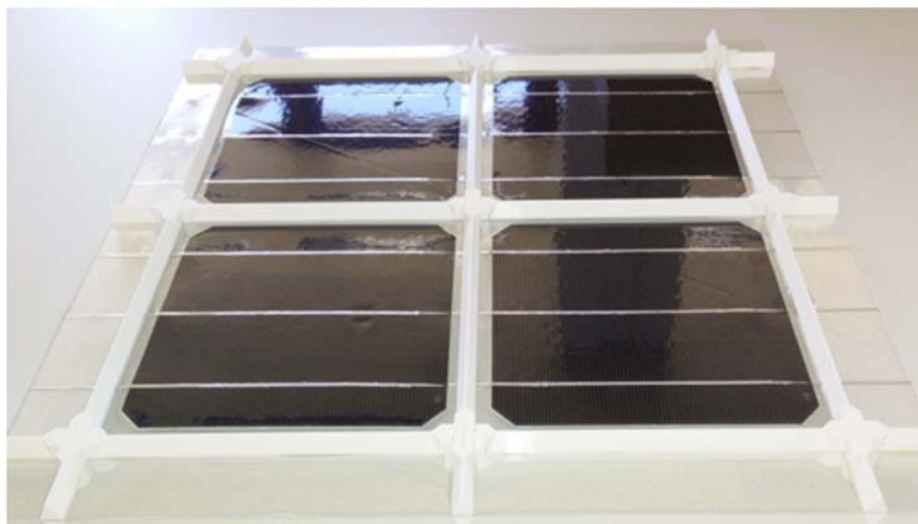


Abbildung 5: Bifaziales Folienlaminat mit Rahmen auf der Vorder- und Rückseite. Der Querschnitt des vorder- und rückseitigen Rahmens ist dreieckig um die Abschattungsverluste zu reduzieren.

Es ist möglich, den Rahmen nur auf einer Seite anzubringen. Die beidseitige Anordnung in Verbindung mit einem symmetrischen Laminataufbau hat allerdings den Vorteil, dass sich die



Solarzellen dann entlang der neutralen Faser anordnen lassen. Dadurch werden die empfindlichen Solarzellen bei Durchbiegung nicht auf Zug oder Druck belastet (vgl. Abbildung 6), wie dies bei anderen Anordnungen der Fall ist.

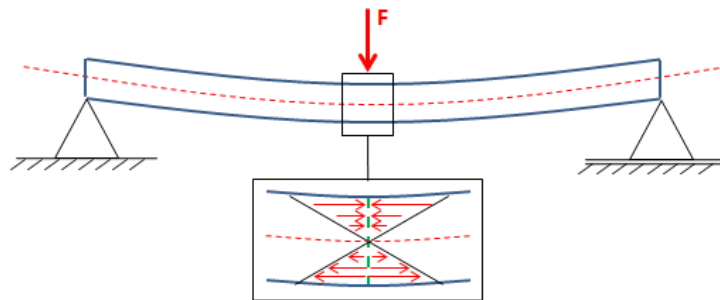


Abbildung 6: Schematisch Darstellung der Solarzelle als gestrichelt rote Linie im symmetrischen Laminataufbau. Durch den symmetrischen Aufbau, befindet sich die Solarzelle in der neutralen Faser. Dies führt bei Verformung durch äussere Kräfte zu den geringsten mechanischen Belastungen für die Solarzelle.

Ein Nachteil einer symmetrischen Rahmenanordnung an der Front- und Rückseite des Moduls ist die Abschattung durch den Rahmen bei schrägem Lichteinfall, was zu einem geringeren Ertrag führen kann. Darüber hinaus ist bei einem Rahmen auf der Frontseite mit Verschmutzung entlang der Rahmenelemente zu rechnen. Bei allen glasfreien Ansätzen kann nicht davon ausgegangen werden, dass ein Hageltest erfolgreich bestanden werden kann. Eine Lösung könnte die Verwendung einer dünnen ETFE-Folie darstellen, welche über den Rahmen gespannt wird (vgl. Abbildung 7). Die Befestigung der Folie könnte durch Klemmung zwischen dem oberen und unteren Rahmen erfolgen. Das ETFE schützt dabei die Zelle und erhöht die Steifigkeit des Rahmens. ETFE besitzt eine sehr hohe Stabilität unter Umweltbedingungen sowie hohe Transparenz und Reissfestigkeit. Dieses Material wird häufig in Fassadenelementen verarbeitet und wurde, in Form von unter Überdruck stehenden, schützenden Folienkissen, auch bereits zum Aufbau innovativer Solaranlagen eingesetzt [FIRB_2015].

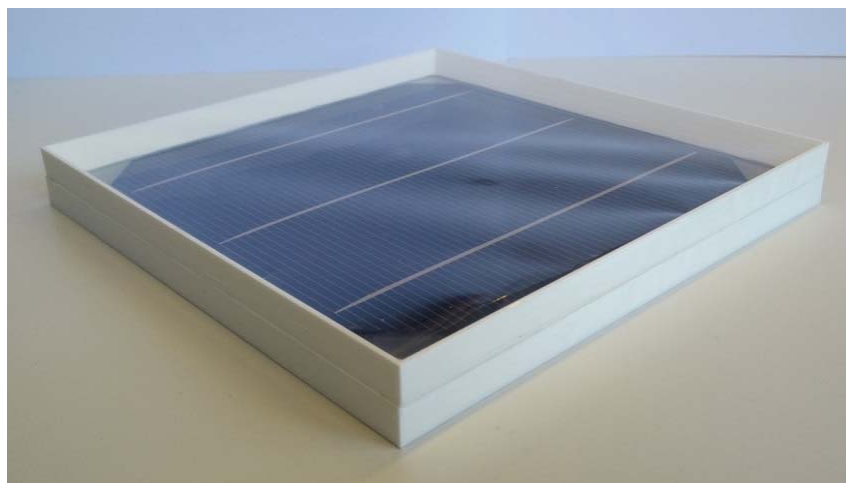


Abbildung 7: Folienlaminat mit Front- und Rückseitenrahmen. Zwischen dem Frontrahmen und dem Laminat ist eine ETFE-Folie eingespannt. Bei geeigneter Spannung kann sie das Laminat schützen und die Steifigkeit des Rahmens erhöhen.



Die einzelnen PV-Elemente können in einer angepassten Unterkonstruktion fixiert werden (vgl. Abbildung 8). In den Rahmen könnten auch elektrische Komponenten integriert werden, um die elektrische Verschaltung mit einem Arbeitsgang zu ermöglichen.

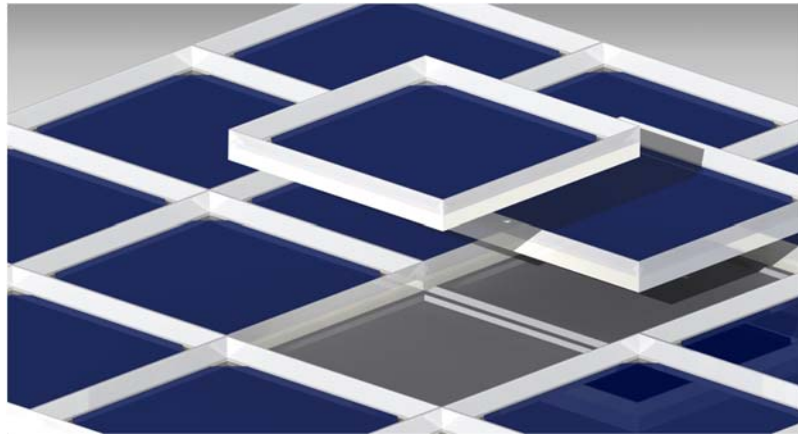


Abbildung 8: Schematische Darstellung von kleinen gerahmten PV Elementen welche in einer Unterkonstruktion mechanisch fixiert werden.

Sehr leichte und vergleichsweise steife Module konnten durch Verwendung von GFK-Platten als Trägermaterial aufgebaut werden. Platten in verschiedenen Stärken konnten über den Projektpartner Solinex Isovoltaic von der Firma Isovolta bezogen werden. Als Kompromiss aus Steifigkeit und Gewicht wurde nach Vorversuchen eine Plattenstärke von 1 mm gewählt. Versuche wurden sowohl mit kleineren vierzelligen Laminaten wie auch mit grösseren Modulen (bis zu 1 m²) durchgeführt. Beispiele für entsprechende Module werden in Abb. 9 und Abb. 3 (links) gezeigt.



Abbildung 9: Sehr leichte und vergleichsweise robuste Module konnten durch Verwendung von GFK-Platten als Trägermaterial aufgebaut werden. Als Frontmaterial wurden transparente Backsheets von Solinex Isovoltaic und ETFE-Folien eingesetzt.



Die GFK-Platten waren teilweise semi-transparent, was prinzipiell auch den Einsatz bifazialer Solarzellen erlaubt. Im Vergleich zu Glas ist die Transmission durch das GFK jedoch deutlich geringer, was den bifazialen Gewinn reduziert. Alternativ wurde weisses EVA als Einbettmaterial unter der Zellenrückseite benutzt (siehe Abbildungen 3 und 9, jeweils links). Hierdurch wird Licht, welches auf die Zellenzwischenräume fällt, reflektiert, was zu einer Leistungssteigerung führt. Bei Verwendung bifazialer Zellen kann, durch die Reflexion von nicht vollständig in den Zellen absorbiertem Licht, eine zusätzliche Erhöhung des Stroms erreicht werden.

Als Alternative zu frontseitigem Glas wurden mehrere mögliche « Frontsheets » getestet. Insbesondere das transparente Backsheet des Partners Solinex Isovoltaic und ETFE-Folienmaterial erwiesen sich als geeignet. Beide Materialien konnten problemlos in einem klassischen Laminationsprozess in Verbindung mit EVA verarbeitet werden, wobei die verwendete ETFE-Folie [NOV_2018] vorbehandelt wurde, um eine gute Haftung zum EVA zu gewährleisten. Das Backsheet und die ETFE-Folie haben ihre prinzipielle Eignung bereits in realen PV-Anwendungen gezeigt. ETFE wird beispielsweise als « Frontsheet » von den Firmen Sunware [SUN_2018] und DAS Energy [DAS_2017] eingesetzt. Die frontseitige ETFE-Folie verspricht eine sehr gute Widerstandsfähigkeit gegen Umwelteinflüsse bei hoher Transparenz [JFC_2004] [MRW_2013].

Im Projekt war ein spezifisches Gewicht von $< 2.5 \text{ kg/m}^2$ als Zielwert für kunststoffbasierte Module vorgegeben. Mit Laminaten auf der Basis einer GFK-Grundplatte und frontseitiger ETFE-Folie wurde diese Vorgabe mit einem spezifischen Gewicht von 2.2 kg/m^2 erreicht. Von diesem Modultyp wurden gemäss den Vorgaben auch Module mit einer Grösse von 1 m^2 hergestellt. Schon durch Ersetzen der ETFE-Folie durch das Isovoltaic Solinex Backsheet wurde mit 2.6 kg/m^2 die Vorgabe überschritten.

Statt des in den Zielen festgehaltenen, angestrebten CTM-Verlustes von kleiner 4 % wurde der geringste Verlust mit 5.49% gemessen. Das Ziel wurde mit dem beschriebenen Ansatz, unter Verwendung eines ETFE-Frontsheets, somit nicht erreicht. Trotz der hohen Transparenz des ETFE schlägt sich das Fehlen der heute bei Glas üblichen Antireflexbeschichtung nieder. Ein erhoffter positiver Effekt durch Einprägungen auf der Oberfläche konnte dies nicht kompensieren.

Auch wenn, bis auf die GFK-Supportplatte, alle Materialien standardmässig in der PV eingesetzt werden, mussten die vorgestellten Konzepte Alterungstests unterzogen werden. Für Alterungstests wurden die Module über einen Zeitraum von einem Jahr der äusseren Witterung ausgesetzt, aber nicht elektrisch angeschlossen. Während die Outdoortests der Glas/Glas-Module, wie erwartet, unauffällige Ergebnisse erbrachten, zeigten die Glas/Backsheet- und auch die GFK/ETFE-Module eine vergleichsweise starke Degradation unter Outdoor-Bedingungen. Die Degradation der GFK/ETFE-Module verlief dabei zudem sehr ausgeprägt. Bereits 14 Tage nach der Exposition zeigten die Lamine eine Leistungs-Degradation von ca. 7 %, ohne dann im weiteren Verlauf des Jahres noch weiter zu degradieren. Das Ergebnis zeigt, dass die Materialauswahl im Falle der GFK/ETFE-Module noch nicht als abgeschlossen gelten kann. Das vorgestellte glasfreie Konzept ist aus technischer Sicht von der kommerziellen Anwendung noch weiter entfernt, als die Ansätze mit dünnem Glas in Verbindung mit geeigneter Unterkonstruktion.

Von der österreichischen Firma DAS [DAS_2017] wurde zwischenzeitlich ein Modul auf den Markt gebracht, welches glasfrei ist und dennoch gemäss der IEC-Norm 61215 zertifiziert ist. Dies bedeutet, dass dieses Modul die Zertifizierung inklusive eines Hageltests erfolgreich bestanden hat. Durch die zusätzlichen Verstärkungen, in Form von transparentem GFK vor der Zellenmatrix, steigt das Gewicht jedoch an und liegt in einem ähnlichen Bereich wie bei den Modulen mit dünnem Glas.

Die untersuchten, glasfreien Laminatstrukturen zielten auf geringstes Gewicht ab. Das Bestehen eines Hageltests war in den Projektvorgaben nicht gefordert und wurde auch nicht angestrebt.



Anwendungen wären beispielsweise Faltdachlösungen, wie von der Firma DHP [DHP_2018] angeboten, bei welchen dies nicht relevant ist.

Die glasfreien Lamine weisen, im Vergleich zu typischen Standardlaminaten, eine sehr geringe Steifigkeit auf. Für die Montage können Ansätze, wie weiter oben beschrieben, eingesetzt werden. Auf rückseitigen Gitterstrukturen basierende Ansätze wurden im weiteren Projektverlauf weiterentwickelt und erprobt. Diese werden im anschliessenden Berichtsteil 4.2 (Glas/Glas- und Glas/Backsheet-Module) ausgiebig beschrieben. Um Wiederholungen zu vermeiden, wird im Hinblick auf die Ergebnisse auf diesen Berichtsteil verwiesen. Die entsprechenden Lösungen und Ergebnisse lassen sich direkt auf die glasfreien Lamine übertragen, da die Steifigkeit des Laminats auf die Durchbiegung der Gesamtfläche praktisch keinen Einfluss hat. Je nach Anwendung kann die Stärke der rückseitigen GFK-Platte, entsprechend der zu erwartenden Belastungen, angepasst werden, um eine Durchbiegung zwischen den Streben zu vermeiden.

4.2 Glas/Glas- und Glas/Backsheet-Module

Das Glas spielt beim Standardmodul eine wesentliche Rolle, sowohl im Hinblick auf das Modulgewicht wie auch für die Biegesteifigkeit des Laminates. Wird, als wesentlicher Hebel zur Verringerung des Modulgewichtes, die Glasdicke reduziert, geht dies somit mit einer deutlichen Schwächung der Modulstabilität einher.

Beim klassischen, gerahmten Standardmodul mit Glas/Backsheet-Aufbau wird heute typischerweise eine Glasdicke von 3.2 mm (früher häufig auch 4 mm) eingesetzt. Kostengünstiges, thermisch gehärtetes Solarglas ist aber auch mit einer Dicke von 2 mm erhältlich und wird in dieser Stärke standardmässig bei Glas/Glas-Modulen eingesetzt. Bei geringeren Glasdicken als 2 mm wird die thermische Härtung immer schwieriger und das Glas somit, wenn überhaupt verfügbar, entsprechend teurer. Nur sehr wenige Hersteller haben thermisch gehärtete Gläser im Bereich von 1.6–1.8 mm im Angebot, wobei die Dickenreduktion im Vergleich zum 2 mm Glas nur geringfügig ist. Im Rahmen des LIMES Projekts, welches im solar-era.net Programm durchgeführt wird [SEN_2016], sollen Produktionsprozesse für 1 mm dickes, thermisch gehärtetes Solarglas entwickelt werden. Material für Versuche ist jedoch derzeit nicht verfügbar. Erhältlich sind jedoch chemisch gehärtete Gläser mit deutlich geringerer Stärke. Bei unseren Versuchen kam chemisch gehärtetes Solarglas des japanischen Herstellers AGC Solar mit den Dicken 0.8 und 1.1 mm zum Einsatz

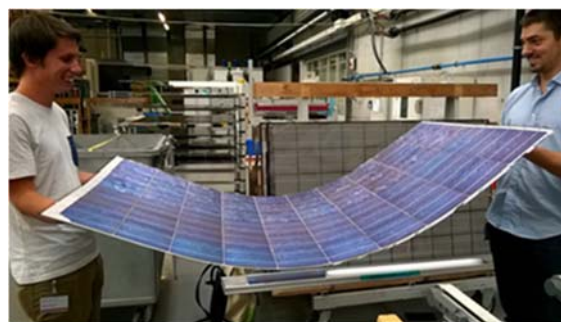


Abbildung 10: Glas/Backsheet Laminat mit 2 mm Glas bei moderater Belastung (links) und 0.8 mm Glas mit aufgelegter Zellenmatrix ohne jede zusätzliche Belastung (rechts).

Schon beim typischen Aufbau von Glas/Backsheet-Modulen mit umlaufendem Rahmen ist jedoch eine Verwendung von kostengünstigem 2 mm dickem Solarglas nicht möglich. Durch die geringe



Biegesteifigkeit des Laminats tritt schon bei geringen Lasten im zentralen Bereich eine starke « Schüsselung » auf (vgl. Abbildung 10). In der Folge wird das Laminat aus dem Rahmen gezogen und die Verbindung zwischen Laminat und Rahmen hohen Belastungen ausgesetzt. Bei Verwendung noch dünnerer Gläser würde dieser Effekt weiter verstärkt.

Ansätze über rückseitige Support-Strukturen, zumeist in Form von Platten oder Honeycomb-Materialien, wurden bereits mehrfach realisiert [EPFL_2008] [Evonik_2013]. Diese Ansätze sind jedoch entweder vergleichsweise schwer, mit anderen Nachteilen behaftet oder im Falle der Honeycomb-Materialien sehr kostspielig.

Unser Ansatz, entsprechende dünne Lamine mit geringer Biegesteifigkeit einzusetzen, besteht darin, das « Schüsseln » durch gitterartige Strukturen zu verhindern (vgl. Abbildung 11). Durch die kleineren Zwischenräume zwischen tragenden Elementen liegen dadurch verkürzte Hebel vor und die Durchbiegung der Laminatfläche wird bei geringem Gewicht effektiv unterdrückt.

Der Laminataufbau selbst entspricht, bis auf die Glasdicke, dem Standard. Insbesondere beim nur 0.8 mm dicken Glas ist jedoch bei Verwendung eines Standard Polyester-Backsheets durch den Schrumpf beim Laminationsprozess eine deutlich sichtbare Krümmung zu beobachten. Durch die geringe Biegesteifigkeit des fertigen Laminats stellt dies jedoch kein Problem hinsichtlich einer nachfolgenden Befestigung auf der Trägerstruktur dar. Der Schrumpf kann durch Verwendung ausgewählter Backsheets, insbesondere Solcher mit integrierter Aluminiumlage, unterdrückt werden. Die Fertigung der Lamine erfolgte in einem Plattenlaminator mit Prozessen, die im Rahmen des KTI-Projektes SLTplus (17992.1 PFIW-IW) in Zusammenarbeit mit der Meyer Burger AG entwickelt wurden. Der geringeren thermischen Last aufgrund der geringeren Glasdicken konnte durch eine einfache Prozessanpassung in Form einer Temperaturniedrigung begegnet werden. Durch Einsatz des Plattenlaminators waren keine « Edge-Compressing »-Effekte beobachtbar, weder beim Glas/Folien- noch beim Glas/Glas-Aufbau.

Die mechanische Belastungsprüfung ist in der IEC-Norm 61215 festgelegt. Die festgelegte Flächenbelastung von 2400 Pa entspricht bei einem Modul der Grösse 1.66 m x 1.00 m, einem Gewicht von 406 kg. Bei dem Testverfahren wird das Modul sowohl von oben, wie auch von der Rückseite her belastet, um Schneelast, beziehungsweise die Sogbelastung durch den Wind, zu simulieren.

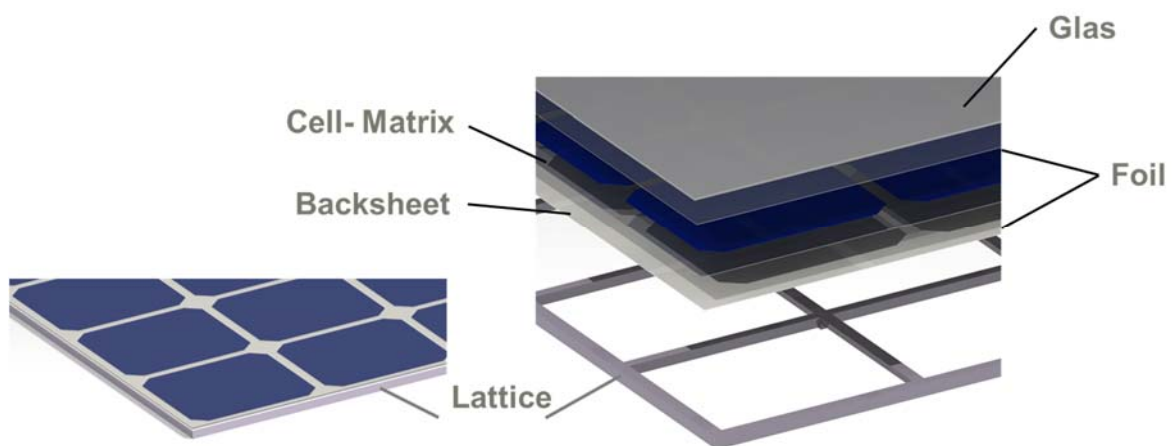


Abbildung 11: Glas/Backsheet-Laminat mit in diesem Fall nur rückseitiger Gitterstruktur zur Unterdrückung der Laminatdurchbiegung.



Zahlreiche Versuche mit Gitter- und « Backrail »-Strukturen wurden durchgeführt, wobei die resultierende Durchbiegung in Abhängigkeit der Last für verschiedene Trägervarianten gemessen wurde. Als Träger wurden vorwiegend Aluminiumprofile mit verschiedenen Querschnitten und Materialdicken eingesetzt, in geringerem Umfang aber auch CFK-Träger. Als Laminat wurden Glas/Backsheet- und Glas/Glas-Laminat der Glasdicken 2 mm, 1.1 mm und 0.8 mm verwendet. Ebenfalls durchgeführt wurden jeweils Vergleichsmessungen mit einem Standard c-Si Modul (3.2 mm Glas und Rahmen). Die Durchbiegung wurde mittels eines Lasersystems zur Entfernungsmessung durchgeführt.

Bereits bei ersten Belastungstests ergab sich, dass die Biegesteifigkeit des Laminats, bei angenommener Fixierung an einer hypothetischen Unterkonstruktion entlang der langen Seiten des Laminats, praktisch ausschliesslich durch die Querträger bestimmt wird (vgl. Abbildung 12). Die Anzahl oder Anordnung von Längsträgern ergab, bei zweiseitigen Auflagern entlang der langen Seiten, keinen erkennbaren Einfluss auf die gemessene Durchbiegung. Entsprechend können die Längsträger weggelassen werden und ausschliesslich Querträger eingesetzt werden. Mit dieser Konfiguration wird das geringste Modulgewicht erreicht.

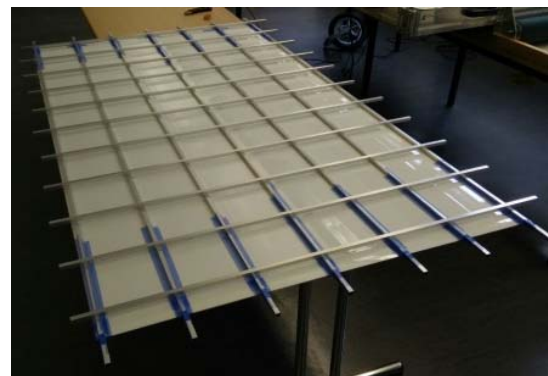
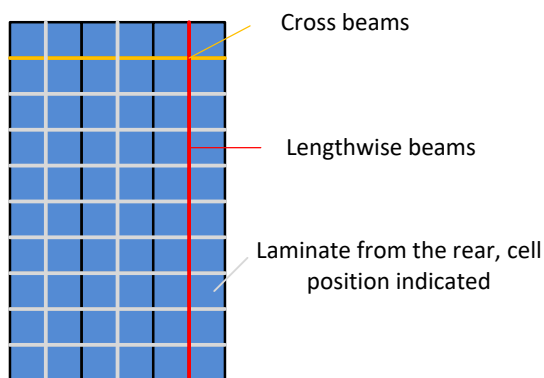


Abbildung 12: Glas/Backsheet-Laminat mit rückseitiger Gitterstruktur zur Unterdrückung der Durchbiegung, wobei hier die Querträger über den Längsträgern platziert wurden.

Bei den Versuchen wurden vorwiegend Konfigurationen mit 6 und 11 Querträgern mit unterschiedlichen Querschnitten untersucht (vgl. Abbildung 13). Dies entspricht Anordnungen von Trägern, die jeweils zwischen den Solarzellen aufgebracht sind, auch wenn dies bei einem Modul in Glas/Backsheet-Konfiguration mit opaker Rückseite im Grunde nicht erforderlich ist.

Die Durchbiegung unter Sog- und Druckbelastung ist praktisch identisch (blaue und gelbe Kurve). Ebenfalls untersucht wurde der Einfluss einer festen Verbindung der Querträger mit dem Auflager im Vergleich zu einem einfachen Auflegen (blaue und braune Kurve). Eine feste Verbindung zwischen Träger und Auflager resultiert in einer deutlich geringeren Durchbiegung im Bereich von 30- 50 %, je nach Last. Dennoch wurden die meisten der späteren Versuche, auch aus praktischen Gründen, mit einfachem Auflegen ohne feste Verbindung durchgeführt.

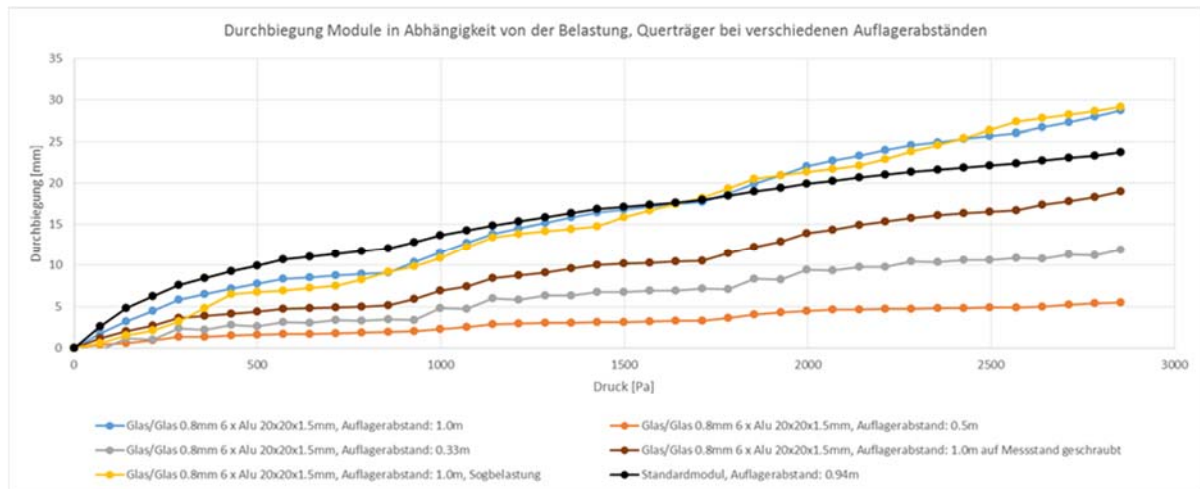


Abbildung 13: Effekt variiert Auflagerabstände (1 m, 0.5 m und 0.33 m) bei fixer Querträger-Konfiguration auf die Durchbiegung eines Glas/Glas-Moduls (0.8 mm Glas) und Vergleich mit Standardmodul (schwarze Kurve). Die Durchbiegung unter Sog- und Druckbelastung ist praktisch identisch (blaue und gelbe Kurve). Ebenfalls untersucht wurde der Einfluss einer festen Verbindung der Querträger mit dem Auflager im Vergleich zu einem einfachen Auflegen (blaue und braune Kurve). Eine feste Verbindung zwischen Träger und Auflager resultiert in einer deutlich geringeren Durchbiegung im Bereich von 30-50 %, je nach Last.

Die im Folgenden gezeigten Messungen wurden, wenn nicht anderes vermerkt, bei einer Belastung von 480 kg (entsprechend 2854 Pa) durchgeführt. Dabei wurden die Durchbiegungen der untersuchten Strukturen bei dieser Last gemessen und das Gewicht der resultierenden Ansätze aufgeführt.

Um einen Vergleich zum Standardmodul zu bekommen, werden jeweils auch das Gewicht und die Durchbiegung des Standardmoduls angegeben (Standardmodul: Glas/Backsheet 3.2 mm Glas, gerahmt).

In Abbildung 14 ist ein Vergleich der berechneten Durchbiegungen verschiedener Querträgerkonfigurationen (2 mm Glas/Backsheet-Laminat) im Vergleich zur Durchbiegung eines Standardmoduls (schwarze Linie) bei gleicher Last gezeigt. Die gestrichelten Linien entsprechen den zugehörigen Modulgewichten, zusammengesetzt aus dem Gewicht des Laminates und der Träger. Die gezeigten Messwerte wurden überwiegend mit 11 Querträgern, aber auch mit 6 und 22 Querträgern erhalten. Die Ergebnisse zeigen, dass es, im Vergleich zum Standardmodul, Konfigurationen mit geringerer Durchbiegung und deutlich geringerem Gewicht gibt. Der Vergleich errechneter Werte mit den Messwerten zeigt eine gute Übereinstimmung.

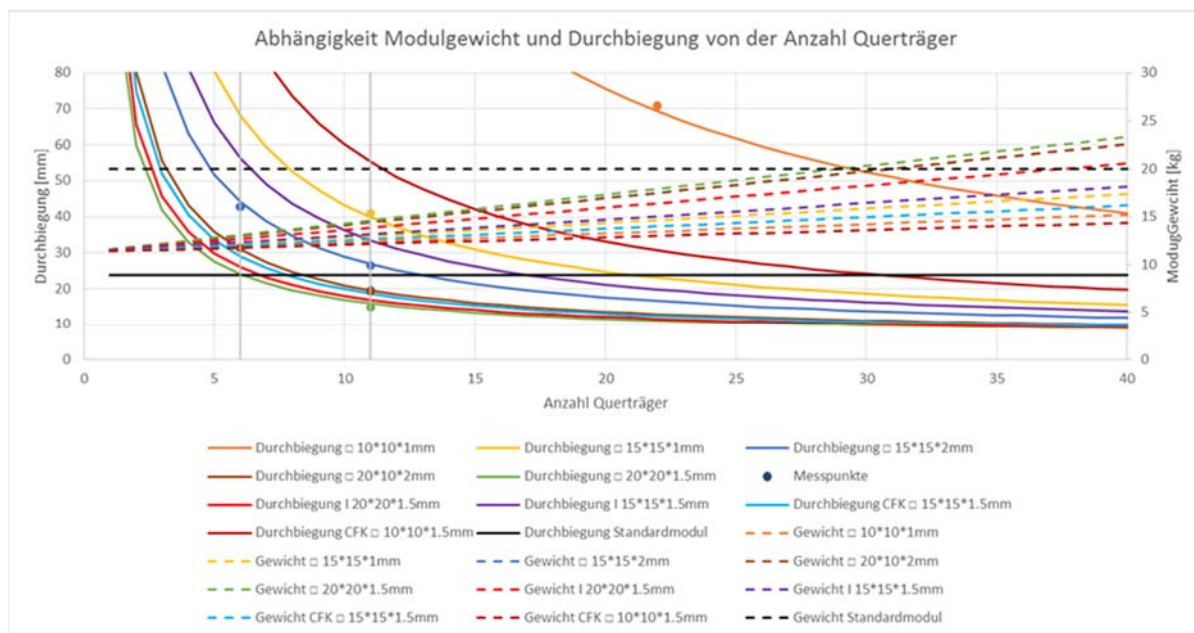


Abbildung 14: Vergleich der Durchbiegungen (durchgezogene Linien) verschiedener Querträgerkonfigurationen (2 mm Glas/Backsheet-Laminat) im Vergleich zur Durchbiegung eines Standardmoduls (schwarze Linie) bei gegebener Last (2854 Pa, 480 kg). Gestrichelte Linien: Modulgewichte, zusammengesetzt aus dem Gewicht des Laminates und der Träger. Die Datenpunkte entsprechen gemessenen Werten.

Abbildung 15 zeigt einen Vergleich der Durchbiegungen von Glas/Backsheet-Laminaten verschiedener Glasdicke (0.8 mm, 1.1 mm und 2 mm) für eine fixe Last (2854 Pa, 480 kg). Bei den Messungen wurden jeweils 6 und 11 Träger (15 mm x 15 mm Aluminium, 2 mm Wandstärke) eingesetzt. Ebenfalls eingezeichnet sind die Durchbiegung des Standardmoduls bei gleicher Belastung sowie die resultierenden Modulgewichte.

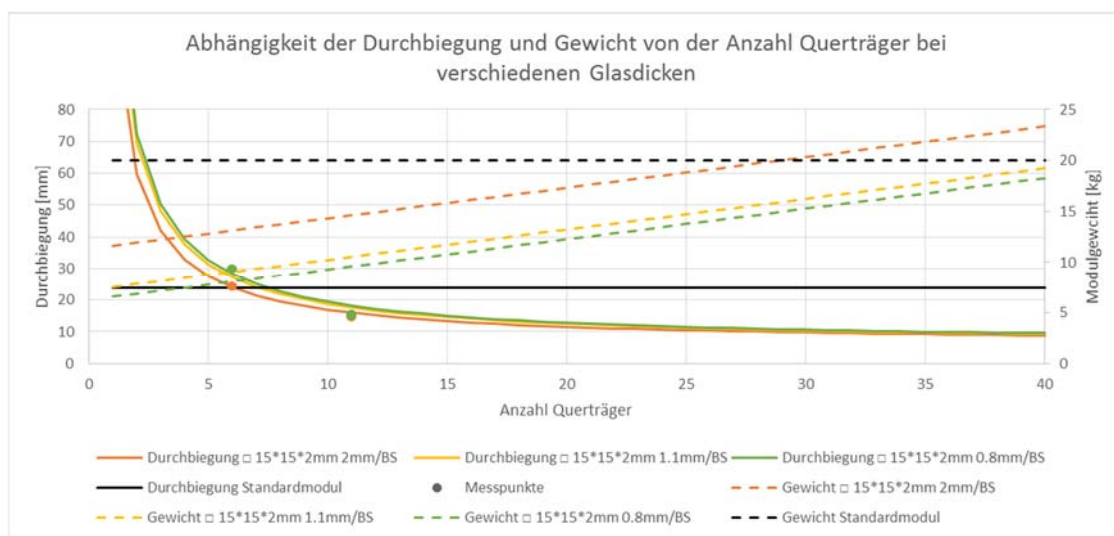
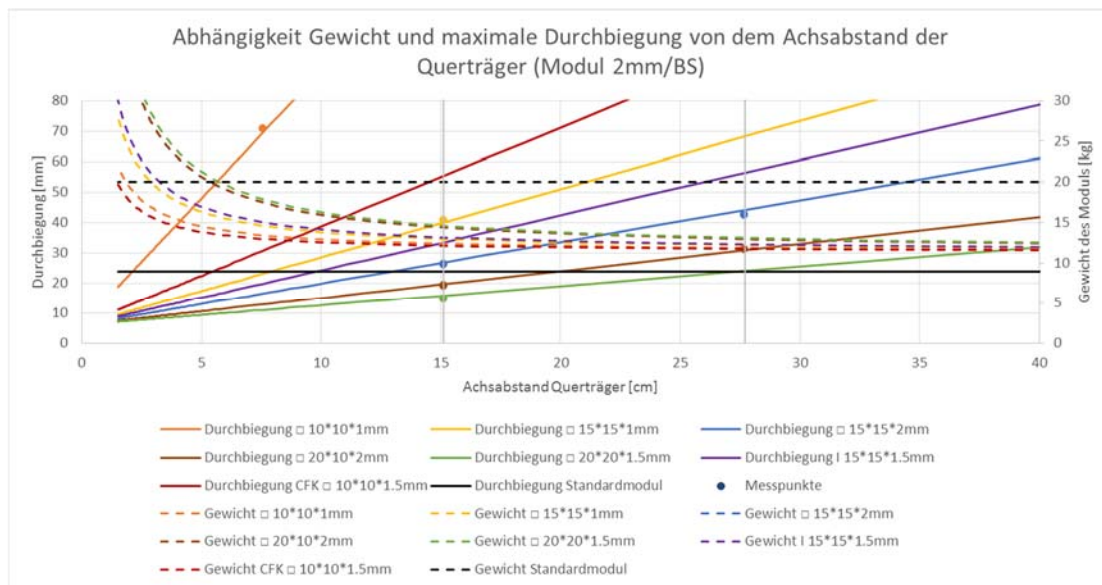


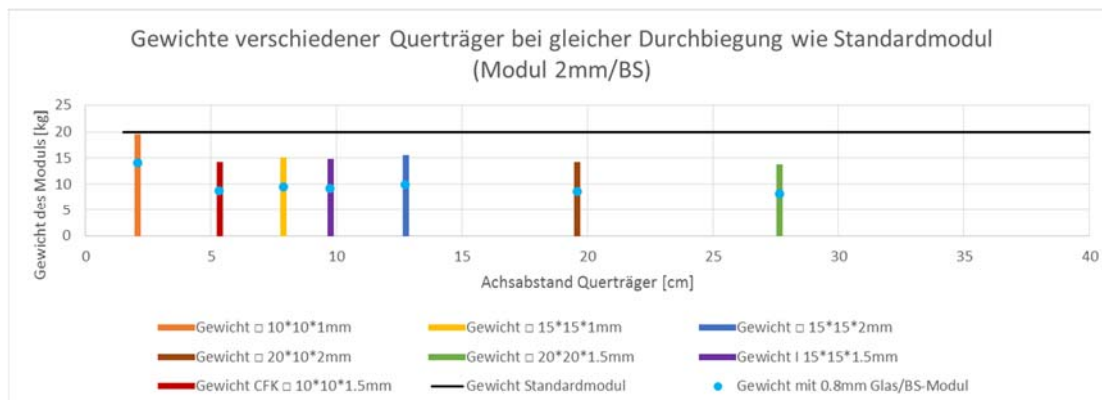
Abbildung 15: Vergleich der Durchbiegungen von Glas/Backsheet-Laminaten verschiedener Glasdicke (0.8 mm, 1.1 mm und 2 mm) für eine fixe Last (2854 Pa, 480 kg), gemessen jeweils mit 6 und 11 Trägern (15 mmx15 mm Aluminium, 2 mm Wandstärke). Die Glasdicke und somit die Biegesteifigkeit der Laminat hat praktisch keinen Einfluss auf die Durchbiegung.



Die Messungen zeigen, dass die mechanische Steifigkeit des Laminats praktisch keinen Einfluss auf die mechanische Steifigkeit der Anordnung hat. Mit 11 Querträgern der beschriebenen Abmessung (15 mm x 15 mm Aluminium, 2 mm Wandstärke) erhält man eine geringere Durchbiegung, als beim Standardmodul. Die Unabhängigkeit der Durchbiegung vom Laminat kann insbesondere auch für jene Ansätze von Interesse sein, bei welchen noch dünnere und leichtere Lamine zum Einsatz kommen. Dies können insbesondere auch die in diesem Projekt untersuchten kunststoffbasierten Modultypen mit « Frontsheets » statt Glas sein.



(a)



(b)

Abbildung 16: Abbildungen 16 a) und 16 b) sind miteinander verknüpft. In 16 a) ist die berechnete Durchbiegung bei 2854 Pa (durchgezogene Kurven, linke Achse) und das resultierende Modulgewicht (gestrichelte Kurven, rechte Achse) in Abhängigkeit vom Achsabstand der Querträger abgebildet. Es sind Profile verschiedener Geometrien (I-Profile (I) und Vierkantprofile (□)) und Stärken dargestellt. In 16 b) wird das Gewicht der jeweiligen Konfigurationen bei gleicher Durchbiegung wie beim Standardmodul angegeben.

In Abbildung 16 a) sind die berechnete Durchbiegung und das Modulgewicht, in Abhängigkeit vom Achsabstand der Querträger, dargestellt. Zum Vergleich sind ebenfalls die Werte eines Standardmoduls eingezeichnet (schwarz). Eingetragen sind Messpunkte bei Abständen von 7.5 cm



(22 Träger), 15.1 cm (11 Träger) und 27.7 cm (6 Träger). Die Gewichte, bei welchen die Durchbiegung mit der des Standardmoduls übereinstimmt, sind in der unteren Grafik (Abbildung 16 b) für Glas/Backsheet-Module mit 2 mm Glas (Balken) bzw. 0.8 mm Glas (Punkte) eingetragen.

Aus der Abbildung ist ersichtlich, dass Modulgewichte von etwa 9 kg (0.8 mm Glas), bei gleicher Durchbiegung wie beim Standardmodul, realisiert werden können. Dies entspricht einer Gewichtsreduktion von über 50 % gegenüber dem Standard. Auch bei Verwendung von thermisch gehärtetem 2 mm Glas, welches kostengünstig standardmässig verfügbar ist und keine Probleme im Hinblick auf Hagel erwarten lässt, werden Modulgewichte von etwa 13 kg erreicht. Auch dies entspricht einer deutlichen Gewichtsreduktion im Vergleich zu den 20 kg des Standardmoduls.

Da sich die Verwendung sehr dünner Gläser mit dem vorgestellten Konzept im Hinblick auf die Biegesteifigkeit als aussichtsreich erweist, stellt sich weiter die Frage, ob mit derart dünnen Gläsern auch Lamine aufgebaut werden können, welche die geforderten Hageltests überstehen. Beim Hageltest werden Eiskugeln mit 2.5 cm Durchmesser eingesetzt, welche mit einer Geschwindigkeit von 23 m/s auf das Modul treffen. Gemäss der Norm dürfen die Eiskugeln keine erkennbaren Risse aufweisen. Mehrere Ansätze zur Herstellung von Eiskugeln wurden geprüft, bis eine zufriedenstellende Lösung zur Herstellung gefunden war. Beschusstests gemäss der Norm, welche an einem Glas/Glas-Modul mit 0.8 mm Glas durchgeführt wurden, ergaben keinen Hinweis auf einen durch den Beschuss verursachten Zellenbruch oder auf eine Leistungsminderung. Ein Glas/Backsheet-Modul mit 0.8 mm Glas und Dummy-Zellen (elektrisch nicht kontaktierbar) wurde ebenfalls Hagelbeschuss ausgesetzt, wobei sich bei der Sichtprüfung ebenfalls kein Hinweis auf eine Schädigung ergab.

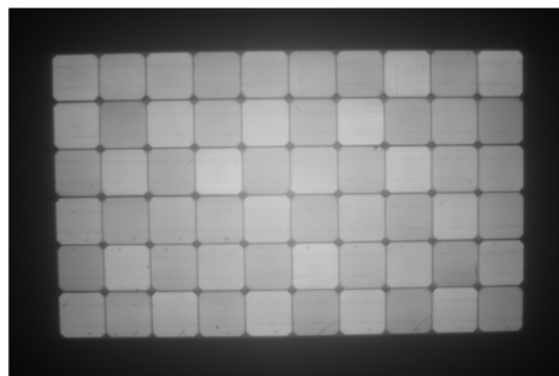
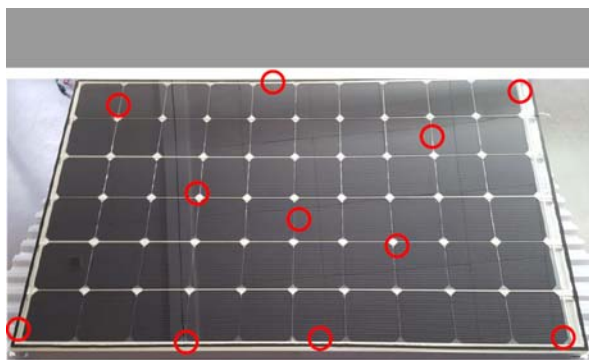


Abbildung 17: Lage der Einschüsse von Hagelkörnern rot markiert. In der rechten Abbildung wird eine Elektrolumineszenz-Aufnahme eines Glas/Glas-Modul mit 0.8 mm Glas nach Hagelbeschuss gezeigt, eine Schädigung von Glas oder Zellen war nicht zu erkennen.

Neben der Elektrolumineszenz-Analyse zur Aufdeckung eventueller Beschädigungen der Zellen durch den Hagelbeschuss wurden die elektrischen Parameter der Module vermessen (Tabelle 2). Auch hier ergab sich kein Hinweis auf eine Leistungseinbusse durch den Beschuss. Das Ausbleiben von Beschädigungen und Leistungseinbussen bei Laminaten mit extrem dünnem Frontglas (0.8 mm und 1.1 mm) ist vielversprechend im Hinblick auf einen potenziellen, realen Einsatz der entwickelten Modulkonzepte.



Modultyp						
		P_{mpp}	U_{mpp}	I_{mpp}	I_{sc}	V_{oc}
Glas/Backsheet 3 mm	vor	246.5 W	30.26 V	8.15 A	8.61 A	38.48 V
	nach	246.3 W	30.32 V	8.12 A	8.60 A	38.46 V
	Delta	-0.08 %	+0.21 %	-0.33 %	-0.12 %	-0.04 %
Glas/Glas 1 mm						
	vor	234.01 W	30.50 V	7.67 A	8.05 A	37.57 V
	nach	234.26 W	30.60 V	7.65 A	8.04 A	37.57 V
	Delta	+0.10 %	+0.29 %	-0.26 %	-0.21 %	+0.01 %
Glas/Glas 0.8 mm						
	vor	241.22 W	32.11 V	7.51 A	7.70 A	42.79 V
	nach	241.26 W	32.26 V	7.48 A	7.60 A	42.77 V
	Delta	+0.02 %	+0.48 %	-0.40 %	-1.23 %	-0.05 %

Tabelle 2: IV-Messung von Glas/Glas-Modulen mit dünnem Glas (0.8 mm und 1.1 mm Glasdicke) sowie eines Glas/Backsheet-Moduls mit 3.2 mm Glasdicke vor und nach dem Hageltest.

Auf der Basis der Module mit dünnem Glas wurden Aufständerkonzepte entwickelt, welche an den Einsatz leichter Module angepasst sind. Da das Modul alleine noch kein System ist, müssen die Unterkonstruktion und die Verbindung mit dem Dach betrachtet werden. Auf einem Flachdach ist die gängigste Variante, die Module mit einer Konstruktion aus Aluminium aufzuständern. Mit einem Standardmodul werden Flächengewichte von 13 bis 15 kg/m² (Unterkonstruktion plus Modul) erreicht. Diese werden dann allerdings typischerweise auf das Flachdach gestellt und dann mit bis zu 100 kg/m² ballastiert, um der Windlast zu begegnen. Diese Art der Aufständerkonstruktion ist bei Verwendung von Leichtbaumodulen wenig sinnvoll. Grundsätzlich kann jedoch das geringe Modulgewicht Vorteile bei der Montage bieten. Darüber hinaus können die Leichtbaumodule ohne Rahmen eine höhere Packungsdichte beim Transport erreichen und somit die Transportkosten senken.



Abbildung 18: Leichtbaumodul mit rückseitiger Gitterstruktur (7 Längsträger, ein Querträger) auf einer Unterkonstruktion des Herstellers Schweizer Metallbau welche für den Einsatz auf Flachdächern vorgesehen ist. Der Vorteil von Leichtbaumodulen bleibt bei dieser Form der Aufständerkonstruktion auf geringere Transportkosten und leichteres Handling der Module vor Ort beschränkt. Die Unterkonstruktion wurde von Schweizer Metallbau gestellt.



Eine entsprechende Ausführung ist in Abbildung 18 gezeigt. Das Leichtbaulaminat wurde in diesem Fall auf einer Unterkonstruktion der Firma Schweizer Metallbau verbaut. Da die Bauform in « Landscape »-Format zwei Auflager an den kurzen Enden des Moduls günstiger erscheinen lässt, wurden rückseitige Längsträger und ein unterstützender Querträger in der Mitte eingesetzt.

Sehr leichte Aufständereien sind bei Befestigungen mittels Dachdurchdringung möglich. Gerade bei Trapezblech- oder Wellblechdächern, welche aufgrund ihrer Struktur oft eine nur geringe Zusatzlast erlauben, sind durchdringende Befestigungen üblich. Genau diese Dachausführungen sind, aufgrund des limitierten Zusatzgewichtes, interessante Anwendungsbereiche für leichte PV-Systeme.

Die Firma Tritec AG [Tritec_2018] verwendet Aluprofile zur Fixierung der Module. Noch geringer ist das Gewicht der « Unterkonstruktion » bei einer Lösung des Herstellers Renusol [Renusol_2018], bei welcher die Modulaufnahmen direkt über kurze Aluleisten am Dach befestigt werden.

Mit den zuletzt vorgestellten Lösungen ist es möglich, Modulbefestigungen mit nur sehr geringem Gewicht zu realisieren. Das Systemgewicht pro Modul entspricht dabei annähernd dem Modulgewicht. Prinzipiell können die im Rahmen des Projektes entwickelten Leichtbaumodule an entsprechende Unterkonstruktionen angepasst werden. So können Schienen, welche auf das Dach angeschraubt werden, auch fix mit den Querträgern der rückseitigen Konstruktion verbunden werden. Ein Nachteil dieser Lösungen ist dabei jedoch, dass die Modulneigung direkt der Dachneigung entspricht. Daher sollte eine Lösung entwickelt werden, welche für den Einsatz auf Trapezblech- oder Wellblechdächern geeignet und zugleich verstellbar ist. Zudem sollte auch hier die « Landscape »-Variante realisiert werden, auch wenn dies in einem etwas höheren Gesamtgewicht resultiert.

Die Konstruktion besteht aus Aluminiumprofilen, welche als Auflagefläche für die Träger bzw. als Montageschiene auf dem Dach dienen. Ein drittes kleineres Profil dient der der Einstellung des Winkels. Diese Unterkonstruktion wurde mit Verschraubungselementen des Herstellers Tritec AG verbunden, welche zum Einsatz auf Trapezblechdächern vorgesehen sind. Die Verbindungselemente wurden uns vom Hersteller zur Verfügung gestellt.

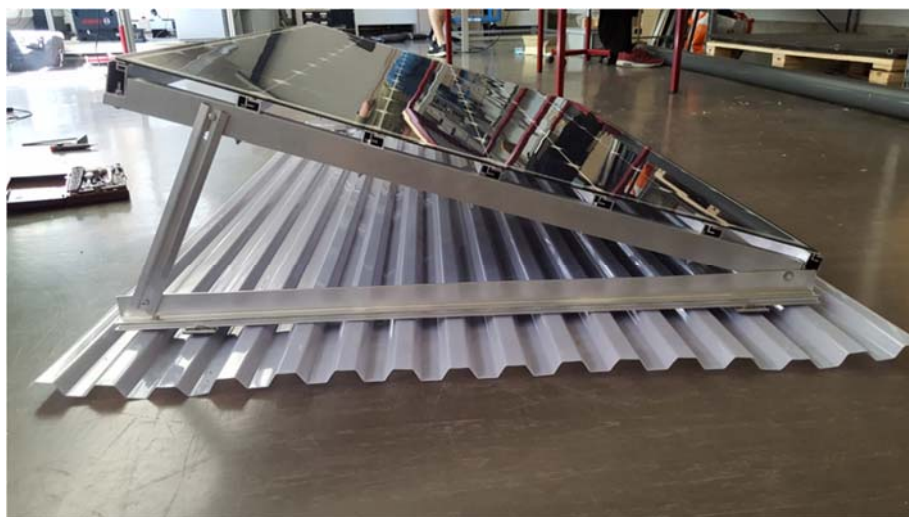


Abbildung 19: Eine Unterkonstruktion für das Leichtbaumodul wurde mit Verschraubungselementen des Herstellers Tritec AG verbunden, welche zum Einsatz auf Trapezblechdächern vorgesehen sind. Die entsprechenden Elemente wurden uns vom Hersteller zur Verfügung gestellt.



Abbildung 20: Im Unterschied zu den bisher getesteten Varianten wurden keine durchgehenden rechteckigen Profile, sondern offene C-Profile eingesetzt. Bei diesem Ansatz werden jeweils C-Profile, welche sowohl am Modul wie auch an der Unterkonstruktion befestigt sind, bei der Montage durch einfaches Einlegen ineinander gehakt.

Gleichzeitig wurde bei dem beschriebenen Demonstrator die erste Version eines Ansatzes zur schnellen Montage geprüft. Bei diesem Ansatz werden jeweils C-Profile, welche sowohl am Modul, wie auch an der Unterkonstruktion, befestigt sind, bei der Montage durch einfaches Einlegen ineinander gehakt (vgl. Abb. 20). Die Verriegelung durch das Einschieben einer Sperre ist möglich, wurde aber bisher noch nicht getestet. Ein Unterschied zu den bisher getesteten Varianten besteht darin, dass keine durchgehenden rechteckigen Profile, sondern offene C-Profile eingesetzt wurden.

An der Kombination aus Unterkonstruktion und Modul wurden Belastungstests analog zu den bisher Gezeigten durchgeführt (Abb. 21). Trotz des noch vorläufigen Charakters dieses Ansatzes konnte die Gesamtkonstruktion mit 480 kg belastet werden. Für quantitative Messungen (siehe Abbildung 22) wurde das Modul, inklusive des rückseitigen Gitters, auf dem Messtisch montiert, um eine Messung der Durchbiegung mittels Laser zu ermöglichen.



Abbildung 21: Auch an der Kombination aus Unterkonstruktion und Leichtbaumodul wurden Tests mit Lasten bis zu 480 kg durchgeführt.

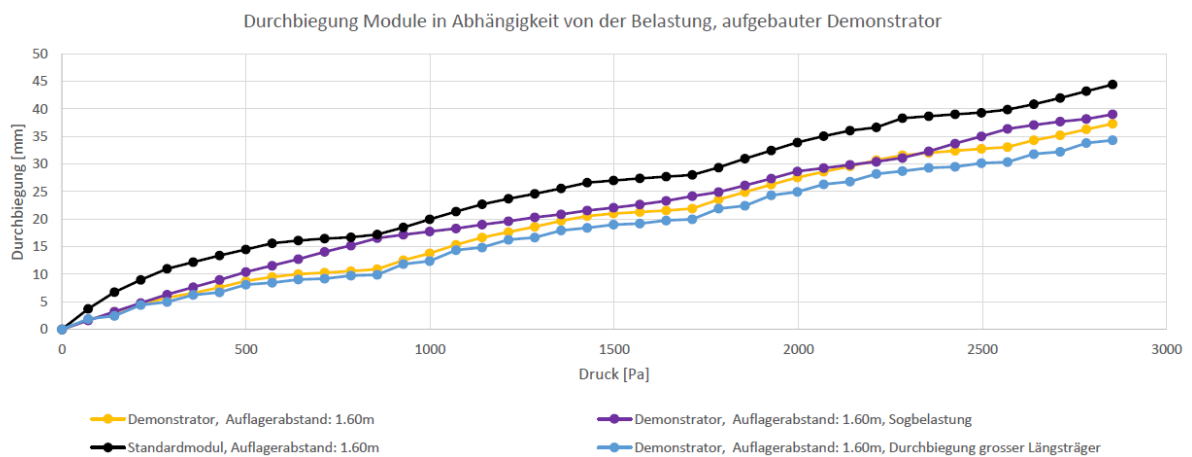


Abbildung 22: Durchbiegung der Kombination aus Modul und rückseitigem Gitter entsprechend der vorhergehenden Tests mit bis zu 480 kg.

Die beschriebene Konstruktion ist hinsichtlich ihres Gewichtes und ihres Aufbaus keineswegs optimiert. Zudem wurde der schwerere Aufbau mit Längsträgern bewusst gewählt, um eine einfachere Montage in « Landscape »-Ausrichtung zu ermöglichen.

Dennoch war es möglich, mit dem Demonstrator und einem Glas/Glas-Modul (2 x 0.8 mm Glasdicke) ein Gesamtgewicht von nur circa 20 kg zu realisieren. Dies entspricht in etwa dem Modulgewicht eines Standardmoduls (Glas/Backsheet, 3.2 mm Glas, gerahmt) ohne Aufständering. Glas/Backsheet-Module mit 0.8 mm dünnem Frontglas inklusive Unterkonstruktion erreichen spezifische Flächengewichte von nur 10.8 kg/m² (siehe Tabelle 3). Im Vergleich zum Glas/Glas-Modul mit 0.8 mm Glas wird somit nochmals eine Gewichtsreduktion des Gesamtsystems um 13 % erreicht.

Aufgrund der Ergebnisse ist davon auszugehen, dass Module mit dünnem Glas den Biegebelastungen und auch Hagel standhalten. Ob in absehbarer Zeit derart dünnes Glas auch kostengünstig verfügbar sein wird, ist eine andere Frage. Das hier eingesetzte 0.8 mm und 1.1 mm dünne Glas ist



chemisch gehärtet und sehr teuer. Thermisch gehärtetes 1 mm dickes Glas, wie es im LIMES Projekt im Rahmen des solar-era.net Programms entwickelt werden soll, steht noch nicht zur Verfügung. Module mit thermisch gehärtetem 1.6 mm dickem Glas (Hersteller: LiSEC, Österreich) wurden aufgebaut und unter Outdoor-Bedingungen getestet. Mechanische Belastungstests mit diesem Laminattyp wurden jedoch noch nicht durchgeführt.

Sollte sich das sehr dünne Glas als in absehbarer Zeit als nicht kostengünstig herstellbar erweisen, dann bietet das vorgestellte Konzept die Möglichkeit Glas/Backsheet-Module aus standardmässig verfügbarem, thermisch gehärtetem 2 mm Glas herzustellen. Das Gesamtgewicht des Systems liegt dabei nur geringfügig höher, als im Falle des 2 x 0.8 mm Glas/Glas-Moduls.

	Glas/Backsheet, 0.8 mm Glas		Glas/Glas 0.8 mm Glas	
	[kg]	[kg/m ²]	[kg]	[kg/m ²]
Gewicht Unterkonstruktion	2.1		2.1	
Gewicht Modul & Träger	15.2		18.1	
Gesamtgewicht	17.3	10.8	20.2	12.6
Optimiert	14.0	8.8	16.9	10.5

Tabelle 3: Gewicht der einzelnen Komponenten des Demonstrators

Im Hinblick auf die Kosten ist vor allem auch die verbaute Aluminiummenge ein wichtiger Faktor. Verglichen mit der Flachdachaufständerung eines Standardmoduls wird beim Demonstrator noch zu viel Aluminium verbaut. Während dies bei der Standardaufständerung knapp 8.5 kg Aluminium sind, werden beim Demonstrator in der jetzigen Form noch gut 11 kg Aluminium eingesetzt (Abb. 23). Der vorgestellte Demonstrator bietet jedoch noch deutlich Potenzial zur Gewichtsreduktion.

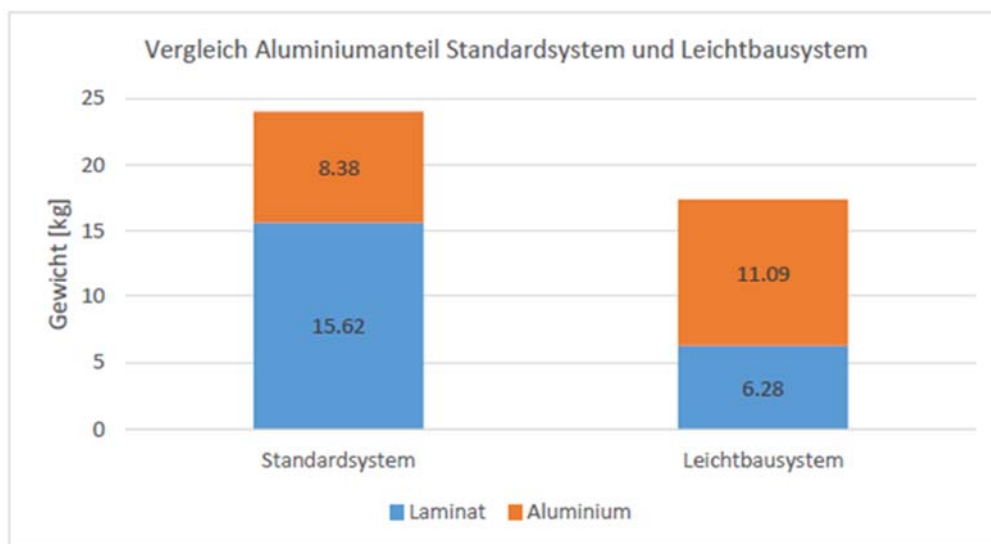


Abbildung 23: Gewichtsanteile Laminat und Aluminium bei einer typischen Flachdachaufständerung eines Standardmoduls und des bisherigen, noch nicht optimierten, Demonstrators.

In der derzeitigen Ausführung hat der Demonstrator, insbesondere im Hinblick auf die Träger und die Unterkonstruktion, noch deutliches Verbesserungspotenzial. Höhere Träger sind stabiler, ihre



Steifigkeit ändert sich mit der Höhe in der 3. Potenz, während sich die Breite der Träger nur in der 1. Potenz auf die Steifigkeit auswirkt. Optimal wären dünne, jedoch hohe Träger. Durch eine Neudimensionierung der Träger könnte eine Gewichtsreduktion von 3.4 kg bei gleicher Steifigkeit erreicht werden. Dies entspricht einer Reduktion von 20 % gegenüber dem Demonstrator. Unter diesen Annahmen ergibt sich Gesamtgewicht von 14 kg, wobei zudem die verbaute Aluminiummenge unter jene eines Standardsystems gebracht wird.

Bereits in der nicht optimierten Version des Demonstrators mit, im Hinblick auf das Gewicht ungünstigen Längsträger-Auslegung, wird bei Kombination mit dem 0.8 mm Glas/Backsheet-Modul das angestrebte spezifische Gewicht von 12.5 kg/m² deutlich unterschritten. Es ist dabei hervorzuheben, dass dieses spezifische Gewicht alleine für das Modul vorgesehen ist, im beschriebenen Fall jedoch durch das Modul plus Unterkonstruktion erreicht wird, welche zudem auch eine Winkelverstellung zulässt. Selbst mit dem schwereren Glas/Glas-Modul (2 x 0.8 mm Glas) wird unter diesen Voraussetzungen ein spezifisches Gewicht von 12.6 kg/m² erreicht. Durch die beschriebene Optimierung können Werte von 8.8 bzw. 10.5 kg/m² erzielt werden, wie in Tabelle 3 aufgeführt.

Die Leistungsdegradation der Module wurde bei mehreren Modulen in einem einjährigen Outdoor-Langzeitversuch getestet (siehe Abbildung 24).



Abbildung 24: Auf einem improvisierten Stand (rechts) für ein Glas/Glas- sowie für zwei glasfreie GFK/ETFE-Module (hier nur ein Platz belegt) wurden die Module Outdoor-Bedingungen ausgesetzt, aber nicht elektrisch angeschlossen. Links ist ein Glas/Backsheet-Modul mit 0.8 mm Glasdicke auf der im Projekt entwickelten Gitter-Unterkonstruktion. Die Module wurden zur Vermessung mehrfach ins Labor transferiert.

Bei Outdoor-Langzeittests über ein Jahr zeigten die Glas/Glas- Module Schwankungen innerhalb der Messtoleranzen der Flasher. Eine Degradation war nicht erkennbar. Dahingegen wurde für die Glas/Backsheet-Konfiguration eine auffällig hohe Degradation beobachtet. Das Modul in Abbildung 24 links zeigte nach Ablauf eines Jahres eine Leistungsabnahme von 5.6 %. Bereits zu Beginn der Outdoor-Dauerexposition zeigte sich dabei eine ausgeprägte Degradation von etwa 2 % nach nur einem Monat. Dieses Ergebnis legt nahe, dass die Laminationsparameter für diese Konfiguration nicht richtig getroffen wurden. Durch die geringe Glasdicke liegen im Gegensatz zum Standard stark abweichende thermische Bedingungen vor. Eine Optimierung müsste in Versuchsreihen erfolgen, was aber aufgrund der später nicht mehr erhältlichen dünnen Gläser nicht mehr möglich war. Es gibt allerdings keinen Grund anzunehmen, dass sich das Laminat in dieser Hinsicht prinzipiell von Standardlaminaten mit höherer Glasdicke unterscheiden sollte. Der einzige Unterschied besteht im dünneren Glas, das aber keine höhere Durchlässigkeit für Feuchte aufweisen sollte.

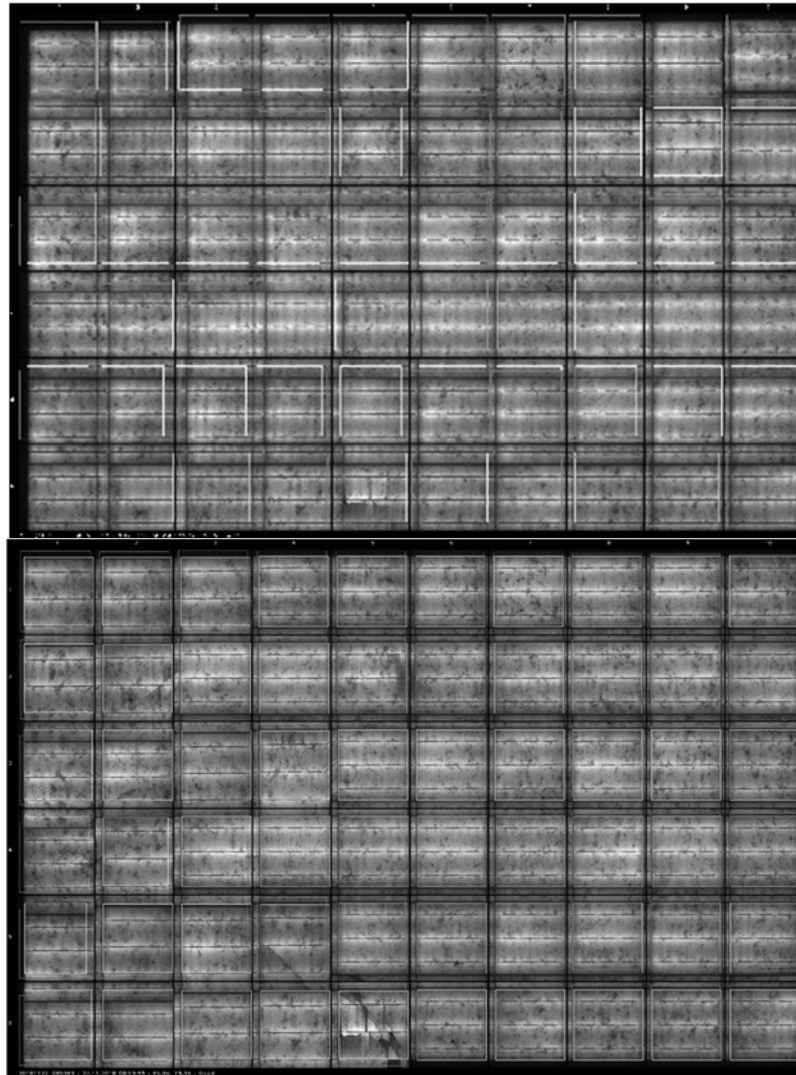


Abbildung 25: Elektrolumineszenz-Aufnahmen eines Glas/Glas-Moduls mit 0.8 mm Glasdicke zu Beginn der Messungen (oben) und nach einer einjährigen Outdoor-Exposition (unten). Im zentralen unteren Kantenbereich sind zusätzliche Schäden erkennbar.

Das Glas/Glas-Modul mit 0.8 mm Glasdicke, welches am ISC Konstanz eine einjährige Outdoor-Exposition durchlief, zeigte in den Leistungsmessungen keine Degradation. Dennoch sind bei Elektrolumineszenz-Aufnahmen, welche zu Beginn und am Ende der Periode aufgenommen wurden, zusätzliche Schäden zu erkennen (vgl. Abb. 25). Diese haben keinen messbaren Einfluss auf die elektrische Leistung, da die entsprechenden Segmente nicht durch Risse von den Busbars abgetrennt sind (keine grossen, schwarzen Zellensegmente in der Elektrolumineszenz-Aufnahme erkennbar). Die Ursache der Schädigung ist unklar. Da Hageltests ohne Schäden überstanden wurden, könnten die Schäden aufgrund der Position auch durch das Handling bei der mehrfachen Durchführung von Messungen entstanden sein (Grifffläche).

Gemäss den Vorgaben im Projekt, soll das Glas/Glas-Modul bei bifazialer Ausführung ein Kosteneinsparungspotential von 30 % aufweisen. Im Hinblick auf das Material unterscheiden sich die vorgestellten Module insbesondere durch das Glas und die angepasste Aufständering. Im Falle des



Glases ist dieses bei 0.8 mm Dicke im Vergleich zu einem Glas/Glas-Modul mit 2 mm Glas um einen Faktor 2.5 geringer. Dennoch kann beim Glas derzeit nicht davon ausgegangen werden, dass sich das geringere Gewicht in einer Kostenreduktion niederschlagen wird. Bei chemisch gehärtetem Glas ist der Herstellungsprozess aufwendiger. Dies könnte sich ändern, falls das solar-era.net Projekt LIMES mit seinem Vorhaben erfolgreich ist 1 mm starkes, thermisch gehärtetes Solarglas herzustellen. Entsprechend der Ausführungen weiter oben kann beim neu entwickelten Modulkonzept, inklusive der Unterkonstruktionen, von etwa der gleichen Aluminiummenge wie beim heutigen Standard, bei insgesamt geringerem Gesamtgewicht, ausgegangen werden. Geht man beim Glas somit bei 2.5-fach weniger Gewicht vom gleichen Preis wie für heute eingesetzte Gläser aus, resultiert somit in erster Näherung eine Kostenneutralität gegenüber dem heutigen Standard. Ein Kostenreduktionspotential von 30 % muss daher in erster Linie durch eine Reduktion der Kosten pro kWh über eine Ertragssteigerung in bifazialer Ausführung erreicht werden.

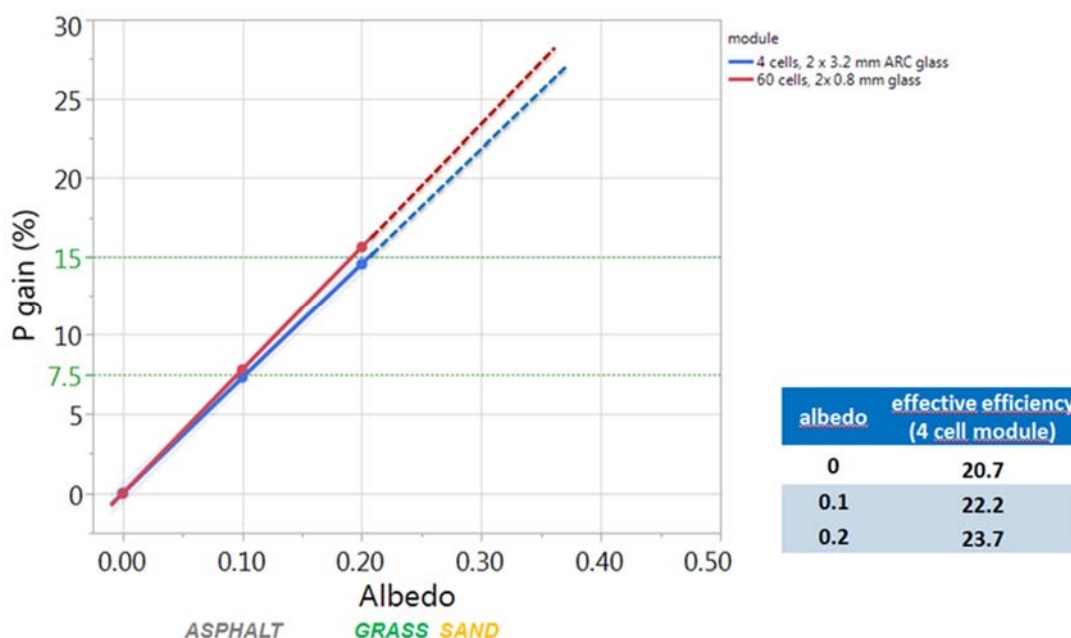


Abbildung 26: Sowohl an grossformatigen, 60-zelligen Modulen, wie in Abbildung 24 gezeigt, wie auch an kleinen vierzelligen Modulen konnte der bifaziale Gewinn entsprechend IEC 60904-1-2 dargestellt werden. Das Potential für eine 30%-ige Ertragssteigerung bei bifazialer Ausführung kann bei hohen Albedo-Werten erreicht werden.

Sowohl an grossformatigen, 60-zelligen Modulen wie auch an kleinen vierzelligen Modulen, konnte der bifaziale Gewinn entsprechend IEC 60904-1-2 demonstriert werden (Abbildung 26). Das Potential für eine 30%-ige Ertragssteigerung bei bifazialer Ausführung kann bei hohen Albedo-Werten erreicht werden, welche günstiger liegen, als jene für Sand. Dies ist beispielsweise mit weisser Dachfolie erreichbar, wie sie auch bei unserer Versuchsanlage auf dem Dach der ZHAW eingesetzt wird. In Tabelle 4 ist eine Auflistung von Testgruppen mit verschiedenem Aufbau (Grösse, Glas, Glasdicke) gezeigt, welche zur Evaluation verschiedener Gläser und Materialien aufgebaut wurden. Als Einbettmaterial wurden Folien des Projektpartners Isovoltaic Solinex eingesetzt. Im Rahmen des Projekts wurde durch die Partner der Einfluss der Einbettmaterialien, insbesondere der Effekt geringerer Foliendicken bei Verwendung der IBC-Rückkontaktzellen, auf die Schädigung bei der Modulherstellung untersucht. Gläser können über ihr Transmissionsverhalten die Leistung der



Laminates beeinflussen. Bei Verwendung des gleichen Einbettmaterials erbrachte aber die Verwendung verschiedener Gläser tatsächlich unterschiedliche Ergebnisse.

Group	1	2	3	4	5
Cells					
Dispensing					
1 mm (Schott) Glas 20x20 - Folie					
1 mm (Schott) Glas/Glas 20x20					
1 mm (Berliner) Glas/Glas 20x20 ARC					
2 mm (Interfloat) Glas/Glas 20x20					
0.85 mm (AGC) Glas/Glas 4er Modul					
Lamination 1					
Lamination 2					
IV, Elektro- und Photolumineszenz					
DH					
TC					

Tabelle 4: Testgruppen mit verschiedenem Aufbau (Grösse, Glas, Glasdicke) welche zur Evaluation verschiedener Gläser und Materialien aufgebaut wurden. Als Einbettmaterial wurden Folien des Projektpartners Isovoltaic Solinex eingesetzt.

Bei den Klimakammertests zeigten die Laminats mit sehr dünnen Gläsern, sowohl bei TC- wie auch DH-Prüfungen, keinen Unterschied zu Laminats mit 2 mm Glas. Dies gilt sowohl für Glas/Glas- wie auch Glas/Backsheet-Laminats. Die verschiedenen Gläser haben hingegen durchaus einen Einfluss auf die elektrische Leistung und den CTM-Verlust des resultierenden Laminats bei der Einbettung der Solarzellen.

CTM in Isc verschiedener Gläser – 1 Zell Module:

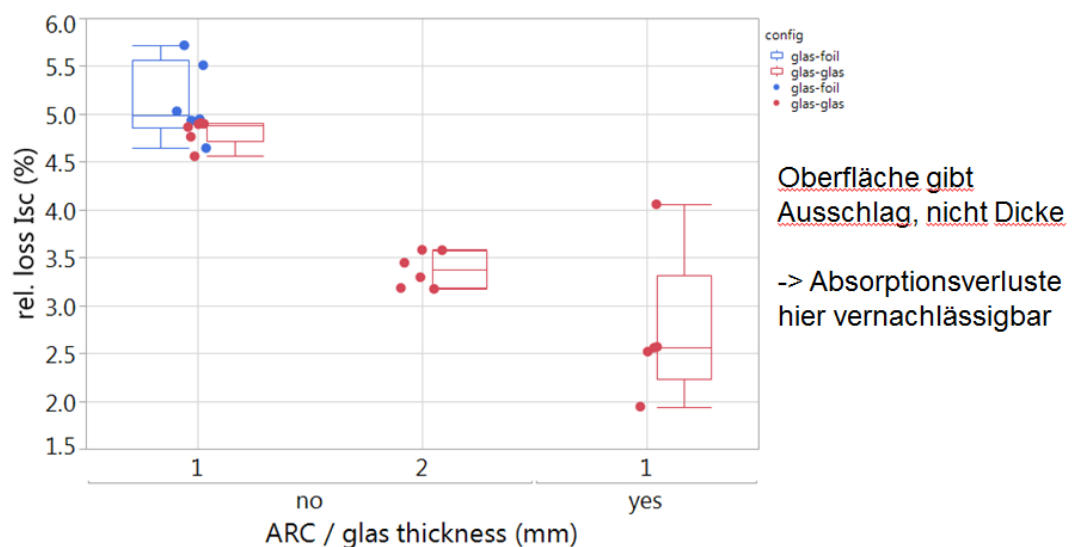


Abb. 27: CTM-Verluste von Kleinlaminaten mit verschiedenen Frontgläsern. Auffällig ist insbesondere, dass bei den Gläsern ohne ARC mit 2 mm Glas ein geringerer CTM-Verlust erreicht wird als bei Verwendung von 1 mm Glasstärke.



In Abbildung 27 werden die CTM-Verluste von Kleinlaminaten mit verschiedenen Frontgläsern gezeigt. Die Glasdicke an sich hat gemäss den Messungen nicht den entscheidenden Einfluss. So weisen die Kleinlamine ohne Antireflexbeschichtung (ARC) bei doppelt so dickem 2 mm Glas einen geringeren CTM-Verlust auf, als 1 mm Gläser. Dünnes 1 mm Glas mit ARC zeigt die geringsten CTM-Verluste. Leider ist diese Form des Glases derzeit nicht in entsprechender Grösse für 60-zellige Lamine erhältlich. Mit dem hierfür benutzten chemisch gehärteten Glas konnten die angestrebten 2 % CTM-Verlust nicht erreicht werden. Dies stellt somit kein spezifisches Problem des Modulkonzepts dar, sondern ist eine Folge der Verfügbarkeit. Zudem hat die hocheffiziente « Zebra »-Solarzelle mit Rückseitenkontakten bereits eine sehr geringe Reflexion auf Zellenebene, weswegen Einbettgewinne geringer bleiben, als bei Verwendung anderer Zelltypen.

4.3 Bifaziale, hocheffiziente « Zebra »-Solarzelle integriert im entwickelten Laminataufbau

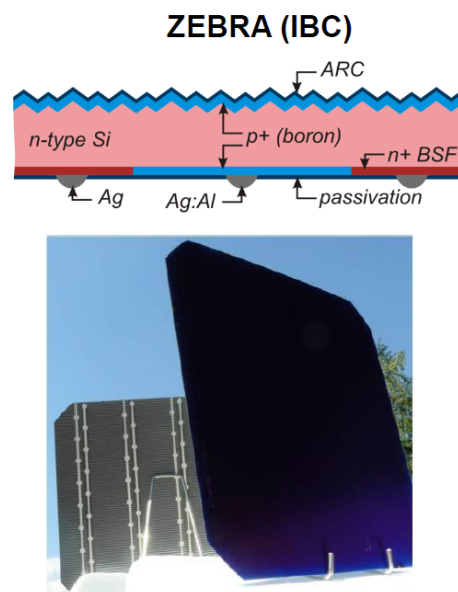


Abbildung 28: Die bifaziale « Zebra »-Solarzelle ist ein hocheffizientes n-Typ Rückkontakt Zellkonzept mit ineinandergreifenden p- und n- Kontaktbereichen (Interdigitated Back Contact, IBC).

Die am ISC Konstanz entwickelte, bifaziale « Zebra »-Solarzelle (Abbildung 28) ist ein hocheffizientes n-Typ Rückkontakt Zellkonzept mit ineinandergreifenden p- und n- Kontaktbereichen (Interdigitated Back Contact, IBC). IBC-Zellen stellen derzeit zusammen mit Heterojunction-Solarzellen die effizientesten Solarzellentypen auf dem Markt dar. Durch die Verlagerung aller Kontaktbereiche auf die Rückseite der Zelle entfallen Abschattungsverluste auf der Frontseite. Zahlreiche moderne Zellenkonzepte sind vergleichsweise einfach in bifazialer Ausführung herstellbar, was einen wesentlichen Aspekt im derzeitigen Interesse der Branche an bifazialen Modulen darstellt. Dies ist auch bei der Zebra-Zelle möglich, im Rahmen des Projekts wurden entsprechende bifaziale Zebra-Zellen hergestellt und eingesetzt. Die Zelle wird in einem kostengünstigen Siebdruckverfahren metallisiert, wobei beste Wirkungsgrade von 23.1 % erreicht werden.

Bei typischen Standardsolarzellen treten bei Abschattung der Solarzelle lokalisierte Kurzschlüsse auf, welche in einer starken Hitzeentwicklung (« Hot-Spot ») resultieren können. Die Solarzelle wird dann



in Sperrrichtung betrieben. Die Kennlinie einer typischen Solarzelle zeigt erst bei vergleichsweise hohen Spannungen > -10 V einen Durchbruch. Die lokal an den Kurzschlüssen in Wärme umgesetzte Leistung ist entsprechend hoch.

Die Zebra-Solarzelle kann bewusst so hergestellt werden, dass die Kennlinie in Sperrrichtung keine hohen Spannungen erlaubt. Somit bleibt die in Wärme umgesetzte Energie bei Betrieb in Sperrrichtung begrenzt (vgl. Abb. 29).

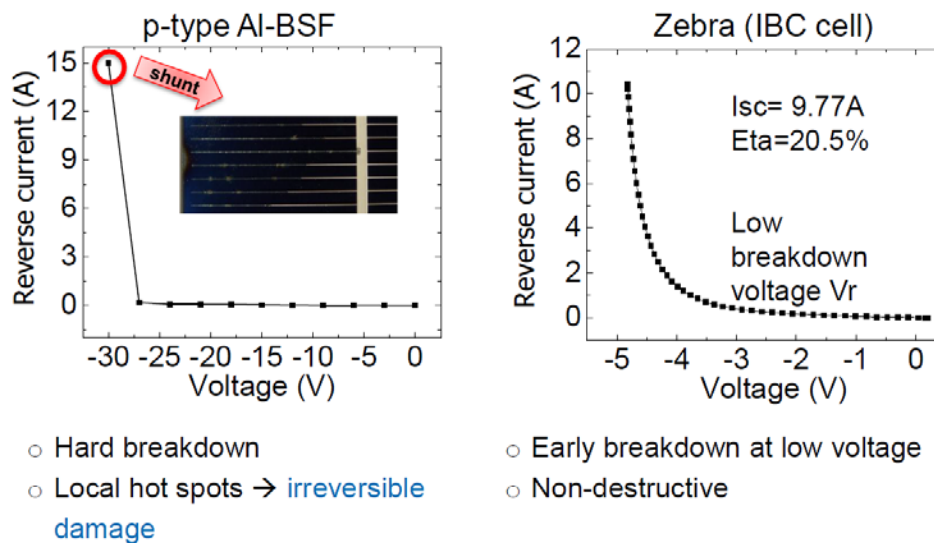


Abbildung 29: Bei typischen Standardsolarzellen treten bei Abschattung der Solarzelle lokalisierte Kurzschlüsse auf, welche in einer starken Hitzeentwicklung (« Hot-Spot ») resultieren können. Die Zebra-Solarzelle kann bewusst so hergestellt werden, dass die Kennlinie in Sperrrichtung keine hohen Spannungen erlaubt. Somit bleibt die in Wärme umgesetzte Energie bei Betrieb in Sperrrichtung begrenzt.

Die Prozessführung bei der Herstellung der Zebra-Solarzelle wurde im Rahmen des U-Light Projekts im Hinblick auf die Optimierung des Durchbruchverhaltens in Sperrrichtung optimiert. Ziel ist es insbesondere, auf Bypass-Dioden zu verzichten, um geringere Herstellungskosten der Module zu erreichen und zugleich hocheffiziente bifaziale Solarzellen einsetzen zu können. Die Herausforderung liegt darin, eine im Abschattungsfall möglichst flächige und somit verteilte Wärmeentwicklung, sowie eine kleine Durchbruchsspannung, zu erreichen. Die Zebra-Zelle wurde in Abschattungsdauertests belastet, wobei nach 9 Stunden und einem Strom von -10 A eine Wirkungsgradeinbusse von nur 0.1% beobachtet wurde, was für die Robustheit des Ansatzes spricht. Details zu Prozessführung, Abschattungsversuchen, dem Durchbruchverhalten und der Wärmeentwicklung auf Zellebene finden sich in den Projektberichten des ISC Konstanz. Da in diesem Bericht vorwiegend Tests auf Modulebene diskutiert werden, wird daher nicht nochmals darauf eingegangen.

In Abbildung 30 wird ein Outdoor-Abschattungsdauertest mit grossem 60-zelligem Modul, hier in monofacialer Modulkonfiguration, gezeigt. Im Fokus stehen potentielle Schädigungen und Leistungseinbußen bei Abschattung einzelner Zellen. Beim gezeigten Beispiel ist die Leistungsabnahme nach 48-tägigem Test kleiner $\pm 1\%$ und somit auch kleiner als die Messungenauigkeit.



Abbildung 30: Outdoor-Abschattungsdauertest mit grossem 60-zelligem Modul, hier in monofacialer Modulkonfiguration. Im Fokus stehen hier potentielle Schädigungen, Leistungseinbussen sind bei Abschattung einzelner Zellen nur schwer zu detektieren.

Die Versuche zeigten, dass durch den beschriebenen Ansatz tatsächlich die Notwendigkeit von Bypass-Dioden zur Vermeidung von Schäden umgangen werden kann. Obwohl das eigentliche Ziel somit erreicht wurde, zeigten die Versuche aber auch, dass dies nur von begrenztem Nutzen ist. Auch wenn eine Schädigung des Laminats effektiv vermieden wird, können unter ungünstigen Verschattungsbedingungen Situationen auftreten, bei welchen die Energiedissipation in Form von Wärme insgesamt höher ist, als wenn Bypass-Dioden im Modul verbaut werden. Trotz des erreichten Zieles ist somit ein Verbau von Bypass-Dioden im Modul weiter zu empfehlen (vgl. Abb. 31).

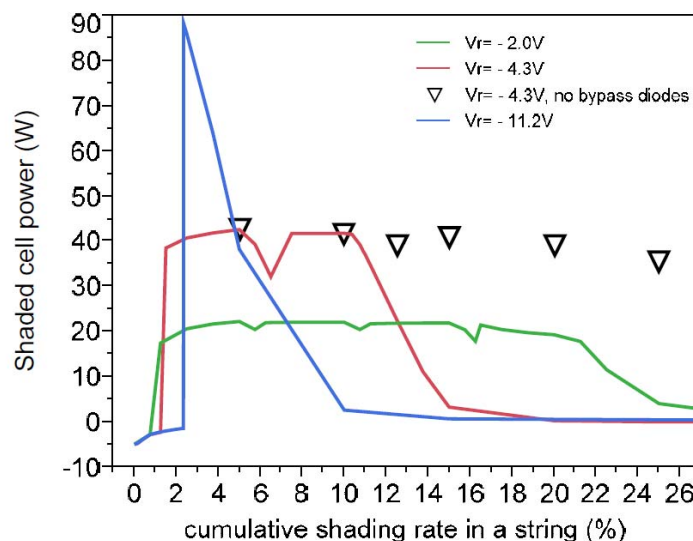


Abbildung 31: Zellen mit geringer Durchbruchsspannung weisen eine geringere maximale Energiedissipation auf welche zugleich flächig verteilt ist. Schäden im Laminat können durch den beschriebenen Ansatz vermieden werden. Trotz des somit erreichten Zieles ist ein Verbau von Bypass-Dioden im Modul weiter zu empfehlen, da bei starker Verschattung des Strings ein insgesamt höherer Energieverlust in den Zellen auftreten kann.

Am ISC Konstanz wurden mit Zebra-Zellen sowohl grossformatige Module mit dem an der ZHAW erprobten Aufbau (Glas/Glas – 0.8 mm / 0.8 mm) (Abb. 30 und 32), wie auch kleinformatige Lamine hergestellt. Die Module und Lamine wurden mit unterschiedlichen Glasdicken und Einbettmaterialien hergestellt, und durchliefen verschiedene Belastungstests. Dabei wurden insbesondere Materialien des Projektpartners Isovoltaic Solinex getestet. Wegen der Oberflächenstruktur der Zebra-Solarzellenmatrix (Abb. 32) war auch die Dickenvariation der benutzten Einbettmaterialien (EVA und



POE) von grossem Interesse. Durch den Modulaufbau sind Einbettlagen verschiedener Dicke ober- und unterhalb der Zellenmatrix möglich. Durch eine Verringerung der Dicke kann Material eingespart werden, was die Kosten reduziert, aber nur in begrenztem Umfang möglich ist.

Das in Abbildung 32 gezeigte 60-zellige Modul (Glas/Glas; je 0.8 mm Glas) mit bifazialen Zebra-Zellen hat eine frontseitig gemessene Leistung von 266 W und einen Bifazialkoeffizient $P_{\text{Rück}}/P_{\text{Front}}$ von 78 %. Durch die geringe Anzahl an zur Verfügung stehenden Zellen mussten auch weniger effektive Zellen im Modul verbaut und ein gewisser « Mismatch » in Kauf genommen werden.

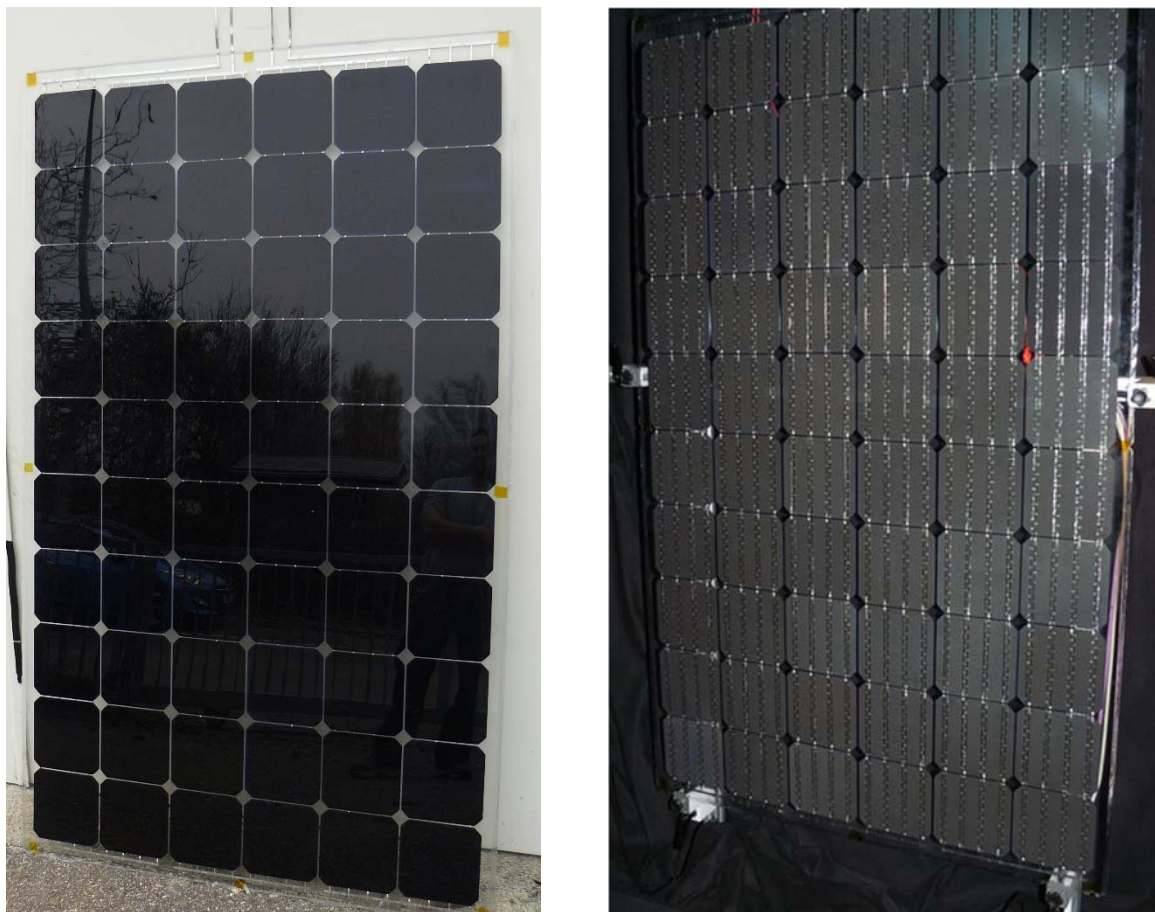


Abbildung 32: Grossformatiges Glas/Glas-Modul mit 0.8 mm / 0.8 mm Glas und bifazialen Zebra-Zellen. Das manuell verlötete Modul hat eine frontseitig gemessene Leistung von 266 W und einen Bifazialkoeffizient $P_{\text{Rück}} / P_{\text{Front}}$ von 78 %.

5 Diskussion der Ergebnisse

Im U-Light Projekt konnten neue, innovative Konzepte für die Herstellung und Montage von leichten PV-Modulen entwickelt werden. Module auf Kunststoffbasis, in Verbindung mit ETFE-Frontfolie, erreichten spezifische Gewichte von nur 2.2 kg/m². Diese blieben somit unterhalb der Zielvorgabe von 2.5 kg/m². Solche Module eignen sich vor allem für Spezialanwendungen, bei denen eine Hagelbeständigkeit nicht gefordert wird. Beispiel hierfür wären Faltdächer [DHP_2018] oder mobile Anwendungen. Die geringe Steifigkeit der kunststoffbasierten Module erforderte die Entwicklung von



Lösungen, welche das Laminat flächig stützen. Eine einfache Lösung bestünde im Einsatz ebener Platten, was jedoch aus Gewichtsgründen nicht sinnvoll ist. Daher wurden gitterartige Strukturen konstruiert, welche teilweise in ähnlicher oder gleicher Form auch bei Glas/Glas- und Glas/Backsheet-Modulen angewandt werden konnten.

Gitterstrukturen auf der Front- und Rückseite ermöglichen bifaziale Anwendungen sowie einen symmetrischen Aufbau, welcher die mechanische Belastung der Zellen reduziert. Entsprechende Modelle wurden aufgebaut, die Trägerstrukturen wurden dabei in einem 3D-Drucker hergestellt und genügen vom Material her noch nicht den Anforderungen im realen Einsatz. Rückseitige Gitterstrukturen wurden bei den Modulen mit dünnem Glas ausgiebig getestet. Es zeigte sich, dass bei diesem Ansatz die Steifigkeit des Laminats für die Durchbiegung des Gesamtsystems praktisch keine Rolle spielt. Daher können die gleichen Strukturen auch für Kunststoffmodule eingesetzt werden. Je nach der zu erwartenden Belastung bei potenziellen Anwendungen kann die Laminatsteifigkeit der Kunststoffmodule entsprechend angepasst werden, um Schäden in den nicht unterstützten Bereichen zu vermeiden. Bei dem Konzept mit einer rückseitigen GFK-Platte als Träger kann dies einfach über eine Anpassung der Materialdicke erfolgen.

Bei den Kunststoffmodulen konnten alle Projektvorgaben, bis auf den Zielwert für den CTM-Verlust von $< 4\%$, erreicht werden. Durch weitere Optimierung, insbesondere der Verbindungstechnologie (z.B. Wechsel auf « Smart-Wire »), könnte in diesem Punkt eine Verbesserung erreicht werden. Andererseits fehlt, bei der ansonsten gut geeigneten ETFE-Folie im Vergleich zu typischem Solarglas, die Antireflexbeschichtung. Somit wird bei ansonsten vergleichbarem Aufbau ein gewisser Nachteil gegenüber Modulen mit frontseitigem Solarglas bestehen bleiben, was aber kein zentrales Problem darstellt.

Bei den konventioneller aufgebauten Glas/Backsheet-Modulen konnte ein 60-Zellen Modul mit einem Gewicht von nur 6.3 kg inklusive der rückseitigen Träger realisiert werden. Dies entspricht einem spezifischen Gewicht von nur 3.9 kg/m^2 , was deutlich unter dem Zielwert von 12 kg/m^2 liegt. Dies ist unseres Wissens nach das leichteste 60-Zellen Modul auf c-Si Basis, welches jemals gebaut wurde. Ein solches Modul mit einer Glasstärke von nur 0.8 mm ist mechanisch jedoch, ohne die Verbindung der Träger mit einer geeigneten Unterkonstruktion, nicht steif genug. Im Rahmen des Projektes wurde daher eine Unterkonstruktion entwickelt, die es ermöglicht, ultraleichte Glas/Backsheet- und Glas/Glas-Module, ohne Einbussen bei der Stabilität gegenüber heutigen Standardsystemen, aufzuständern. Ein Systemgewicht von 17.4 kg, bestehend aus dem 60-Zellen Modul mit der entsprechenden Unterkonstruktion, wurde erzielt. Das Systemgewicht könnte durch Optimierung der Unterkonstruktion, ohne Verringerung der mechanischen Stabilität, auf 14 kg (spezifisches Gewicht von nur 8.8 kg/m^2) reduziert werden [EUPVSEC_2017].

Die Vorteile des vorgestellten Konzeptes sind ein geringeres Systemgewicht, ein unveränderter Laminataufbau im Vergleich zu derzeitigen Standardmodulen und eine hohe Packungsdichte beim Transport, was zu einer Kostenreduktion bei den Transportkosten führt.

Durch den konventionellen Modulaufbau sind die bisherigen Erkenntnisse und Erfahrungen in Bezug auf die Langzeitstabilität von Standardmodulen einfach zu übertragen. Letzteres ist in Hinblick auf eine mögliche industrielle Umsetzung des Konzeptes wichtig. Ein Kosteneinsparungspotenzial gegenüber dem Stand der Technik bei Projektbeginn kann nur in Verbindung mit geringeren Transportkosten, in Kombination mit der Unterkonstruktion und vor allem für eine bifaziale Ausführung dargestellt werden. Abhängig von der Auslegung kann mit bifazialen Systemen ein bifazialer Gewinn im Bereich von 5-30 % erreicht werden [IET_2018]. Der derzeit erreichbare Wp-Preis liegt, aufgrund der sehr hohen Glaskosten, allerdings deutlich höher als bei heutigen Standardmodulen. Ein Kosteneinsparungspotenzial bei dünnem Glas gegenüber dem Standard ist derzeit nicht gegeben. Die Versuche im Projekt wurden im Wesentlichen mit chemisch gehärtetem Glas durchgeführt. Die



ursprünglich im Projekt vorgesehene Glasentwicklung konnte durch den Wegfall des Partners Vetro Solar nicht durchgeführt werden. Aus einem parallel laufenden solar-era.net Projekt [SEN_2016] konnten leider keine Gläser bezogen werden. Die Herstellung von kostengünstigem, dünnem Solarglas, mit deutlich unter 2 mm Dicke, bleibt weiterhin eine Herausforderung.

6 Schlussfolgerungen

Im Rahmen des Projekts konnten relevante Ergebnisse im Bereich der Leichtbaumodule erzielt werden. Mehrere Firmen zeigten Interesse und sogar das Photon-Magazin hat den auf der EUPVSEC präsentierten Ergebnissen einen Beitrag gewidmet [Photon_2016].

Eine Umsetzung in die Praxis ist, trotz des prinzipiellen Interesses auch von Schweizer Firmen, bisher nicht erfolgt. Dies liegt neben dem derzeit deutlich höheren Preis für dünnes Solarglas daran, dass der Anteil von Gebäuden mit geringen statischen Reserven in der Schweiz und generell in Europa eher gering ist. Dennoch wird der Markt der Leichtbaumodule auch derzeit adressiert. Die Vor- und Nachteile der jeweiligen Produkte hängen dabei von der angestrebten Anwendung ab. Vergleicht man beispielsweise die im Projekt entwickelten Glas/Backsheet-Module mit den kunststoffbasierten Modulen von DAS Energy [DAS_2017], sind die Gewichte recht ähnlich. Das Glas/Backsheet-Modul hat dabei den Vorteil, dass bereits jahrzehntelange Erfahrung hinsichtlich der Langzeitstabilität des Modulkonzepts vorliegt. Es ist andererseits aber weniger für ein ebenes Auslegen auf Flachdächern geeignet.

Ohne die internationale Zusammenarbeit im Rahmen des solar-era.net Programms wären die Ergebnisse nicht möglich gewesen. Die Projektpartner sind in Österreich (Solinex Isovoltaic, PCCL) und Deutschland (ISC Konstanz) angesiedelt. Jeder der Partner brachte spezifisches Know-how und Equipment mit. Das Arbeitspaket welches primär der Modulentwicklung gewidmet war stand in der Verantwortung der ZHAW. Über Solinex Isovoltaic erhielten wir transparente Backsheets und GFK-Material zum Aufbau glasfreier, ultraleichter Lamine. Das PCCL und auch Solinex Isovoltaic unterstützen uns mit wertvollen Informationen zum Themenbereich Kunststoffe und allgemeiner Materialtests. In der frühen Projektphase wurde ein für uns sehr wichtiger zweitägiger Workshop bei den österreichischen Projektpartnern abgehalten, bei welchem ein Screening unserer Ansätze und unserer Materialauswahl zusammen mit den Experten dort durchgeführt wurde. Seitdem unterstützte uns das PCCL bei allen Fragestellungen zu Kunststoffen. Am ISC Konstanz konnten wir Lamine mit dort produzierten Solarzellen herstellen. Die Infrastruktur des ISC war in mehrerlei nützlich, beispielsweise bei der Leistungsmessung der Zellen und Kleinlamine, der Bestimmung des CTM-Verlustes, aber auch bei Outdoor- und Flasher-Messungen von Modulen.

Durch die Arbeiten im Projekt und die Kooperation konnte das Know-how an der ZHAW erheblich gesteigert werden. Zudem wurde der Bekanntheitsgrad der ZHAW PV-Aktivitäten im In- und Ausland bedeutend erhöht und Industrikontakte intensiviert. Weiter konnten Aktivitäten der Forschung und Förderung im Bereich PV in der Schweiz im internationalen Umfeld mit guter Rückmeldung präsentiert und publiziert werden.

7 Ausblick

Das Interesse der PV-Community und der Industrie an den Dünnglas-Leichtbausystemen ist ambivalent. Die Präsentationen der Resultate und Entwicklungen [EUPVSEC_2017] [EUPVSEC_2016] stiessen auf grosse Resonanz und wurden auch in einem Artikel in der



Fachzeitschrift Photon [Photon_2016] vorgestellt. Mehrere Firmen zeigten sich interessiert, dennoch wird der Markt für entsprechende Lösungen als zu gering angesehen, um eine grössere Aktivität der Industrie zu motivieren. Der höhere Preis des extrem dünnen, chemisch gehärteten Glases der Dicke 0.8 mm und 1.1 mm ist in dieser Hinsicht nicht förderlich. Hinzu kommt, dass dieses Material in der Zwischenzeit nicht mehr erhältlich ist. Aufgrund des Ausscheidens von Vetro Solar konnte im Projekt, entgegen der ursprünglichen Planung, keine Glasentwicklung erfolgen. Versuche mit kostengünstigerem thermisch gehärtetem Glas (1.6 mm, Hersteller: LiSEC) wurden durchgeführt. Jedoch ist der Dicken- und Gewichtsunterschied in diesem Fall, im Vergleich zu standardmässig erhältlichem 2 mm Glas, gering. Bei dem solar-era.net Treffen in Düsseldorf (2016) konnte Kontakt mit der Arbeitsgruppe eines parallel laufenden Projekts aufgenommen werden, welches auf thermisch gehärtetes Solarglas mit 1 mm Dicke abzielt. Während der Projektlaufzeit scheint es jedoch nicht zu einer Umsetzung der Projektziele gekommen zu sein, zumindest blieben wiederholte Nachfragen nach Proben erfolglos.

Für glasfreie Lamine sind besonders die Vorgaben des Hageltests herausfordernd. Der österreichische GFK-Spezialist und Flugzeugbauer DAS hat nach langer Entwicklungsarbeit ein gemäss der IEC-Norm zertifiziertes Laminat auf den Markt gebracht, das sich, in Hinblick auf das spezifische Gewicht, nicht stark von unseren Dünnglaslaminaten unterscheidet. Der Anwendungsbereich der von uns entwickelten glasfreien Ansätze beschränkt sich aus unserer Sicht primär auf Sonderanwendungen, bei welchen Hagel keine Rolle spielt. Ein Beispiel wären Faltdachanwendungen, wie sie von der Firma DHP realisiert werden. Mit DHP besteht Kontakt und eine gemeinsame Projektarbeit wurde bereits 2017 durchgeführt.

Auch wenn die gegenwärtige Marktsituation und die fehlende Verfügbarkeit von kostengünstigem, dünnen Solarglas die direkte Umsetzung verhindern, können die entwickelten Konzepte für entsprechende Anwendungen zum Einsatz kommen, falls sich die Voraussetzungen ändern.



8 Publikationen

- EUPVSEC_2016 Small Unit Compound Modules: A New Approach for Light Weight PV Modules, Proc. 32nd EUPVSEC, Munich, p. 56-60, H. Nussbaumer, M. Klenk, N. Keller, 2016.
- EUPVSEC_2017 Record-Light Weight c-Si Modules Based on the Small Unit Compound Approach – Mechanical Load Tests and General Results, Proc. 33rd EUPVSEC, Amsterdam, p. 146–150, H. Nussbaumer, M. Klenk, N. Keller, J. Turnheer, P. Ammann, 2017.
- EUPVSEC_2017b Investigation of Effects Due to Encapsulation Thickness Reduction in Light-Weight Modules, Proc. 33rd EUPVSEC, Amsterdam, p. 25-29, G. Oreski; A. Halm, V. Schenk; W. Krumlacher; H. Nussbaumer, 2017.



9 Referenzen

- AE_2012 A comparison of 15 polymers for application in photovoltaic modules in PV-powered boats, *Applied Energy*, vol. 92, pp. 286–297, T. Gorter, A. H. M. E. Reinders, Apr. 2012.
- DAS_2017 Flexibles Modul, DAS Energy, [Online] <http://www.das-energy.com/de/flexibles-modul/>.
- DHP_2018 dhp technology, [Online] <http://www.dhp-technology.ch/>.
- EB_2008 w&s_Solarzellenverkapselung_für_Polycarbonatmodule, E. Bittmann, 2008. [Online] <https://www.google.de/#q=bittmann+polycarbonat+solar>.
- EPFL_2008 Ultra-Light Photovoltaic Composite Sandwich Structures, Dissertation, ÉCOLE POLYTECHNIQUE FÉDÉRALE DE LAUSANNE, Lausanne, J. Rion, 2008.
- EUPVSEC_2013 Vertical Facade Integration of Bifacial PV Modules Outdoor Testing & Optical Modelling, *Proc. 28th EUPVSEC*, p. 3216–3221, Paris, B. Soria, E. Gerritsen, 2013.
- EUPVSEC_2016 Small Unit Compound Modules: A New Approach for Light Weight PV Modules, *Proc. 32nd EUPVSEC*, Munich, p. 56-60, H. Nussbaumer, M. Klenk, N. Keller, 2016.
- EUPVSEC_2017 Record-Light Weight c-Si Modules Based on the Small Unit Compound Approach – Mechanical Load Tests and General Results, *Proc 33rd EUPVSEC*, Amsterdam, p. 146–150, H. Nussbaumer, M. Klenk, N. Keller, J. Turnheer, P. Ammann, 2017.
- Evonik_2013 Evonik Plexiglas for Solar-Applications-en.pdf. [Online]. <https://www.plexiglas.net/sites/lists/pm/documentsap/511-4-solar-applications-en.pdf>
- FIRB_2015 Technologieentwicklung leichter, flexibler Photovoltaikmodule auf der Basis von ETFE und CIGS-Foliensolarzellen für die Architektur, *Fraunhofer IRB Verlag*, B. Weller, 2015.
- IET_2018 Bifacial Photovoltaics: Technology, applications and economics. Institution Of Engineering And Technology, IET, ISBN 978-1-78561-274-9, R. Kopecek, J. Libal 2018.
- JFC_2004 Fluoropolymer films in the photovoltaic industry, *Journal of Fluorine Chemistry*, vol. 125, no. 8, pp. 1255–1257, M. DeBergalim, 2004.
- KFI_2012 Kunststoffchemie für Ingenieure, *Carl Hanser Verlag*, W. Kaiser, 2011.
- Mage_2011 MAGE SUNOVATION präsentiert Solar-Designcarport auf der IAA, 2011. [Online] <http://www.solarserver.de/solar-magazin/nachrichten/archiv-2011/2011/kw38/mage-sunovation-praesentiert-solar-designcarport-auf-der-iaa.html>.
- MRW_2013 Hail Impact Testing on Crystalline Si Modules with Flexible Packaging, presented at the PV Module Reliability Workshop, Golden, Colorado, M. Brown, 2013.
- NOV_2018 NOWOFLON ET, [Online] <https://www.nowofol.de/produkte/folien-aus-fluoropolymeren/nowoflon-et-solarenergie>.



Patent_1996	996 Patent Polyether Polyurethan Solarmodul, DE000019514908C1, I. Vaverka, K. Bröring, U. Gelderie, G. Mattes, [Online] https://register.dpma.de/DPMAREgister/pat/PatSchrifteneinsicht?docId=DE19514908C1
Photon_2016	Gitter statt Rahmen, Photon, No.10 / 2016, p. 32, A. Kreutzmann, 2016.
Renusol_2018	PV auf Trapezblech & Wellblech mit MS+, Renusol Europe GmbH. [Online] https://www.renusol.com/de/pv-montagesysteme/pv-auf-trapezblech-wellblech-mit-ms.html .
SEN_2016	LIMES Light Innovative Materials for Enhanced Solar Efficiency, Parisa Sehati, solar-era.net-meeting, Düsseldorf, 2016. [Online] http://www.solar-era.net/files/4614/5743/2323/005_LIMES_Sehati.pdf .
SUN_2018	Sunware, [Online] https://de.sunware.solar/produkte/index .
Tritec_2018	Tritec Montagesysteme TRI-FAST, Tritec. [Online] https://www.tritec.ch/photovoltaik/montagesysteme/tri-fast/ .

10 Anhänge

10.1 Anhang 1: Photon Artikel

Forschung & Technik
Leichtbaumodule
II

Gitter statt Rahmen

Die Schweizer Hochschule ZHAW arbeitet an einem Konzept für besonders leichte Module

Ein handelsübliches 300-Watt-Modul wiegt heute über 20 Kilogramm – und ist damit für viele Anwendungen zu schwer. In dem Ende 2015 gestarteten Forschungsprojekt »U-Light« sollen deshalb Module entwickelt werden, die nur ein Zehntel davon auf die Waage bringen. Hartmut Nussbaumer von der am Projekt beteiligten Zürcher Hochschule ZHAW hat jetzt eine erste Idee präsentiert, wie solche Leichtgewichte aussehen könnten: Seine »SUC«-Module verzichten auf Glas und Rahmen.

Bis zu zehnmal leichter als konventionelle Module sollen sie werden: Solarmodule mit dieser Eigenschaft will das IEFÉ zusammen mit Partnern bis in drei Jahren entwickeln« hieß es Anfang des Jahres in einer Mitteilung der Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften (ZHAW) zum Start des Forschungsprojekts »U-Light – Ultra lightweight PV modules«, also superleichte Solarmodule. An dem Projekt, das noch bis Oktober 2018 läuft, sind neben dem Institut für Energiesysteme und Fluid-Engineering (IEFE) der ZHAW noch der österreichische Folienhersteller Isovoltaic beteiligt sowie das ISC Konstanz und das Polymer Competence Center Leoben aus Österreich, das im Bereich Kunststofftechnik und Polymerwissenschaften forscht. Aus dem Topf des europäischen Förderprogramms »Solar.era.net« erhält »U-Light« 789.000 Euro.

Heutige Module mit 60 Zellen wiegen rund 18 bis 22 Kilogramm, Module mit 72 Zellen 22 bis 26 Kilogramm – mithin rund 12,5 Kilogramm je Quadratmeter. Das Gewicht wird vor allem durch die Dicke der Frontglasscheibe (und bei Glas-Glas-Modulen auch der rückseitigen



Hartmut Nussbaumer von der Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften zeigt den Prototyp eines neuen Leichtbaumoduls

Glasscheibe) sowie den Aluminiumrahmen bestimmt. Ein Modul, das nur noch ein Zehntel des Gewichts eines heutigen Standardmoduls haben soll, muss also auf beides verzichten. Ansätze hierzu gab es in der Vergangenheit bereits zahlreich, teilweise bis zum fertigen Produkt entwickelt. Ein Beispiel sind die ausrollbaren Dünnschichtmodule auf Folienbasis, wie sie vom Hersteller United Solar schon vor 15 Jahren entwickelt wurden. Durchsetzen konnten sie sich jedoch nicht, was auch an den sehr geringen Wirkungsgraden der Module auf Basis amorphen Siliziums lag.

Doch es gab auch Ansätze mit kristallinen Zellen, darunter ein Leichtbaumodul von Schott Solar, welches das Unternehmen 2011 präsentierte (PHOTON 7-2011). Eine Wabenplatte auf Basis von Pappe ersetzte hier die Rückseitenfolie. Durch die höhere mechanische Steifigkeit konnte der Rahmen entfallen und das Frontglas dünner ausfallen. Das Modul wog rund 40 Prozent weniger als ein normales 240-Watt-Modul desselben Herstellers. Die Idee, auch die Frontglasscheibe durch ein alternatives Material zu ersetzen, wurde nicht mehr umgesetzt.

Einen ähnlichen Grundgedanken wie Schott verfolgt nun auch Hartmut Nussbaumer vom IEFÉ: »Der äußere Rahmen wird durch ein Gitter ersetzt. Die mechanischen Anforderungen an die Zwischenbereiche sinken«, erläuterte Nussbaumer bei der Europäischen Photovoltaikkonferenz und Messer EU PVSEC Ende Juni in München. Statt einer wabenförmigen Struktur arbeitet er an Streben zwischen den Zellen, die das Modul in kleine Einheiten in der Größe einer einzelnen Zelle unterteilen. In seinen »Small Unit Compounds (SUC)«-Modulen sieht er ein Mittelding zwischen heutigen Standardmodulen mit umlaufenden Aluminiumrahmen und dem Ansatz mit rückseitiger Wabenplatte.

Die Streben können nach Angaben von Nussbaumer aus Aluminium oder Kunststoff bestehen und unterhalb des Moduls oder auch beidseitig angebracht werden. Letzteres hat den Vorteil, dass sich die Zellen dann in der sogenannten »neutralen Faser« befinden, sie werden also bei einem Verbiegen des Gesamtverbunds nicht belastet.

Auf der EU PVSEC präsentierte Nussbaumer einen Prototyp aus vier Zellen mit einem weißen Kunststoffgitter. Statt in Glas sind die Solarzellen in Kunststofffolien eingeschlossen. Da sich das Gitter über das Laminat erhebt, müssen die Abstände zwischen den Zellen etwas größer ausfallen, um Verschattungen zu verhindern. Zudem kann sich Schmutz in den Kanten sammeln, weshalb Nussbaumer eine weitere Folie als Abdeckung untersuchen will. Ein solches Modul könnte am Ende wenige als 6,5 Kilogramm je Quadratmeter wiegen, also das Gewicht im Vergleich zu heutigen Standardmodulen halbieren. Bis zum angestrebten Ziel von 90 Prozent leichteren Modulen ist es dann zwar noch ein weiter Weg, das Projekt endet aber auch erst im Oktober 2018. Und schon ein Modul mit halbem Gewicht dürfte das eine oder andere derzeit noch ungenutzte Dach für Photovoltaikanlagen erschließen.

Anne Kreutzmann

32
Photon Oktober 2016