

CIGS-MODULE BRINGEN PHOTOVOLTAIK IN FORM

Photovoltaik-Module auf der Basis von kristallinem Silizium haben in den letzten Jahren ganz massgeblich zur starken Verbreitung der Solarenergie beigetragen. Doch es sind im Bereich der Photovoltaik (PV) eine Reihe weiterer Technologien in Entwicklung bzw. am Markt, die sich für spezielle Anwendungen empfehlen. Eine davon sind die CIGS-Module. Vor rund 15 Jahren haben Forscher der ETH Zürich und der Empa das Konzept eines sehr effizienten und biegsamen CIGS-Moduls vorgelegt. Nach einer herausfordernden Entwicklungszeit erreichen diese CIGS-Module jetzt den Markt.



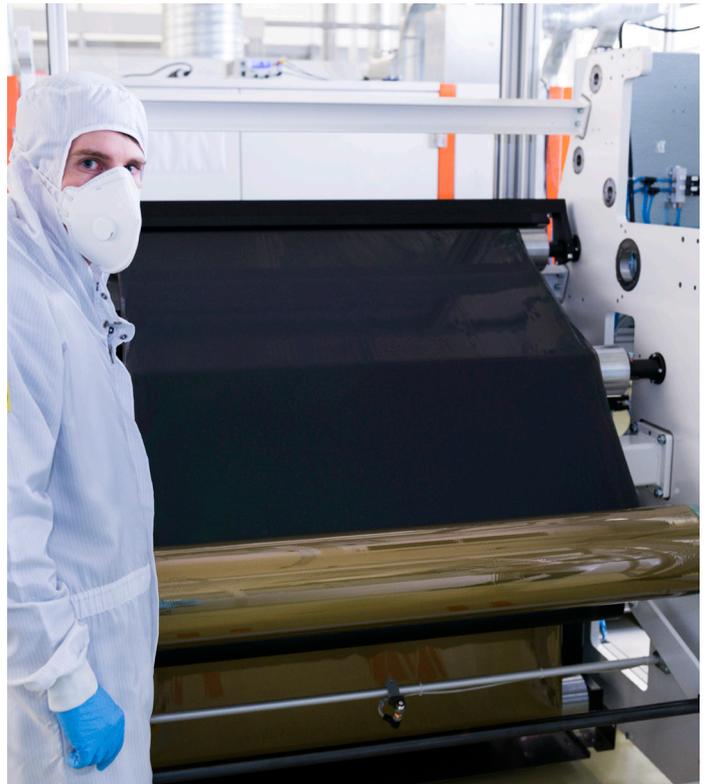
CIGS-Module bestehen aus einer Kunststoffolie (Polymer), die in mehreren Prozessschritten mit photoaktiven Materialien beschichtet wird.
Foto: Flisom

Wenn heute von PV-Modulen die Rede ist, sind in der Regel Module auf der Grundlage von Zellen aus kristallinem Silizium gemeint. Diese mono- oder polykristallinen Silizium-Module beherrschen den Weltmarkt; sie haben aufgrund stark sinkender Preise den Aufschwung der Photovoltaik in den letzten 25 Jahren möglich gemacht. Doch die Photovoltaik ist noch längst nicht am Endpunkt ihrer technologischen Entwicklung angelangt. Wissenschaftler tüfteln in Laboren an neuen Technologien, um die Energiegewinnung aus Sonnenstrahlung noch leistungsfähiger, noch anwendungsfreundlicher und noch günstiger zu machen.

Zu den Herausforderern der klassischen Siliziummodule gehört seit längerem die Klasse der Dünnschichtmodule. Sie tragen diesen Namen, weil die photoaktive Schicht rund 100 mal dünner ist als bei den Zellen aus kristallinem Silizium. Dünnschichtzellen verwenden verschiedene Halbleiter-Materialien: nicht-kristallines (amorphes) Silizium, Cadmium-Tellurid (bekannt vom US-amerikanischen Hersteller First Solar) oder Kupfer-Indium-Gallium-Diselenid (Cu(In,Ga)Se_2). Die Module aus der zuletzt genannten Legierung werden in Anspielung auf die verwendeten Halbleitermaterialien kurz CIGS-Solarmodule genannt. Als im vorigen Jahrzehnt die Silizium-Herstellung zeitweilig die hohe Nachfrage nicht mehr bedienen konnte, erlebten Dünnschichtmodule einen Aufschwung und erlangten einen Marktanteil von rund 15%. Bis heute behaupten sich diese Module am Markt: Sie haben mit 6 bis 16% zwar einen tieferen Wirkungsgrad als Module aus kristallinem Silizium (15 bis 20%), bringen gute Energieerträge aber auch bei diffusem Licht, wiegen weniger und sind potenziell günstiger in der Herstellung.

Neue Anwendungsfelder

CIGS-Module werden heute von etlichen US-amerikanischen Firmen hergestellt, aber beispielsweise auch von der deutschen Firma AVANCIS (Torgau/Sachsen), die seit 2014 zum chinesischen Baustoff- und Glaskonzern CNBM gehört, oder vom japanischen Unternehmen Solar Frontier. Meistens wird die CIGS-Absorberschicht, die das Sonnenlicht aufnimmt und in elektrischen Strom umwandelt, auf einer festen Trägerschicht (Substrat) aus Glas aufgebracht. Doch Dünnschichtzellen lassen sich auch auf flexiblen Kunststoffsubstraten abscheiden. Dann entstehen biegbare PV-Module. CIGS-Module sind mit 1,5 bis 4 kg/m^2 gegenüber 10 bis 12 kg/m^2 von glasbedeckten Silizium-Modulen vergleichsweise leicht. In der Optik zeichnen sie sich durch eine homogene schwarze Oberfläche aus. Beide Eigenschaften empfehlen die Module



Flisom produziert seine Solarmodule mit einem Rolle-zu-Rolle-Verfahren. Das heisst, bei jedem Prozessschritt wird die ein Meter breite Substratbahn aus Polymer abgerollt, bearbeitet und dann wieder aufgerollt. Foto: Flisom

für gebäudeintegrierte Anwendungen einschliesslich Leichtbaudächern. Möglich sind ferner Spezialanwendungen etwa in der Luft- und Raumfahrt oder im Auto- und Schiffsbau. CIGS-Module haben damit das Potenzial, der Photovoltaik neue Anwendungsfelder zu erschliessen.

Bei den biegsamen CIGS-Modulen möchte die Schweizer Industrie nun ein Wörtchen mitreden. Die Grundlage für die Innovation legte die langjährige Forschungsarbeit von Dr. Ayodhya N. Tiwari an der Eidgenössischen Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (Empa) in Dübendorf. Der Leiter des Empa-Labors für Dünnschicht und Photovoltaik hält seit 2013 den Weltrekord beim Wirkungsgrad der Energieumwandlung einer flexiblen CIGS-Solarzelle (20.4%). Bereits 2005 gründete Tiwari die Firma Flisom (kurz für: <Flexible Solar modules>). Das Spin-off der ETH Zürich hat in jahrelanger Arbeit schrittweise ein kostengünstiges Herstellungsverfahren für CIGS-Solarmodule auf einer flexiblen Kunststoffolie entwickelt. 2009 wurde bei der Empa eine erste Pilotanlage eröffnet. Seit Herbst 2015 entstand in Niederhasli (ZH) für rund 20 Mio. Fr. eine Produktionsanlage, die erste ihrer Art welt-



Seit 2015 entstand in Niederhasli (ZH) eine Produktionsanlage für CIGS-Module, mit der Flisom inzwischen marktreife Solarmodule herstellt.
Foto: Flisom

weit, welche mit Unterstützung des Bundesamts für Energie im Rahmen des P+D-Programms erstmalig erprobt und seither so optimiert wurde, dass sie inzwischen marktreife CIGS-Solarmodule herstellt. Im Herbst 2017 ging ferner eine 30-kW-PV-Anlage mit solchen Modulen auf dem Empa-Campus in Betrieb.

Erst beschichtet, dann zugeschnitten und verarbeitet

Wer die Flisom-Produktionsanlage im Gewerbegebiet von Niederhasli besuchen will, muss einen weissen Overall anziehen und blaue Plastikschuhe überstreifen. Der Weg in die Produktionshalle führt durch eine Schleuse. «Wir fertigen zwar nicht in einem Reinraum, aber wir wollen die Produktionshalle möglichst von Staub freihalten», erklärt Ulfert Rühle, ein an der Universität Stuttgart ausgebildeter Elektroingenieur, der seit über 20 Jahren mit Dünnschichtzellen arbeitet und heute bei Flisom den Bereich Business and Product Development verantwortet. Rühle führt den Journalisten zu einer Glaswand, hinter der eine raumhohe Produktionsmaschine steht, die Flisom selber gebaut hat. Hier erfolgt ein Hauptschritt der Produktion: Im Vakuum werden die gasförmigen

Halbleitermaterialien Kupfer, Indium, Gallium und Selen auf die biegsame Trägerschicht aufgedampft. Es ist einer von sechs Produktionsschritten zur Beschichtung der Module (vgl. Textbox S. 4). In jedem Prozessschritt wird die ein Meter breite Substratbahn aus Polymer abgerollt, bearbeitet und dann wieder aufgerollt («Rolle-zu-Rolle-Verfahren»).

Im hinteren Teil der Produktionshalle werden aus den auf 37 mal 74 cm Fläche zugeschnittenen Modul-Rohlingen («Submodule») die CIGS-Module gefertigt: die Ränder werden beschritten, die Submodule zu grösseren Einheiten verbunden, die Kontaktbänder angebracht, Laminier- und Frontfolien aufgebracht, schliesslich die Anschlussdose befestigt. Die Arbeiterinnen tragen ein Haarnetz und schwarze Handschuhe. «Hier ist noch viel Handarbeit gefragt, denn bei der gegenwärtigen Produktionsmenge wäre eine vollautomatische Fertigung noch zu teuer», sagt Ulfert Rühle. Am Ende der Produktionsstrasse in der Qualitätsprüfung leuchten Blitze auf. Im Sonnensimulator und der Klimakammer werden die Module auf ihre Zuverlässigkeit geprüft. In der Produktionshalle herrscht emsiges Treiben. Flisom arbeitet gerade an einem grösseren Auftrag für ein denkmalgeschütztes Gebäu-

DIE ZELLEN MÜSSEN NICHT EINZELN VERSCHALTET WERDEN

CIGS-Solarmodule wandeln wie andere Solarmodule Sonnenlicht in Strom um. Bei CIGS-Modulen wird das Sonnenlicht durch eine 1 bis 2 Mikrometer dicke Schicht aus den Halbleitermetallen Kupfer, Indium, Gallium und Selen aufgenommen. Dabei werden Ladungsträger frei. Sie formieren sich zu elektrischem Strom, der von der Zinkoxidschicht (positiver Pol/Frontkontakt) durch die CIGS-Halbleitermaterialien zur Molybdän-Schicht (negativer Pol/Rückkontakt) fließt.

Um ein CIGS-Modul herzustellen, wird eine Kunststoffolie (Polymer) in mehreren Prozessschritten beschichtet: Erstens wird das Molybdän auf einer 1 m breiten und mehrere Hundert Meter langen Folie durch einen Sputterprozess aufgebracht. Zweitens werden mit einem Laser elektrisch isolierende Strukturierungslinien ins Molybdän eingearbeitet. Damit wird eine serielle Verschaltung von Streifenzellen auf dem Substrat durchgeführt, wodurch die aufwändige Verschaltung von Einzelzellen entfällt (monolithische Verschaltung). Drittens wird die Absorberschicht aus Kupfer, Indium, Gallium und Selen aufgedampft. Viertens wird eine Buffer-Schicht in einem nass-chemischen Prozess aufgebracht. Fünftens wird die Zinkoxid-Schicht aufgetragen. Sechstens wird per Laser der Frontkontakt aus Zinkoxid stellenweise abgetragen, um den Stromfluss in die richtigen Bahnen zu lenken. Jetzt liegen die Modul-Rohlinge (Submodule) vor, die im hinteren Teil der Produktionshalle zu den fertigen Modulen verarbeitet werden.

Flisom benutzt für die oben genannten sechs Prozessschritte ein Rolle-zu-Rolle-Verfahren. Das heisst, bei jedem Prozessschritt wird das Substrat abgerollt, bearbeitet und dann wieder aufgerollt. Das Flisom-Herstellungsverfahren unterscheidet sich von anderen Verfahren zur Herstellung von flexiblen CIGS-Zellen durch die monolithische Verschaltung und den Einsatz einer Polymerfolie als Substrat. Bei der monolithischen Verschaltung der Einzelzellen zum Modul wird im Herstellungsprozess die Vorderseite einer Zelle direkt mit der Rückseite der nächsten Zelle in einer Serienschaltung verbunden. Das erspart zusätzliche metallische Verbindungen, wie sie bei kristallinen Siliziumsolarzellen nötig sind. Damit ist die Technologie kosteneffizienter zu automatisieren und variabler in der Produktgestaltung. BV

de in Holland. Auf 2000 m² Fläche kommen die formbaren CIGS-Module zum Einsatz, da sie sich der Wölbung des Tonnendachs anpassen.

Wirkungsgrad weiter erhöhen

In der Produktionsanlage in Niederhasli könnten die 65 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter von Flisom jährlich CIGS-Module mit einer Gesamtleistung von 15 MW herstellen. Diese Menge reicht aus, um 3750 Vier-Personen-Haushalte mit Strom zu versorgen. Noch ist diese Produktionskapazität nicht ausgeschöpft. In den letzten zwei Jahren ging es vielmehr darum, Kinderkrankheiten, wie sie bei jeder Anlage dieser Art vorkommen, auszumerzen, und die Produktion schrittweise zu optimieren. So wurden beispielsweise die Herstellungsprozesse so verbessert, dass die Module heute über die gesamte Rollenbreite von einem Meter hinweg eine konstante Qualität aufweisen. Auch wenn Flisom unterdessen marktreife Module herstellt, ist die Entwicklung nicht abgeschlossen. Weitere Prozessoptimierungen sollen in Zukunft dafür sor-

gen, dass der heutige Wirkungsgrad der Module, der bereits im zweistelligen Prozentbereich liegt, weiter angehoben und dem im Labor demonstrierten Rekordwert von 20.4% angenähert werden kann.

Flisom hatte zunächst erwogen, sich auf dem Markt als Hersteller von Fertigungsstrassen für CIGS-Module zu positionieren. Dieses strategische Ziel hat das Unternehmen vorerst auf Eis gelegt. «Erst wollen wir mit der eigenen Technologie Erfahrungen sammeln und uns als Modulhersteller am Markt etablieren», sagt Rühle. Dafür will Flisom bis 2019 eine weitere Produktionslinie aufbauen, die rund eine zehnmals grössere Kapazität hat als die bestehende Anlage in Niederhasli. Sie soll Module hervorbringen, die beim Preis mit kristallinen Siliziummodulen konkurrieren können. Aus Kostengründen wird die Anlage im europäischen Ausland, in Indien oder den USA gebaut werden – wo genau, ist zur Zeit noch offen. Die Entwicklungsabteilung des Unternehmens soll hingegen in der Schweiz bleiben.



Die Solarmodule der Firma Flisom empfehlen sich unter anderem für gebäudeintegrierte Anwendungen der Photovoltaik (links) und können auf gewölbten Oberflächen angebracht werden (Fotomontage rechts): In den USA und in Europa hat das Unternehmen bereits eine erste Anwendung in der Luftfahrt realisiert. Foto/Modellbild: Flisom

Anspruchsvoller Markteintritt

Der indische TATA-Konzern und Schweizer Investoren sind in der Flisom AG mit einem zweistelligen Millionenbetrag engagiert. Um mit den flexiblen CIGS-Modulen ein Stück vom Weltmarkt der PV-Module zu erobern, braucht die Unternehmung Ausdauer. Flisom muss sich gegen etablierte Firmen behaupten, die schon längere Zeit CIGS-Module auf flexiblen Substraten herstellen wie beispielsweise die beiden US-amerikanischen Firmen Global Solar Energy und MiaSolé, die beide seit 2013 zum chinesischen Hanergy-Konzern gehören, oder die in Portland (US-Bundesstaat Oregon) beheimatete Solopower Systems.

- Den **Schlussbericht** zum Projekt finden Sie unter: <https://www.aramis.admin.ch/Texte/?ProjectID=37151>
- **Auskünfte** zu dem Projekt erteilt Dr. Stefan Nowak (stefan.nowak[at]netenergy.ch), Leiter des BFE-Forschungsprogramms Photovoltaik.
- Weitere **Fachbeiträge** über Forschungs-, Pilot-, Demonstrations- und Leuchtturmprojekte im Bereich Photovoltaik finden Sie unter www.bfe.admin.ch/CT/PV.

PILOT-, DEMONSTRATIONS- UND LEUCHTTURM-PROJEKTE DES BFE

Der Aufbau, die Erprobung und die Optimierung einer Produktionslinie für CIGS-Solarzellen durch die Flisom AG gehört zu den Pilot- und Demonstrationsprojekten, mit denen das Bundesamt für Energie (BFE) die Entwicklung von sparsamen und rationellen Energietechnologien fördert und die Nutzung erneuerbarer Energien vorantreibt. Das BFE fördert Pilot-, Demonstrations- und Leuchtturmprojekte mit 40% der nichtamortisierbaren, anrechenbaren Kosten. Gesuche können jederzeit eingereicht werden.

- **Informationen** unter: www.bfe.admin.ch/pilotdemonstration
www.bfe.admin.ch/leuchtturmprogramm