



## PV-TEC – Forschungsfabrik für Solarzellen

Abb 1



- ▶ Experimentier- und Testumgebung im Produktionsmaßstab
- ▶ F&E für innovative Zellentechnologien und Produktionsprozesse
- ▶ Angebot für Materialhersteller, Solarzellenhersteller und Produktionsausrüster

*Im PV-TEC durchläuft jedes einzelne Produkt ein vollständiges, überwiegend automatisiertes Monitoring – vom Wafer bis zur fertigen Solarzelle*

**D**er aktuelle Photovoltaik-Boom ist ein gutes Umfeld für die Unternehmen hierzulande. Dabei ist das Wachstumstempo enorm und die weltweite Konkurrenz und der Kostendruck nehmen immer stärker zu. Wie auch in anderen Hightech-Feldern geht es darum, durch technologische Innovationen die Produktion, die Qualität und die Effizienz von Solarzellen zu verbessern und gleichzeitig die Stückkosten zu senken.

Bei komplett ausgelasteten Produktionsanlagen hat man in der Solarstrombranche in der Regel nur eingeschränkte Möglichkeiten für die Erprobung neuer Technologien und Konzepte. Hier setzt das Photovoltaik Technologie Evaluationscenter (kurz: PV-TEC) an. In einer hochmodernen Produktionslinie für kristalline Silizium-Solarzellen können Solarzellen-, Wafer- und Modulhersteller und auch Anlagenbauer seit Anfang 2006 neuartige Prozesse, Materialien und Anlagen analysieren und weiterentwickeln, ohne den Betrieb ihrer eigenen Produktionslinie unterbrechen zu müssen. Dabei ist die Anlagen-

technik so konzipiert und angeordnet, dass für jeden einzelnen Fertigungsschritt einzelne Parameter variiert und innovative Technologiealternativen getestet werden können. Das PV-TEC ist ein Großlabor des Fraunhofer-Instituts für Solare Energiesysteme, es befindet sich in Freiburg im Gebäude des Solar Info Center in unmittelbarer Nähe zum Institut.

Finanziert wurde die Errichtung des Zentrums überwiegend aus dem Forschungsetat des Bundesumweltministeriums, hinzu kamen Mittel der Fraunhofer-Gesellschaft. Mit dem Zentrum soll die Wettbewerbsfähigkeit der deutschen PV-Industrie gesichert und ausgebaut und Solartechnologien für die nahe Zukunft entwickelt werden. Schon im ersten Betriebsjahr haben viele namhafte Solarzellenhersteller und Produktionsausrüster Projekte im PV-TEC absolviert. Im laufenden Betrieb soll sich die Einrichtung über Industrieprojekte finanzieren, ergänzt durch einen Anteil von grundlegenden Forschungsprojekten der öffentlichen Energieforschung.

## ► Wofür ein Test- und Evaluationszentrum?

Die Solarstromerzeugung wird weiterhin dominiert durch kristalline Silizium-Solarzellen. Heute marktverfügbare Solarzellen sind noch vergleichsweise dick ( $240\ \mu\text{m} = 0,24\ \text{mm}$ ) und auch die Wirkungsgrade von 14-16% bieten noch Optimierungspotenzial: Im Labormaßstab und auf kleiner Fläche konnte bereits die Machbarkeit von  $99\ \mu\text{m}$  dünnen multikristallinen Silizium-Solarzellen mit einem Wirkungsgrad von über 20% gezeigt werden. Diese Erfolge wurden mit Solarzellenkonzepten und mit industrienahen Produktionsschritten erreicht, die jetzt im PV-TEC erprobt werden. Damit soll die Einführung neuer Solarzellen-Designs und innovativer Produktionstechnologie in die industrielle Solarzellen-Produktion beschleunigt werden.

Optimierung von Solarzellen setzt an einzelnen Parametern, Details oder Prozessschritten an. Daher hilft es, die Fortschritte im Vergleich zu Zellen aus Referenzprozessen oder -materialien zu quantifizieren. Im Test- und Evaluationszentrum PV-TEC können einzelne Prozessschritte oder das Design für einzelne oder ein Ensemble von Zellen variiert werden, ohne dass die Produktionslinie komplett umgestellt werden muss. Die Einrichtung bietet eine flexible Test-, Experimentier- und Evaluationslinie unter produktionsähnlichen Bedingungen. Die Experimente können systematisch und auf breiter statistischer Basis ausgewertet werden. Denn jedes einzelne Produkt durchläuft ein vollständiges, überwiegend automatisiertes Monitoring – vom Wafer bis zur fertigen Solarzelle. Und davon können bis zu 200 Exemplare pro Stunde gefertigt werden.

### Rekordverdächtiges Tempo

In bemerkenswert kurzer Zeit wurde das PV-TEC errichtet und zum gut genutzten produktionsnahen Technologiezentrum entwickelt ...

Juli 04	Ideenskizze PV-TEC (Fraunhofer ISE)
Nov. 04	Workshop mit Industrie
Nov. 04	Antrag auf Projektförderung (Projektträger Jülich/BMU)
Dez. 04	Letter of Intend (BMU)
ab Jan. 05	Ausschreibung von Planungsdienstleistungen, Anlagen und apparativer Ausstattung. Standortentscheidung
Mai 05	Projektbewilligung (BMU)
Okt. 05	Fertigstellung Gebäudeinfrastruktur, Aufstellung erster Anlagen, Geräte, Prozess- und Analysestationen
Dez. 05	Erste Solarzelle im Referenzprozess produziert (23.12.05, Wirkungsgrad 15%)
ab Jan. 06	Erste Projekte in Partnerschaft mit Industrieunternehmen
März 06	Offizielle Einweihung durch Bundesumweltminister (31.3.)
Juni 06	PV-TEC voll funktionsfähig
Juni 07	Öffentliche Anschubfinanzierung endet. Die Einrichtung trägt sich jetzt durch einen Mix aus überwiegend industriell aber auch öffentlich geförderten Projekten

## ► Ausstattung und Möglichkeiten der Testfabrik

Im PV-TEC stehen  $1.200\ \text{m}^2$  Fläche zur Verfügung. In benachbarten Räumen wurden auf  $800\ \text{m}^2$  die Anlagen zur Energie- und Medienversorgung untergebracht: Reine Luft, Kälte, Vakuum, verschiedene Gase, destilliertes Wasser, Reinigungsprozesse etc. sorgen für einen reibungslosen Betrieb der Produktionssysteme.

### Layout der Prozesslinie

Die Produktionslinie besteht aus einzelnen automatisierten Prozess-Inseln, die jeweils eine hohe Flexibilität haben, einen Durchsatz von 200 bis 1.000 Silizium-Scheiben (Wafer) pro Stunde bewältigen und die unterschiedliche Wafer-Größen bis zum Format von  $210 \times 210\ \text{mm}^2$  und auch sehr dünne Wafer verarbeiten können. Die Wafer werden in speziellen Magazinen (Abb. 2) von einem Prozess zum nächsten gebracht. Dabei gibt es zwei Varianten für Nass- und Trockenprozesse, jeweils zur Aufnahme von 100 Wafers sowie integrierte Kassetten für thermische Prozesse (Diffusion + Oxidation).

### Automationskonzept

An den Prozessstationen können die Wafer-Kassetten automatisch be- und entladen werden. Jeder Wafer erhält eine per Laser markierte Codierung (Abb. 2), auch jedes Magazin hat einen individuellen Identifikationscode und die Fähigkeit zur Kommunikation mit den Prozessstationen. So können an einer bestimmten Prozessstation ausgewählte Wafer gezielt entnommen werden (Abb. 3), um vollautomatisch spezielle Experimente und vergleichende Prozesse durchführen zu können.

### Elementare Prozessstationen

Die Produktionslinie enthält verschiedene klassische Stationen, die einzeln oder magazinweise beschickt werden (batch). Dies gilt z. B. für die Nasschemie, für die Diffusion, die thermische Oxidation und den Siebdruck.

### Innovative Prozessstationen

Alternativ oder ergänzend werden innovative Produktionsschritte erprobt, zumeist mit Anlagen, welche die Zellen zudem auch im Durchlaufverfahren prozessieren können (inline). So gibt es verschiedene Hochtemperaturanlagen und eine Anlage für die nasschemische Prozessierung, z. B. für die Texturierung von multikristallinen Silizium-Wafers (Abb. 4). Zudem werden innovative Beschichtungsanlagen genutzt und erprobt wie z. B. a) die PECVD-Anlage (Plasma Enhanced Chemical Vapour Deposition) zur Beschichtung der Solarzellen mit Siliziumnitrid, Siliziumoxid oder amorphem Silizium (inline). Die Schichtabscheidung erfolgt als kontinuierlicher Prozess aus einem Silan-/Ammoniakplasma. Das Verfahren ist auch geeignet für die Rückseitenpassivierung und die Abscheidung von Gradienten- oder Mehrlagenschichten.

b) die PVD-Anlage (Physical Vapour Deposition oder „sputtering“, Abb. 5) zum Auftragen von Siliziumnitrid-, Siliziumoxid- und Aluminium-Schichten (inline). Die Schichtabscheidung erfolgt hier nicht auf Basis von Silangas sondern mit Siliziumsubstrat und Kathodenzerstäubung. Das Verfahren ist auch geeignet für die Oberflächenpassivierung, für transparente elektrisch leitende Schichten, für die Rückseitenverspiegelung u. v. m.

Abb 2: Wafer mit Laser-Codierung



Eine weitere, vielfältig einsetzbare Prozessanlage ist die Laserstation mit verschiedenen Strahlführungsoptionen. Der Laser kann die Wafer markieren, Kanten von Solarzellen elektrisch isolieren, Oberflächen, Dotierungsprofile oder Kontakte strukturieren, Kontaktdurchführungen bohren etc.

### Analyse- und Charakterisierungsstationen – inline und im Labor

Das Testzentrum verfügt über neuartige, schnelle und hochauflösende Inline-Charakterisierungsverfahren und –Messtechnik zur Bestimmung von Material- und Zellparametern. Ein industrieller Solarzellentester und -sorter erfasst schließlich die elektrischen Parameter der experimentellen Solarzellen.

## ► Beispielhafte Innovationen

Im PV-TEC werden verschiedene Themen bearbeitet, die allesamt ein Ziel haben: kostengünstige Solarzellen mit hohem Wirkungsgrad in einheitlicher, langzeitstabiler Qualität:

### Charakterisierungsverfahren

■ **Kontaktlose Schichtwiderstandsmessung:** Mit der Methode „Sheet Resistance Imaging“ (SRI) wird der elektrische Widerstand der für die Solarzelleneffizienz wichtigen Emitterschicht gemessen. Mit diesem rein optischen Verfahren können in Sekundenschnelle und berührungsfrei Topografien der Emittierdotierung erstellt werden – ein wichtiges Instrument zur Optimierung von Diffusionsprozessen.

■ **Photoleitfähigkeitsmessung:** Mit der Methode „Quasi Steady State PhotoConductance“ (QSSPC) kann aus der berührungsfrei gemessenen Photoleitfähigkeit die effektive Lebensdauer freier Ladungsträger in Solarzellenmaterialien bestimmt werden. Die schnelle, bereits häufig eingesetzte Messmethode wird weiterentwickelt, um die Daten jetzt auch mit höherer Ortsauflösung zu erhalten.

### Beschichtungsverfahren

■ **Kathodenzerstäubung mit rotierendem Target:** Die PVD-Beschichtungsanlage wird im PV-TEC im Hinblick auf Schichtgüte, Standzeit und Betriebskosten in Kooperation mit dem Hersteller Applied Materials optimiert. Dabei werden jetzt als Substrat zwei rotierende, zylinderförmige Silizium-Targets erprobt (Abb. 6). Bei den bisherigen planaren Targets konnten aufgrund der ungleichmäßigen Materialabtragung nur etwa 20% des Silizium-Substrats genutzt werden. Mit dem neuen Verfahren steigt die Ausnutzung auf bis zu 80%.

### Kontaktierungsmethoden

■ **Hotmelt-Siebdruck:** Spezielle Hotmelt-Pasten werden im Siebdruck auf die Solarzelle aufgebracht und gleichzeitig elektrisch erwärmt (Abb. 7). Dadurch entfallen anlagen-, zeit- und energieintensive Hochtemperatur-Trocknungsprozesse. Zudem wird mit einer schlanken Kontaktfinger-Kontur die Abschattung durch das frontseitige Kontaktgitter reduziert, ohne die elektrische Leitfähigkeit zu beeinträchtigen.

■ **Lichtinduzierte Galvanik:** Mit diesem kombinierten Verfahren werden sehr filigrane und wenig abschattende Kontaktgitter erzielt. In zweistufigen Prozessen werden die frontseitigen Kontaktfinger zunächst vorbereitet, indem linienhafte Kontakte als Saatschichten aufgebracht werden. Dies kann beispielsweise im Siebdruckverfahren oder durch neuartige kontaktlose Verfahren geschehen, die noch im Labormaßstab in der Erprobung sind. Beispiele hierfür sind das „Metal Aerosol Printing“ oder das Schmelzen von Metallpulver mit dem Laser. Die Saatschichten bieten einen sehr guten Kontakt

zum Silizium. Um die elektrische Leitfähigkeit der linienhaften Kontakte zu verbessern, wird im zweiten Schritt Silber in einem galvanischen Prozess aufgetragen. Die beleuchtete Solarzelle liefert die dazu notwendige Spannung.

### Prozessierung neuer Zellkonzepte

■ **MWT (Metall-Wrap-Through):** Auf der Vorderseite der Solarzellen befinden sich nur noch die Kontaktfinger (Abb. 8). Diese Leiterbahnen werden durch mittels Laser erzeugte Löcher (ca. 50 pro Zelle) punktuell von der Vorder- zur Rückseite geführt. Die Stromsammelschienen (bus bars) befinden sich dann auf der Rückseite der Solarzelle, sodass die Verschaltung von mehreren Solarzellen komplett rückseitig erfolgen kann. Durch die Verlegung der Zellverbinder auf die Rückseite wird zudem die Abschattung weiter reduziert.

■ **EWT (Emitter-Wrap-Through):** Im Vergleich zur MWT-Zelle werden nun auch die Kontaktfinger auf der Vorderseite eingespart. Dies erreicht man, indem die gut leitende Halbleiterschicht der Vorderseite durch eine Vielzahl von Löchern (über 20.000 pro Zelle) auf die Rückseite geführt wird. Die Verschaltung mehrerer Solarzellen erfolgt ebenfalls komplett rückseitig.

■ **Rückseitenkontakt-Zelle:** Eine besonders elegante Variante sehr effizienter Solarzellen für hochreines Silizium-Material ist die Rückseitenkontakt-Solarzelle, bei der sich sowohl der negative als auch der positive Kontakt auf der Rückseite befinden. Diese Zellen zeichnen sich durch ein homogenes Erscheinungsbild, einen hohen Wirkungsgrad und eine einfache Modulverschaltung aus. Allerdings ist die Trennung von p- und n-diffundierten Bereichen wesentlich komplexer als bei Standard-Solarzellen. Die Entwicklung der damit verbundenen Laser-Strukturierungstechnologie wird in die industrielle Produktion überführt.

■ **Inline-Diffusion:** Die für die Solarstromproduktion wichtige Emitterschicht wird bei Temperaturen von etwa 900°C im Diffusionsofen eingebracht. Bislang läuft dieser Prozess diskontinuierlich ab (batch), indem jeweils 200 bis 400 Wafer in einer Quarzkassette in einen rohrförmigen Diffusionsofen eingeführt werden. Die Diffusion im inline-Verfahren hat verschiedene Vorteile, wird jedoch aufgrund prozesstechnischer Hürden nur vereinzelt eingesetzt. Jetzt wird im PV-TEC gemeinsam mit der Centrotherm Photovoltaics AG ein Diffusionsofen für den Produktionsmaßstab entwickelt und erprobt. Besonderer Pfiff der vierspürigen Anlage ist das kontaminationsfreie Durchlaufsystem mit keramischem Hubschnursystem (Abb. 9). Das Verfahren ist auch geeignet für verschiedene Oxidationsprozesse, für das Kontaktfeuern und für einfache Trocknungsverfahren.

Abb 3: Automatisiertes Wafer-Handling



Abb 4: Inline-Anlage zum Nassätzen



Abb 5: Prozessalternative: PVD-Beschichtung



Abb 6: Zylinder-Targets für PVD-Anlage



Abb 7: Siebdruck-Station macht Kontakte



Abb 8: Neues Frontkontakt-Design



Abb 9: Innovativer Inline-Diffusionsofen



## ► Nutzungsmöglichkeiten

Das PV-TEC ist ein Angebot, das sich an Photovoltaik-Hersteller und Produktionsausrüster richtet. Es sind verschiedene Nutzungsmodelle möglich, die von kleinen Serviceaufträgen, d. h. der Durchführung von Standardprozessen, bis zu intensiven Forschungsk Kooperationen reichen, um innovative Konzepte, Prozesse oder Anlagen zu entwickeln oder zu erproben.

Das Zentrum bietet auch Schulungsmöglichkeiten für Hersteller und Anlagenbauer, die ihre Mitarbeiter mit klassischen und innovativen Fertigungstechnologien vertraut machen wollen.

## ► Referenzen

Das Interesse von Solarzellenherstellern und Produktionsausrüstern an dem neuen Test- und Evaluationszentrum ist groß. Folgende Unternehmen arbeiteten bereits mit dem PV-TEC zusammen: Applied Materials, Centrotherm Photovoltaics, Conergy, Ersol Solar Energy, Schmid, Manz Automation, Q-Cells, Roth & Rau, Schott, Solarfabrik, Solar World, Solland Solar, Sunways, Trumpf u. a.

## ► Fazit

Deutschland ist zusammen mit Japan weltweit führend in der Herstellung von Solarzellen und verfügt in Forschung und Technologieentwicklung über großes Know-how und Potenzial. Doch die Konkurrenz – insbesondere in Asien – wird stärker. Und die Kosten von Photovoltaik-Anlagen müssen weiter deutlich sinken, damit Solarstrom wirtschaftlich werden kann. Die Chancen, in den nächsten 5-10 Jahren das gesetzte Ziel „grid parity“ zu erreichen, stehen gut – jedoch ist das nur machbar, wenn einige grundlegende technologische Innovationen im Solarzellendesign und in der Fertigungstechnologie in die Serienproduktion erfolgreich überführt werden können.

Das Kostenreduktionspotenzial der neuen Dünnschicht-Solarzellen scheint sehr groß, doch die wafer-basierten Silizium-Solarzellen haben noch großes Potenzial und spielen zudem in einer höheren Effizienz-Liga. Auch auf lange Sicht werden sie eine wichtige Rolle bei allen Anwendungen mit begrenzter Fläche oder hohen flächenproportionalen Kosten spielen.

Kompetenzzentren, wie das hier vorgestellte Test- und Evaluationszentrum PV-TEC, sollen das Innovationsklima intensivieren. Das PV-TEC trägt auch dazu bei, dass kleinere Unternehmen eine Plattform im Produktionsmaßstab haben, um technologische Innovationen praxisnah testen zu können. Forschungsergebnisse und daraus ableitbare Innovationen können auf diese Weise schneller in die Produktion einfließen. Und schließlich können solche Zentren die deutsche und europäische Forschungs- und Technologielandschaft nachhaltig stärken.

Mit inzwischen 60 Mitarbeitern und über 20 laufenden Entwicklungsprojekten und einem jährlichen F+E-Budget von ca. 4 Mio. Euro ist das PV-TEC auf einem guten Weg, sich auch künftig überwiegend über Industrieprojekte zu tragen. Schließlich kann das Durchlaufen einer umfangreichen Testprozedur im PV-TEC als Bestätigung der Praxistauglichkeit einer Technologieinnovation gewertet werden.

### ► PROJEKTADRESSEN

- Kontakt PV-TEC  
Fraunhofer ISE  
Dr. Ralf Preu  
Heidenhofstraße 2  
79110 Freiburg  
ralf.preu@ise.fraunhofer.de

### ► ERGÄNZENDE INFORMATIONEN

#### Literatur

- BINE-Themeninfo III/2005 „Photovoltaik – Innovationen bei Solarzellen und Modulen“

#### Abbildungsnachweis

- Abb. 1, 4, 5: Fraunhofer ISE
- Abb. 2, 3, 6, 7, 8, 9 und Hintergrundfotos  
Seiten 1+4: BINE Informationsdienst

#### Service

- Ergänzende Informationen sind unter [www.bine.info](http://www.bine.info) im Bereich Service/InfoPlus abrufbar, so z. B. ein Hinweis auf weitere PV-Kompetenzzentren in Deutschland.

### PROJEKTORGANISATION

- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU)  
11055 Berlin

Projektträger Jülich  
Forschungszentrum Jülich GmbH  
Dr. Christoph Hünnekes  
52425 Jülich

- Förderkennzeichen  
0329984

### IMPRESSUM

- ISSN  
0937 – 8367

- Herausgeber  
FIZ Karlsruhe  
Hermann-von-Helmholtz-Platz 1  
76344 Eggenstein-Leopoldshafen

- Nachdruck  
Nachdruck des Textes nur zulässig bei vollständiger Quellenangabe und gegen Zusendung eines Belegexemplares; Nachdruck der Abbildungen nur mit Zustimmung der jeweils Berechtigten.

- Autor  
Johannes Lang

### BINE Informationsdienst Kompetenz in Energie

BINE informiert zu Energieeffizienztechnologien und erneuerbaren Energien:

In kostenfreien Broschüren, unter [www.bine.info](http://www.bine.info) und per Newsletter zeigt BINE, wie sich gute Forschungsideen in der Praxis bewähren.

BINE ist ein vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie geförderter Informationsdienst von FIZ Karlsruhe.

#### Kontakt

Fragen zu diesem **projektinfo?**

Wir helfen Ihnen weiter:

**Tel.: 0228 92379-44**



**BINE**  
Informationsdienst

FIZ Karlsruhe, Büro Bonn  
Kaiserstraße 185 – 197  
53113 Bonn

Tel.: 0228 92379-0  
Fax: 0228 92379-29

[bine@fiz-karlsruhe.de](mailto:bine@fiz-karlsruhe.de)  
[www.bine.info](http://www.bine.info)