

# Produktionstechnologien für die Photovoltaik

Robin Schild  
VON ARDENNE  
schild.robin@vonardenne.biz

Martin Dimer  
VON ARDENNE  
Dimer.martin@ardenne-at.de

Dr. Michael Powalla  
ZSW  
powalla@zsw-bw.de

## Einführung

Der Markt für Solarzellen wächst. Die jährliche Wachstumsrate betrug in den letzten Jahren mehr als 30% und es wird weiterhin eine steigende Nachfrage nach Solarmodulen erwartet. Deutschland ist sowohl bei der Anzahl der installierten Solarmodule als auch im Bereich der Photovoltaiktechnologien weltweit mit führend. Allein in Deutschland gehen in den Jahren 2006 bis 2008 Dünnschicht-PV-Produktionen mit mehr als 100 MW<sub>p</sub> Jahreskapazität an den Start.

Wichtige Wegbereiter für diese Erfolgsgeschichte sind das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG), mit seiner Strom-Einspeisevergütung, und die kontinuierliche Förderung der Forschung und Entwicklung an den Instituten und in der Industrie. So wurde z. B. die Entwicklung von Dünnschicht-Solarzellen von 1975 bis 2006 mit 260 Mio. Euro gefördert [1].

## Skalierung der Prozesse zur Abscheidung von Dünnschicht-Solarzellen

Am Anfang haben Forschungsinstitute grundlegende Untersuchungen gemacht zum Solarzellenaufbau und zu deren Herstellbarkeit, auf zunächst kleinen Flächen. Die ersten Dünnschicht-Solarzellen waren nur wenige Quadrat-zentimeter groß und es galt, deren Machbarkeit zu zeigen und den Wirkungsgrad zu erhöhen. Viele der Prozesse zur Abscheidung der dünnen Schichten werden und wurden mit Vakuumabscheidungsanlagen durchgeführt. *Abbildung 1* zeigt ein Clustersystem zur Abscheidung der Kontaktschichten für Substratgrößen bis zu 100cm<sup>2</sup> für Forschung und Entwicklung.

*Abbildung 1*  
Clustersystem zur Abscheidung von metallischen und transparenten leitfähigen Schichten mittels Magnetron-sputtern





Abbildung 2  
Pilotanlage zur  
Abscheidung von  
metallischen Schichten  
bei hohen Tempera-  
turen auf Glas mit der  
Größe von 0,72m<sup>2</sup>

Im Zuge der öffentlichen Diskussion um die Begrenztheit der fossilen Energieressourcen, Umweltverschmutzung und steigende Energiekosten wuchs das Interesse an den regenerativen Energien. In den Forschungsinstituten wurden bereits Zellen mit Wirkungsgraden oberhalb von 10 % hergestellt.

Basierend auf Arbeiten der Universität Stuttgart begann das ZSW 1992 mit der Entwicklung von Fertigungstechnologien für  $\text{Cu(In,Ga)Se}_2$  – Dünnschichtsolarzellen. Erkenntnisse aus der Grundlagenforschung wurden systematisch in industriell anwendbare Prozesstechnologien umgesetzt, wobei sich Perspektiven für eine wirtschaftliche Umsetzbarkeit in die Produktion ergaben. Dies führte dazu, dass sich in der zweiten Hälfte der 90er Jahre kleinere Unternehmen gründeten und große Unternehmen vereinbarten Partnerschaften mit Technologieträgern von FuE-Instituten. Die Verfahrensprozesse waren jedoch damals nur auf Substratgrößen von wenigen Quadratzentimetern entwickelt und bezüglich Produktionskennzahlen wie Produktionsausbeute, Anlagendurchsatz bzw. -verfügbarkeit nicht optimiert.

Mit der Unterstützung durch geförderte Projekte entstanden zunehmend Beschichtungsanlagen für Substratgrößen von einigen hundert

Quadratzentimetern, um zu zeigen, dass die Prozesse auf größere Substrate skalierbar sind und damit auch wirtschaftliche Prozesse perspektivisch darstellbar sind. *Abbildung 2* zeigt eine Beschichtungsanlage für die Abscheidung von Metallen bei hohen Temperaturen für Dünnschichtsolarzellen auf Glassubstraten der Dimension  $120 \times 60 \text{ cm}^2$  für eine Pilotproduktion.

Parallel dazu wurden auch bei den Anlagenbauern und Solarzellenherstellern Beschichtungsverfahren für einzelne Schichten entwickelt. Ziel war es, die Schichteigenschaften zu verbessern und kostengünstigere Verfahren zu entwickeln.

Ein Schwerpunkt lag bei der Entwicklung von transparenten leitfähigen Schichten auf Basis von aluminiumdotierten Zinkoxid ( $\text{ZnO:Al}$ ) für den Frontkontakt in Dünnschichtsolarzellen.

Durch die Einführung der Rohrkathoden-Sputtertechnik in Verbindung mit keramischen Rohrtargets konnte gezeigt werden, dass die Beschichtungszeit und die Materialausnutzung, im Vergleich zum planaren Magnetron-Sputterverfahren, deutlich vergrößert werden kann.

Auch die Materialkosten pro Quadratmeter Substrat reduzierten sich dabei um ca. einen Faktor zwei bis drei gegenüber dem Sputtern

**Tabelle 1**  
Vergleich von Si-Wafer Solarzellen mit Dünnschicht solarzellen auf Glas

	Si-Wafer Solarzelle	Dünnschicht solarzelle auf Glas
Substratgröße [m <sup>2</sup> ]	0,024	0,72 bis 5,7
Taktzeiten Fertigungslinie pro Substrat [sec]	2 bis 4	60 bis 600
Wirkungsgrade [%]	14 bis 20	5 bis 13
Kontaktschichten	Siebdruck- und Galvanotechnik,	Vakuumbeschichtung
Absorber	chemische und thermische Verfahren	meist Vakuumbeschichtungsverfahren
Modulkonzept	Verschaltung der Wafer im Modul	integrierte Serienschaltung

von planaren Magnetrons. Trotzdem liegen die Rohrtargetkosten (ZnO:Al) für eine 30 MW<sub>p</sub> Produktionsanlage (10% Wirkungsgrad, 1000 nm Schichtdicke) immer noch bei ca. 1 Mio. € pro Jahr.

Weiterhin wurde und wird in Forschungsprojekten untersucht, ob das reaktive Sputtern von ZnO:Al von metallischen Targets ein für die Produktion einsetzbares Verfahren sein könnte. Dadurch könnten die Materialkosten noch einmal halbiert werden.

Interessant ist es, einige charakteristische Unterschiede in den Produktionstechnologien für waferbasierende Solarzellen und Dünnschicht solarzellen auf Glas näher zu betrachten. *Tabelle 1* zeigt ausgesuchte Merkmale der Produktionslinien für Solarzellen. Es ist zu erkennen, dass in der Produktion von Dünnschicht solarzellen auf Glas derzeit sehr viel Vakuumbeschichtungstechnik eingesetzt wird, während bei den waferbasierenden Solarzellen, abgesehen von der Vakuumabscheidung von Siliziumnitrit, fast keine Vakuumbeschichtungstechnik eingesetzt wird.

Die Anlagen für die Produktion von waferbasierenden Solarzellen kommen ursprünglich aus der Mikroelektronik. Sie müssen aber für die Solarzellenproduktion noch mehr auf hohen Durchsatz getrimmt werden. Die Linientaktzeiten für die waferbasierenden Solarzellen liegen im Sekundenbereich. Sie sind damit 30- bis 200-mal kürzer als die Linientaktzeiten für Dünnschicht solarzellen, die im Minutenbereich liegen.

Die Produktionstechnik für die Dünnschicht solarzellen profitiert im starken Maße von dem langjährigen Know-how aus der Architekturglasbeschichtung und der Displaytechnik. So werden z. B. seit vielen Jahren mit Vakuumbeschichtungstechnik Wärmeschutzbeschichtungen mittels Magnetronsputtertechnik hergestellt – und das auf Glassubstraten mit einer Größe von bis zu 19 m<sup>2</sup>. *Abbildung 3* zeigt eine Architekturglasbeschichtungsanlage zur Beschichtung von 3,2 x 6m<sup>2</sup> großen Glasscheiben. Diese Anlagentechnik kann in Taktzeiten von bis zu 35 Sekunden Glas beschichten. Damit werden jede Minute 33m<sup>2</sup> Glas beschichtet.

**Abbildung 3**  
Architekturglasbeschichtungsanlage zur Abscheidung von Wärmeschutzschichten auf Glas mit der Größe von 19,2m<sup>2</sup>



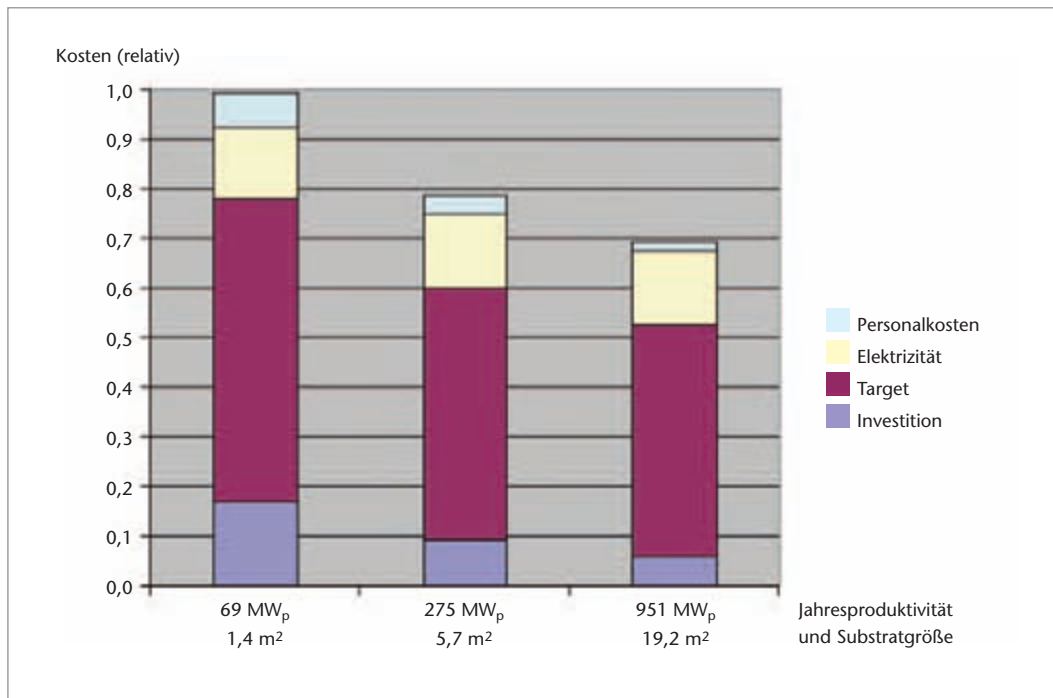


Abbildung 4  
Vergleich der Herstellkosten in Abhängigkeit von der Substratgröße (Produktionskapazität) für die transparente leitfähige Kontaktschicht ZnO:Al (TCO)

Die Entwicklung dieser großflächigen Vakuumbeschichtungsverfahren für Architekturglas begann in den 80er Jahren. In den 90ern startete die Entwicklung der großflächigen Beschichtungstechnik für die Displayfertigung. Es wurden für die Photovoltaik PVD- und PECVD-Beschichtungsverfahren entwickelt, die Substrate mit einer Größe von bis zu 5,7 m<sup>2</sup> beschichten können. Die ersten Produktionslinien für diese Substratgrößen werden 2008 in Betrieb gehen.

## Auswirkung der Skalierung auf die Herstellungskosten

Die Skalierung der Prozesse auf große Substratgrößen, möglichst geringe Taktzeiten und möglichst hohe Wirkungsgrade bei geringen Materialverbrauchskosten sind die Schlüsselgrößen zur Reduzierung der Herstellkosten für Solarzellen. Bisher war es die oft noch nicht erzielte Technologiereife der verschiedenen Dünnschichtsolarellentechnologien und die hohen Investitionen für die Produktionstechnik, die die Markteindringung der Dünnschichtsolarellentechnologien erschwerte oder auch verhinderte. Bei kleineren Produktionslinien werden die relativ hohen Investitionen für die Produktionstechnik wesentlich durch die Vakuumbeschich-

tungsanlagen bestimmt. Eine Frage ist, inwieweit eine Vergrößerung der Substratflächen und damit der Produktivität die Produktionskosten für die Solarzellen reduzieren könnte und wie hoch denn tatsächlich der Kostenanteil für das Investment ist? Am Beispiel der Herstellung von ZnO:Al, einer transparenten leitfähigen Schicht (TCO), wird im Folgenden die Kostenverteilung näher erläutert und die Kostenentwicklung von der Beschichtung von 1,4 m<sup>2</sup> hin zu 19,2 m<sup>2</sup> großen Substraten betrachtet.

Abbildung 4 zeigt die Kostenverteilung für die Abscheidung einer 1000nm dicken ZnO:Al-Schicht (TCO) in Abhängigkeit von der jährlichen Produktionskapazität. Basis für diese Abschätzung sind drei verschiedene horizontale Vakuumbeschichtungsanlagen: Für die Jahreskapazität von 67 MW<sub>p</sub> wurde eine Anlage angenommen, die eine Substratgröße von 1,4 m<sup>2</sup> beschichtet (Generation 5). Die 270 MW<sub>p</sub> basieren auf einer Substratgröße von 5,7 m<sup>2</sup> (Generation 8.5) und die 930 MW<sub>p</sub>-Anlage (Jumbo-Coater aus der Architekturglasbeschichtung) beschichtet Substrate mit einer Größe von 19,2 m<sup>2</sup>.

Die Anlagen heizen die Substrate auf eine Temperatur von 200°C und haben eine Taktzeit von 60 sec. Es wurde ein Wirkungsgrad von

10 % angenommen. Die aufgeführten Kosten setzen sich aus den Kostenanteilen für die Investition für die Vakuumbeschichtungsanlage, für die Targets, für Energie und für das Personal zusammen. Es ist zu erkennen, dass die Kosten bei hohen Produktivitäten ganz wesentlich durch die Kosten für die Targets bestimmt werden. Die Skalierung der Anlagentechnik von 1,4 auf 19,2 m<sup>2</sup> reduziert die Produktionskosten um ca. 30 %. Bemerkenswert ist, dass der Kostenanteil für die Anlagentechnik, gerechnet für große Produktionskapazitäten und auf eine Abschreibedauer von 7 Jahren, unterhalb von 15 % liegt. Beim TCO in der Massenproduktion dominieren die Targets mit einem Kostenanteil zwischen 60 und 70 %.

Es zeigt sich also, dass mit zunehmender Produktionskapazität die Investitionskosten einen immer kleineren Anteil an den Gesamtkosten einnehmen.

## Schlussfolgerungen

Die Skalierung der Prozesse auf große Formate ist ein Ansatz die Produktionskosten zu senken, sofern die Prozesstechnologien dies zulassen. Mit der Einführung der Rohrkathoden-Sputtertechnik für die Kontaktschichten gelang es, den Targetverbrauch stark zu senken. Trotzdem bestimmen immer noch wesentlich die Targetkosten in der Massenproduktion die Herstellkosten, so dass man auch zukünftig besonders intensiv nach Lösungen suchen muss, die es erlauben, die Material- bzw. Targetkosten weiter zu reduzieren.

## Literatur

- [1] Chr. Hünnekes, Workshop Kristalline Silizium Dünnschichttechnologien, Erlangen, 2006, Forschungszentrum Jülich GmbH