



## 05 (2011) Neues aus der Bauphysikalischen Lehre und Forschung, kurz gefasst

Herrn Prof. Dr.-Ing. Schew-Ram Mehra zum 60. Geburtstag gewidmet

A. Lozanovski, M. Held, K. Sedlbauer

## Ökobilanz der Herstellung von Kupfer-Indium-Gallium-Diselenid-Photovoltaikmodulen

### 1. Hintergrund

Energieeffizienz ist eines der wichtigsten Themen der Bauphysik. Wie Herr Prof. Mehra es stets auf den Punkt bringt „erst maximale Sparmaßnahmen, dann maximale Wirkung regenerativer Ressourcen“, geht es also immer auch um solare Energie [1]. Zu deren Nutzung existieren heutzutage verschiedene Techniken. Eine davon ist die Photovoltaik, mit deren Hilfe Sonnenenergie direkt in elektrische Energie umgewandelt werden kann. Allerdings stellt sich bei der regenerativen Energieerzeugung neben technischen und wirtschaftlichen Gesichtspunkten auch die Frage des ökologischen Nutzens. Diese Fragestellung wird im Rahmen dieser Studie untersucht.

### 2. Auftrag und Ziel der Studie

Die Untersuchung [2] befasst sich mit der ökologischen Bewertung zweier Herstellungsverfahren der Kupfer-Indium-Gallium-Diselenid (CIS) -Photovoltaik-module. Im Rahmen der Studie werden beide Verfahren erfasst und mittels verschiedener Szenarien hinsichtlich ihres ökologischen Einflusses miteinander verglichen. Die Methoden, die im Folgenden analysiert werden, sind das konventionelle, großtechnisch angewandte Produktionsverfahren der Physikalischen Gasphasenabscheidung (PVD) und der Solarzellendruck. Der Solarzellendruck, der derzeit im Labormaßstab erforscht wird, wird dabei mittels einer Szenario-Analyse auf eine großtechnische Produktion hochskaliert. Anschließend werden beide Verfahren auf ihre Umweltauswirkungen untersucht. Diese Studie entstand im Rahmen einer Diplomarbeit, die in Kooperation der Abteilung Ganzheitliche Bilanzierung (GaBi) des Lehrstuhls für Bauphysik der Universität Stuttgart und der Würth Solar GmbH und Co. Kg (nachfolgend Würth Solar genannt) betreut wurde.

### 3. Untersuchungsrahmen

Den Untersuchungsrahmen bildet die Produktion von Photovoltaikmodulen mit der funktionellen Einheit 1 m<sup>2</sup> produzierter Solarmodulfläche. Die aktuelle Fertigung in der CISfab (Produktionsstätte von Würth Solar) wird untersucht und anhand der aufgenommenen Daten dargestellt. Als nächstes wird der im Labormaßstab existie-

rende Solarzellendruck aufgenommen und abgebildet. Beim Vergleich dieser Modelle werden die Unterschiede zwischen dem Solarzellendruck und der konventionellen Fertigung herausgearbeitet. Darauf basierend wird ein Modell einer auf industriellen Maßstab hochskalierten Massenfertigung von Photovoltaikmodulen mittels des Solarzellendrucks erstellt. Dieses Modell ist bis auf die spezifischen Produktionsschritte der CIS-Auftragung mit dem konventionellen Modell identisch. Für die veränderte CIS-Auftragung werden folgende Faktoren angepasst:

- benötigte Menge des CIS-Materials,
- Reduktion des Stromverbrauchs der Verdampfer,
- Reduktion der Kühlleistung.

Zur Darstellung der Bandbreite des zukünftigen Solarzellendrucks werden diverse Szenarien gebildet. Unter verschiedenen Annahmen wird ein Standardszenario berechnet, das als Grundlage zur Ableitung des „Best Case“ und „Worst Case“ Szenarios dient. In diesen werden die Grenzwerte der für den Solarzellendruck angepassten Parameter untersucht.

### 4. Ausgewählte Ergebnisse

Die Szenarien werden anhand unterschiedlicher Umweltauswirkungen miteinander verglichen und bewertet. Im Mittelpunkt stehen dabei die Wirkungskategorien wie Versauerungspotential (AP), Überdüngungspotential (EP), Treibhauspotential (GWP), Sommersmogpotential (POCP) sowie der Primärenergieverbrauch (PE).

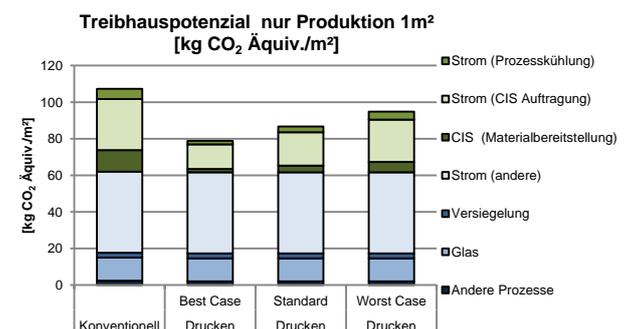


Bild 1: Vergleich der verschiedenen Produktionstechniken und Szenarien hinsichtlich des Treibhauspotentials.

Die Berechnung dieser Umweltwirkungen findet mit Hilfe der Software GaBi 4 [3] statt. Wie aus Bild 1 ersichtlich, geht im Vergleich zu der konventionellen Fertigung das Treibhauspotenzial bei dem Solarzellendruck je nach Szenario um 10 bis 25 % zurück. Dabei sind der Stromverbrauch der CIS-Auftragung und der Prozesskühlung die maßgeblichen Einflussfaktoren. Der Anteil der CIS-Materialbereitstellung reduziert sich um 50 bis 80 %.

### Nutzungsphase

Während der Nutzungsphase wird Strom erzeugt, der jedoch von verschiedenen modul-, anlagen- und standortspezifischen Faktoren beeinflusst wird. Um die Vergleichbarkeit mit anderen Studien zu gewährleisten, werden in [4] empfohlene Rahmenbedingungen festgelegt. Diese sind 75% Systemwirkungsgrad, optimale Ausrichtung der Module, 30 Jahre Nutzungsdauer und Degradation von 0,5%. Die Nutzungsphase wird durch die Energierückgewinnungszeit (engl. Energy Payback Time, EPBT) und dem Umweltprofil je erzeugter kWh bewertet. Die EPBT ermöglicht es, die Aufwendung während der Produktion mit der späteren Energieerzeugung in Relation zu setzen. Sie ist somit die energetische Amortisationszeit und definiert nach [4] als:

$$\frac{\sum \text{Primärenergie Input}}{\sum \text{jährlich eingesparten Primärenergie (Strommix Referenzland)}}$$

Nach Festlegung der oben genannten Rahmenbedingungen ist die EPBT nur noch vom Wirkungsgrad der Solarmodule abhängig. Somit kann der Wirkungsgrad berechnet werden, den der Solarzellendruck erreichen muss, um der konventionellen Fertigung gleichwertig zu sein (Bild 2). Um die EPBT eines konventionell gefertigten Moduls zu erreichen, reichen beim Best Case 9,2 % Modulwirkungsgrad aus. Beim Standardszenario werden 10 % und beim Worst Case 10,9 % Modulwirkungsgrad benötigt. Diese Break Even Points werden unabhängig von der Sonneneinstrahlung am Standort berechnet.

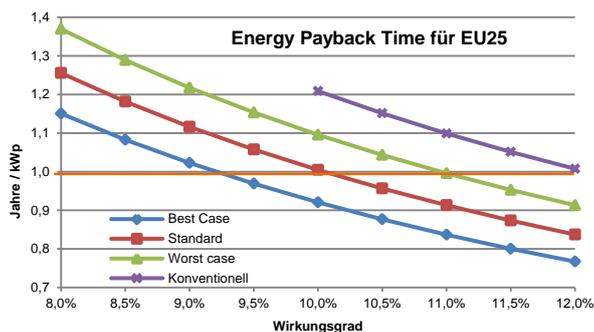


Bild 2: Break Even Point ab dem der Solarzellendruck die gleiche Energierückgewinnungszeit erreicht, wie die konventionelle Fertigung.

### Umweltwirkung je erzeugter kWh

Eine weitere Bewertungsmöglichkeit der PV-Module ist das Erstellen des Umweltprofils je kWh produzierten PV-Strom unter Berücksichtigung der oben genannten Wirkungskategorien. Hierfür werden alle während des Lebenswegs entstandenen Umweltwirkungen aufsummiert und durch den produzierten PV-Strom (kWh) geteilt.

### Übersicht über die verschiedenen Umweltprofile EU25 [% je kWh über 30 Jahre]

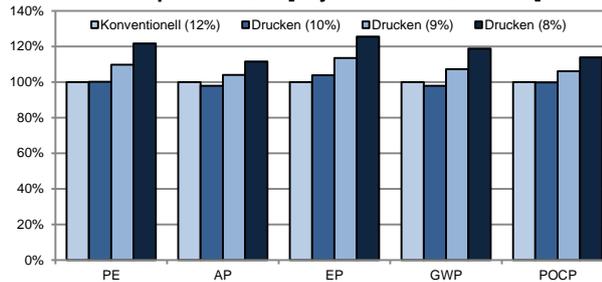


Bild 3: Umweltprofile je erzeugter kWh der gewählten Wirkungskategorien.

Bild 3 zeigt einen Vergleich der Umweltprofile je erzeugter kWh. Dabei wird das konventionell hergestellte Solarmodul mit 12 % Wirkungsgrad zu 100 % gesetzt. Die gedruckten Solarmodule benötigen einen Wirkungsgrad von mindestens 10 %, um ein den konventionell hergestellten Solarmodulen gleichwertiges Umweltprofil zu erreichen.

### 5. Fazit

Der Solarzellendruck zeigt ein großes ökologisches Potenzial zur umweltfreundlichen Fertigung von Solarmodulen. Ein entscheidender Faktor ist hierbei der Modulwirkungsgrad und damit die Ausbeute der Stromerzeugung. Bisher ist allerdings der erreichbare Wirkungsgrad einer großtechnischen Fertigung mittels Solarzellendrucks noch nicht absehbar.

Im Vergleich zu den Strommischen der Referenzländer haben alle betrachteten Solarmodule einen deutlichen ökologischen Nutzen. Die Umweltwirkungen der Stromerzeugung einer Aufdachanlage liegen je nach Standort bei 0,42 bis 0,82 MJ Primärenergiebedarf je kWh und 27 bis 47 g CO<sub>2</sub> äquiv./kWh. Damit verursachen die Solarmodule deutlich weniger Umweltwirkungen als der herkömmliche Strommix (z.B. EU 25 Strommix, 10,99 MJ Primärenergiebedarf je kWh und 566 g CO<sub>2</sub> äquiv./kWh). Die Energierückgewinnungszeit liegt bei der konventionellen Fertigung zwischen 0,9 und 1,7 Jahren. Die Auswertung verschiedener Szenarien des Solarzellendrucks ergab eine Energierückgewinnungszeit von 0,8 bis 1,9 Jahren.

### Literatur

- [1] Gertis, K., Mehra, S.-R., Sedlbauer, K., Eitele, S., Veres, E.: Umdruck zur Vorlesung Bauphysik, Lehrstuhl für Bauphysik, Universität Stuttgart (2010).
- [2] Lozanovski, A.: Ökobilanz der Herstellung von Kupfer-Indium-Gallium-Diselenid-Photovoltaikmodulen. Diplomarbeit, Lehrstuhl für Bauphysik, Universität Stuttgart (2010).
- [3] LBP-GaBi, PE International: GaBi 4 Software und Datenbanken für Ganzheitliche Bilanzierung. Echterdingen (2011).
- [4] Alsema, E. et al.: Methodology Guidelines on Life Cycle Assessment of Photovoltaic Electricity. IEA PVPS Task 12, Subtask 20 (2009).



Universität Stuttgart  
Lehrstuhl für Bauphysik

## Lehrstuhl für Bauphysik

Lehrstuhlinhaber: Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Phys. Klaus Sedlbauer

70569 Stuttgart, Pfaffenwaldring 7, Tel.: 0711/685-66578, Fax: 0711/685-66583

Email: bauphysik@lbp.uni-stuttgart.de