



---

Dokumentation

---

Photovoltaiktechnologien für Solarstromgewinnung  
Produktionsprozesse und Umweltbelastung



Photovoltaiktechnologie für Solarstromgewinnung  
Produktionsprozesse und Umweltbelastung

██████████

Aktenzeichen:

Abschluss der Arbeit:

Fachbereich:

██████████

██████████

WD 8 – 3000-014/10

22. Februar 2010

WD 8: Umwelt, Naturschutz, Reaktorsicherheit,  
Bildung und Forschung

██████████

---

## Inhaltsverzeichnis

1.	Welche Umweltbelastungen können bei der Herstellung von Photovoltaikanlagen auftreten und wie können diese im Produktionsprozess reduziert werden?	4
2.	Gesetzlichen Bestimmungen	4
2.1.	Welche speziellen gesetzlichen Bestimmungen müssen bei der Herstellung von Photovoltaikanlagen eingehalten werden?	4
3.	Welche Arbeitsschritte benötigt man für die Herstellung der verschiedenen Photovoltaikanlagen?	4
3.1.	Silicium-Photovoltaik	4
3.1.1.	Gewinnung von Silicium	5
3.1.2.	Herstellung von Solar-Silicium aus Rohsilicium durch Reinigungsverfahren	5
3.1.3.	Wafer-Herstellung	5
3.1.4.	Solarzellen aus monokristallinem Silicium	5
3.2.	Dünnschicht-Technologie	5
3.3.	Modulherstellung	6
3.4.	Zusammenfassung Herstellungsprozess	6
3.5.	Welche Herstellungsschritte wurden bisher in der Bundesrepublik durchgeführt?	6
4.	Anlagen	8

1. Welche Umweltbelastungen können bei der Herstellung von Photovoltaikanlagen auftreten und wie können diese im Produktionsprozess reduziert werden?

- Belastung der Umwelt mit Säuren.
- Freisetzung von Fluorkohlenwasserstoffen (geringe Mengen, vermeidbar).
- Freisetzung von Stickoxiden (Emissionsreduktion um 90% möglich durch Gaswaschverfahren).
- Freisetzung von Blei (vermeidbar da Verzicht auf Blei möglich).
- CO<sub>2</sub>-Ausstoß bei der Reduktion von Siliciumoxid zu Silicium.

Die Reduktion von Siliciumoxid mit Kohlenstoff ist unvermeidbar zur Silicium-Gewinnung. Allerdings wäre es möglich diesen Prozess CO<sub>2</sub>-neutral zu gestalten, indem anstatt Kohle nachwachsende (kohlenstoffhaltige) Rohstoffe verwendet werden.

Saubere Sache? Umweltschutz in der Produktion. Bodo Höche, Sonne Wind & Wärme, 12/2007, S 112.

2. Gesetzlichen Bestimmungen

2.1. Welche speziellen gesetzlichen Bestimmungen müssen bei der Herstellung von Photovoltaikanlagen eingehalten werden?

Die EG-Richtlinie 2002/95/EG (Anlage 10) zur Beschränkung der Verwendung bestimmter gefährlicher Stoffe in Elektro- und Elektronikgeräten regelt die Verwendung von Gefahrstoffen in Geräten und Bauteilen. In Photovoltaik-Modulen verwendete Stoffe, die unter die RoHS (Restriction of Hazardous Substances)-Richtlinien fallen:

Blei:                   - Bleifritten (Druckpaste bei Siebdruck auf Halbleiter)  
                          - Lote  
                          - Kupferband-Verbinder (Lotbeschichtung)

Cadmium:           - Halbleiterschicht (nur bei nicht a-Si Dünnschichtmodulen)  
                          als CdS (CIS und CdTe-Module), als CdTe (nur CdTe-Module).

3. Welche Arbeitsschritte benötigt man für die Herstellung der verschiedenen Photovoltaikanlagen?

Über 90 Prozent der hergestellten Solarzellen sind aus kristallinem Silicium (ISE Jahresbericht 2008). Alternative Technologien basieren auf amorphem Silizium (a-Si), sogenannten III-V Halbleitern, Farbstoffsolarzellen und organischen Solarzellen.

3.1. Silicium-Photovoltaik

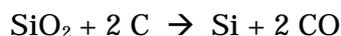
Silicium (chemisches Symbol Si) ist ein chemisches Element der Ordnungszahl 14. Es steht in der 4. Hauptgruppe des Periodensystems der Elemente und ist ein sogenanntes Halbmetall und

---

Elementhalbleiter. Silicium in elementarer Form ist ungiftig und ein häufiges Element Die Erde besteht zu etwa 15 Massenprozent aus Silicium.

### 3.1.1. Gewinnung von Silicium

Die Herstellung von Silicium, ist ein energetisch relativ aufwendiger Prozess. Der erste Schritt ist dabei die Reduktion von Siliciumdioxid (Quarzsand) mit Kohle im Lichtbogenofen:



Es entsteht also Kohlenmonoxid bzw. Kohlendioxid. Das Roh-Silicium, das durch diesen Prozess gewonnen wird, ist noch stark verunreinigt.

### 3.1.2. Herstellung von Solar-Silicium aus Rohsilicium durch Reinigungsverfahren

- Siemens-Verfahren: hoher Energieaufwand.
- Verwendung von Flussbett-Reaktoren:  
nur ca. ein Viertel des Bedarfs an elektrischer Energie wie beim Siemens-Verfahren.

### 3.1.3. Wafer-Herstellung

Heute meistens durch Sägen von Wafern (dünne Silicium-Scheiben) aus Silicium-Blöcken. Einsparmöglichkeiten:

- Besseres Kristallwachstum
- dünnere Wafer
- weniger Verschnitt
- Reduktion des Waferbruchs
- Recycling des Silicium-Abfalls
- Waferherstellung direkt aus flüssigem Silicium (keine Sägeverluste)
- höhere Effektivität der Zellen

### 3.1.4. Solarzellen aus monokristallinem Silicium

Aus den Wafern werden Solarzellen hergestellt. Dazu wird den Wafern eine n-dotierte Schicht aufgedampft, um einen sogenannten p-n-Übergang herzustellen (die Wafer wurden bei der Herstellung p-dotiert). Im Wesentlichen wird dann auf der Oberseite der Zelle eine Antireflexschicht aufgebracht und auf der Unterseite die elektrischen Kontakte, damit die photovoltaische Spannung abgegriffen werden kann.

## 3.2. Dünnschicht-Technologie

Im Gegensatz zu der aufwendigen Herstellung von kristallinen Wafern aus Silicium, lassen sich sowohl aus amorphem Silicium, als auch aus anderen Materialien Solarzellen herstellen.

Ungefähr 8 Prozent des Markts werden aus dem Bereich Dünnschicht abgedeckt. Die wichtigsten, produktionsreifen Techniken sind Zellen aus: amorphem Silicium (a-Si), Cadmium-Tellurid (CdTe), Kupfer-Indium-(Gallium)-di-Selenid(CIS/CIGS) und Zellen aus organischen oder Nanomaterialien.

Die Zellen aus amorphen Silicium sind günstiger in der Herstellung und benötigen weniger Silicium, haben aber (bisher) einen schlechteren Wirkungsgrad als die kristallinen Silicium-Zellen.

Zellen aus Cadmium-Tellurid sind kostengünstig und haben einen höheren Wirkungsgrad als die a-Si-Zellen. Allerdings ist Cadmium ein hochgiftiges Schwermetall und die Verbindung Cadmium-Tellurid ist ebenfalls giftig. Tellur ist ein seltenes Halbmetall, die Verfügbarkeit der Ausgangsstoffe könnte also ebenfalls ein Problem werden.

Die CIS/CIGS Technologie hat bereits eine höhere Effizienz als die anderen Dünnschicht-Technologien, jedoch ist die Fertigung sehr aufwändig.

### 3.3. Modulherstellung

Die einzelnen Solarzellen werden in eine Schicht aus Ethylenvinylacetat (EVA) eingebettet. Die elektrischen Kontakte der Solarzellen werden verschaltet und witterungsfest zwischen eine Glas-scheibe (Vorderseite) und einen Verbundkunststoff (Rückseite) eingebettet, die robust mit einem Aluminiumrahmen eingefasst werden.

### 3.4. Zusammenfassung Herstellungsprozess

Die Herstellungsschritte für Anlagen aus kristallinem Silicium sind vereinfacht dargestellt:

Quarz → Silizium → Solar-Silizium → Wafer → Solarzelle → Solarmodul → Solaranlage

### 3.5. Welche Herstellungsschritte wurden bisher in der Bundesrepublik durchgeführt?

- Herstellung von Solar-Silicium aus Rohsilicium

z.B. Siltronic AG , <http://www.siltronic.com>, Wacker group, [www.wacker.com](http://www.wacker.com)

- Herstellung von mono- und multikristallinen Wafern für die Photovoltaikindustrie

z.B. Deutsche Solar AG, [www.deutschesolar.de](http://www.deutschesolar.de), Siltronic AG

- Herstellung von mono- und multikristallinen Solarzellen

z.B. Q.Cells, [www.q-cells.de](http://www.q-cells.de)

- Herstellung von Solarmodulen aus mono- und polykristallinen Solarzellen

z.B. SOLARWATT AG, [www.solarwatt.de](http://www.solarwatt.de)

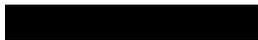
- Herstellung von Dünnschichtmodulen

z.B. Q.Cells, [www.q-cells.de](http://www.q-cells.de)

- Herstellung von Kupfer-Indium-Gallium-Diselenid-(CIGS)-Dünnschicht-Solarzellen  
z.B. Solarion AG, [www.solarion.de](http://www.solarion.de)

- Herstellung organischer Solarzellen  
z.B. heliatek GmbH, [www.heliatek.com](http://www.heliatek.com)

- Herstellung von Wechselrichtern  
z.B. SOLARWATT AG, Dresden, [www.solarwatt.de](http://www.solarwatt.de)



---

#### 4. Anlagen

- 1.) Saubere Sache? Umweltschutz in der Produktion. Bodo Höche, Sonne Wind & Wärme, 12/2007, S 112.
- 2.) 11:1 für die Photovoltaik. Stefan Stadler, Photovoltaik 07/2008, S 19.
- 3.) Crystal Clear – Projekt: Erste Ergebnisse zur Energierücklaufzeit. Anne Kreuzmann und Philippe Welter, Photon 09/2005, S 69.  
Projekt Crystalclear: <http://www.ipcrystalclear.info/>
- 4.) Energetische Bewertung von PV-Modulen. Mariska de Wild-Scholten und Erik Alsema, Erneuerbare Energien 09/2006, S 66.
- 5.) Wettlauf um die Pole Position. Daniel Pohl, Sonne Wind & Wärme, 12/2007, S 118.
- 6.) Stoffbezogene Anforderungen an Photovoltaik-Produkte und deren Entsorgung. K. Sander, S. Zangl, M. Reichmuth, G. Schröder (2004).  
<http://www.umweltdaten.de/publikationen/fpdf-l/2789.pdf>
- 7.) IEA-PVPS Task 12: Swiss activities in 2008. Aktualisierung der Ökobilanz von CDTE-PV. Rolf Frischknecht und Matthias Stucki, Annual Report 2008, [www.esu-services.ch](http://www.esu-services.ch).
- 8.) Fraunhofer ISE Jahresbericht 2008, Marion Hopf, Karin Schneider (Redaktion) S43.  
<http://www.ise.fraunhofer.de/veroeffentlichungen/infomaterial/jahresberichte/>
- 9.) Presseinfo Photovoltaik. Philipp Vohrer, Agentur für erneuerbare Energien, 2008.  
<http://www.unendlich-viel-energie.de/de/solarenergie/detailansicht/article/39/photovoltaik.html>
- 10.) RICHTLINIE 2002/95/EG DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 27. Januar 2003 zur Beschränkung der Verwendung bestimmter gefährlicher Stoffe in Elektro- und Elektronikgeräten  
<http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2003:037:0019:0023:DE:PDF>