

Photovoltaik-Technologien im Überblick

Die Geschichte der Photovoltaik begann vor rund 60 Jahren mit Solarzellen aus kristallinem Silizium. Noch heute verfügt diese Technologie über den grössten Marktanteil. Mittlerweile wurden jedoch viele weitere Photovoltaik-Technologien entwickelt. Wir stellen jene vor, die heute für die Stromproduktion relevant sind, und vergleichen ihre jeweiligen Charakteristika sowie ihre Vor- und Nachteile. Text: Dr. Stephan Buecheler

Spricht man von Photovoltaik, meint man die direkte Umwandlung von Sonnenlicht in elektrische Energie. Das Sonnenlicht wird in einem Material, meist einem Halbleiter, eingefangen und deponiert seine Energie durch Anregung von freien Ladungsträgerpaaren. Diese werden in einer Solarzelle durch ein elektrisches Feld in positive und negative Ladungen getrennt und über zwei Elektroden (Vorder- und Rückkontakt) einem Verbraucher zugeführt. Bei den Technologien, die heute für die Stromproduktion relevant sind, unterscheidet man grob zwischen Solarzellen aus kristallinem Silizium und Dünnschicht-Solarzellen. Für die praktische Anwendung werden mehrere solcher Solarzellen zu Solarmodulen verschaltet. Das Marktvolumen einzelner Dünnschicht-Technologien ist in den letzten Jahren im dreistelligen Prozentbereich gewachsen, der grösste Anteil (86%) wird aber immer noch durch kristalline Silizium-Solarmodule abgedeckt.

Solarmodule aus kristallinem Silizium

Silizium ist nach Sauerstoff das Element, das am zweithäufigsten auf der Erde vorkommt. In der Natur findet man es hauptsächlich in Form von Siliziumdioxid (SiO_2) als Quarzsand oder Quarzkristall. Aus SiO_2 wird in einem mehrstufigen, energieaufwendigen Verfahren hochreines polykristallines Silizium (poly-Si) hergestellt. In Blöcke gegossen dient es als Ausgangsmaterial für poly-Si-Solarzellen. Aus eingeschmolzenem poly-Si können in einem weiteren Schritt Silizium-Einkristalle (mono-Si) gezogen werden. Die gewonnenen poly-Si-Blöcke oder mono-Si-Blöcke (Si-Einkristalle) werden in etwa 0,2 mm dicke Scheiben («Wafer») gesägt und in einer Abfolge von mehreren Prozessschritten zu Solarzellen weiterverarbeitet. Zur Herstellung von Solarmodulen werden die Solarzellen in der Regel zunächst nach Leistung gruppiert, mittels Leiterbahnen seriell zu Strängen verschaltet, anschliessend zwischen Glas und Kunststofffolien (Tedlar oder Polyester) laminiert und mit elektrischen Kontakten versehen. Solarmodule aus monokristallinem bzw. polykristallinem Silizium haben als bereits lange bewährte Technologie die höchsten Marktanteile. Ihre Vorteile sind die hohen Wirkungsgrade und die gute Verfügbarkeit des Ausgangsmaterials.

Dünnschicht-Solarmodule

Lange Zeit war der Begriff «Dünnschicht-Solar-Modul» ein Synonym für die amorphe Silizium-Technologie (a-Si). Im Gegensatz zum kristallinen Silizium sind die Atome im amorphen Material nicht geordnet, weshalb es andere physikalische Eigenschaften hat. Der Bereich des Sonnenlichtspektrums, der in elektrische Energie umgewandelt wird,



Auf dem Markt sind verschiedenste Photovoltaik-Technologien erhältlich.

ist kleiner. Durch Einfügen von anderen chemischen Elementen in die a-Si-Schichten (= Dotieren, z. B. mit Germanium) lässt sich dieser Bereich verschieben. Dies lässt sich auch durch eine teilweise Ordnung der Atome in der amorphen Siliziumschicht zu Nanokristallen (nc-Si) erreichen. Stapelt man zwei (Tandem-) oder drei (Tripel-)Solarzellen (a-Si und/oder nc-Si) aufeinander, lässt sich der Anteil des umgewandelten Sonnenspektrums erhöhen. Mittlerweile haben sich auch weitere Dünnschicht-Technologien wie CdTe (Verbindungshalbleiter Cadmiumtellurid) oder CIGS (Verbindungshalbleiter Kupfer-Indium-Gallium-Diselenid: $\text{Cu}(\text{In,Ga})\text{Se}_2$) auf dem Markt etabliert. Einer der Hauptgründe für deren noch relativ kleinen Marktanteil ist, dass die Herstellungsverfahren meist geheim gehalten werden. Die Verbindung Cadmiumtellurid ist – im Gegensatz zum elementaren Schwermetall Cadmium – eine für den Menschen ungiftige, stabile chemische Verbindung. Der Herstellungsprozess der Dünnschicht-Solarmodule unterscheidet sich grundsätzlich von dem der Solarmodule aus kristallinem Silizium. Zwar bestehen die Solarzellen ebenfalls aus elektrischen Kontakten und einem absorbierenden Material, in dem – im Zusammenspiel mit weiteren Schichten – auch die Trennung der Ladungsträger stattfindet. Diese Schichtstapel werden aber direkt auf einem Trägermaterial hergestellt. Die Dicke der Schichtstapel liegt in der Regel unter 5 μm , wobei die lichtabsorbierende Schicht nur 1–3 μm einnimmt, also etwa hundertmal weniger als bei den Solarzellen aus kristallinem Silizium. Damit sinkt nicht nur der Materialaufwand deutlich, sondern auch die für die Herstellung benötigte Energie.

Als Trägermaterial können, je nach Technologie, Glas, Metall- oder Kunststofffolien eingesetzt werden. Verwendet man flexible Trägermaterialien, lassen sich schnelle Rolle-zu-Rolle-Verfahren für

die Herstellung der Schichten in der Fertigung nutzen. Auch in der Dünnschicht-Technologie können Solarzellen nach einer Leistungssortierung ähnlich wie Solarzellen aus kristallinem Silizium durch Leiterbahnen zu Solarmodulen verschaltet werden. Weitaus häufiger werden die Solarzellen aber schon während der Herstellung durch eine geeignete Strukturierung seriell zu Modulen verschaltet. Diese Methode nennt man auch monolithische Verschaltung, die man an dünnen parallelen Streifen auf den Solarmodulen erkennt.

Auf dem Markt findet man fast ausschliesslich Glas-Glas-laminierte Module ohne Rahmen. Elektrische Kontakte werden auf der Rückseite nach aussen geführt. Flexible Solarmodule sind noch ein Nischenprodukt. Sie versprechen aber weitere Vorteile: Flexible und leichte Produkte erlauben zusätzliche Anwendungsmöglichkeiten wie zum Beispiel die Installation auf gekrümmten Flächen oder auf Gebäuden, die nicht für zusätzliche Lasten ausgelegt sind.

Weitere Technologien mit hohem Potenzial

Andere Technologien, die auf dem PV-Markt noch nicht messbar sind, aber ein hohes Potenzial haben, sind Farbstoffsolarzellen (auch Grätzel-Solarzellen genannt), organische Solarzellen, Hybridkollektoren und hocheffiziente Solarzellen in Kombination mit einer Optik, die das Sonnenlicht auf die Solarzellen bündelt.

Graue Energie des Gesamtsystems reduzieren

Das jährliche Wachstum des globalen Photovoltaikmarkts lag in den vergangenen Jahren immer im höheren zweistelligen Prozentbereich. Die Preise haben sich innerhalb von weniger als fünf Jahren halbiert. Damit ist eine kostendeckende oder sogar wirtschaftliche Stromproduktion an vielen Standorten schon möglich. Natürlich ist es wichtig, für eine wirtschaftliche Stromproduktion auf einen möglichst niedrigen Preis pro Leistung und damit auch Preis pro produzierte Energie zu achten. Für eine nachhaltige Stromproduktion sollte aber auch die Energierücklaufzeit des Systems weiter minimiert werden. Eine Möglichkeit dazu bietet die Gebäudeintegration. Bei geeignetem Produktdesign und passender Wahl der Technologie können Solarmodule eine zusätzliche Funktion in der Gebäudehülle übernehmen und damit die graue Energie des Gesamtsystems reduzieren. Quelle: TEC 21. ■

Der Autor

Dr. Stephan Buecheler, Physiker, Leiter der CIGS- und CdTe-Forschung in der Abteilung für Dünnschichten und Photovoltaik an der EMPA, Dübendorf.

Solarmodule aus kristallinem Silizium		
	Solarmodule aus monokristallinem Silizium	Solarmodule aus polykristallinem Silizium
Wirkungsgrad (Verhältnis der erzeugten elektrischen Leistung zur Leistung der einfallenden Strahlung)	Kommerziell erhältliche Module: 14-16%; mit alternativen Konzepten über 20%. Im Forschungslabor wurde mit einem etwas aufwendigeren Aufbau ein Solarzellen-Wirkungsgrad von 25 % erreicht.	Kommerziell erhältliche Module: 13-15%; in Zukunft sind aber höhere Wirkungsgrade zu erwarten. Im Forschungslabor wurde ein Solarzellen- Wirkungsgrad von 20,4% und ein Solarmodul- Wirkungsgrad von 18,4% gezeigt.
Farbe	Dunkelblau bis Dunkelgrau mit weissen oder schwarzen Zwischenräumen; meist werden die Module mit einem Aluminiumrahmen mechanisch verstärkt.	Verschiedene Blautöne, die von unterschiedlich orientierten Siliziumkristallen herrühren; meist werden die Module mit einem Aluminiumrahmen mechanisch verstärkt.
Energierücklaufzeit für einen Installationsort in Südeuropa mit jährlichem Ertrag von 1700 kWh/kWp⁵ (Zeit, während der die Solarmodule betrieben werden müssen, um die für die Produktion und zum Rückbau benötigte Energie zu liefern)	1,7 Jahre	1,7 Jahre
Marktanteil im Jahr 2011 (ausgelieferte Module)	37,7% (Wachstum um 36% gegenüber dem Vorjahr)	48% (Wachstum um 36 % gegenüber dem Vorjahr)
Verfügbarkeit der Ausgangsmaterialien	Kein Problem, aber energieaufwendig	Kein Problem, aber energieaufwendig
Fazit	Bewährte Technologie, hoher Wirkungsgrad, hoher Energieaufwand für die Herstellung	Bewährte Technologie, hoher Energieaufwand für die Herstellung



Solarmodule aus monokristallinem Silizium



Solarmodule aus polykristallinem Silizium

Dünnschicht-Solarmodule

Dünnschicht-Solarmodule aus Silizium (a-Si / nc-Si)	Dünnschicht-Solarmodule aus Cadmiumtellurid (CdTe)	CIGS (Kupfer-Indium-Gallium-Diselenid)-Solarmodule (Cu(In,Ga)Se ₂)
Kommerziell erhältliche, amorphe Silizium-Solarmodule (a-Si): 4-7%; kommerziell erhältliche Tandem- oder Tripel-Solarmodule (aus a-Si- und/oder nanokristallinen [nc-Si]-Siliziumzellen): bis zu 10%. Im Forschungslabor hat man mit der a-Si-/nc-Si-Technologie einen Solarmodul-Wirkungsgrad von 11,7% und einen Solarzellen-Wirkungsgrad von 12,3% erreicht.	Kommerziell erhältliche Module: 11-12%. Das Potenzial für diese Technologie liegt aber deutlich höher. Im Forschungslabor wurden 15,3% für ein Solarmodul und 17,3 % für eine Solarzelle erreicht.	Kommerziell erhältliche Module: 12-14 %. Diese Technologie weist das grösste Potenzial aller Dünnschichttechnologien für hohe Wirkungsgrade auf. Im Forschungslabor wurden Solarzellen mit 20,3 % und Solarmodule mit 15,7 % realisiert.
Dunkelrot bis Dunkelgrau (Solarmodule mit nur einer a-Si-Schicht); Dunkelblau bis Dunkelgrau (als Tandem- oder Tripel-Solarmodule)	Dunkelgrau bis Schwarz	Dunkelgrau bis Schwarz
1,0 Jahre	0,8 Jahre Es wird erwartet, dass die Energierücklaufzeit durch Verringerung der Prozesstemperaturen, Beschleunigung des Schichtwachstums und den Einsatz von Metall- oder Kunststofffolien statt Glas als Trägermaterial noch deutlich gesenkt werden kann.	1,3 Jahre Es wird erwartet, dass die Energierücklaufzeit durch Verringerung der Prozesstemperaturen, Beschleunigung des Schichtwachstums und den Einsatz von Metall- oder Kunststofffolien statt Glas als Trägermaterial noch deutlich gesenkt werden kann.
2,7% (Wachstum um 5% gegenüber dem Vorjahr)	8,2% (Wachstum um 37% gegenüber dem Vorjahr)	2,9% (Wachstum um 129% gegenüber dem Vorjahr)
Kein Problem	Das Ausgangsmaterial Tellur wird häufig als seltenes Element bezeichnet. Die Rohstoffe lassen aber noch ein deutliches Marktwachstum zu. Konservative Schätzungen zufolge kann zum Beispiel bis 2020 eine jährliche Produktionskapazität von 14 GWp (60% des PV-Gesamtvolumens 2011), in einem optimistischen Szenario sogar von 38 GWp erreicht werden.	Wichtiger Bestandteil sind die selten vorkommenden Elemente Indium und Gallium. Limitierend wird eher Indium sein, da es auch in Flachbildschirmen eingesetzt wird. Die Rohstoffe lassen aber noch ein deutliches Marktwachstum zu. Es gibt konservative und optimistische Schätzungen für die Jahresproduktion, die beispielsweise für 2020 von 13 GWp bzw. 22 GWp ausgehen.
Tiefster Preis, gutes Schwachlicht- und Temperaturverhalten, kurze Energierücklaufzeit, flexible Solarmodule möglich	Tiefe Produktionskosten, gutes Temperaturverhalten, sehr kurze Energierücklaufzeit, homogene dunkle Farbe, flexible Solarmodule möglich, eingeschränkt verfügbare Ausgangsmaterialien	Hoher Wirkungsgrad, niedrige Energierücklaufzeit, homogene dunkle Farbe, gutes Temperaturverhalten, flexible Solarmodule möglich, eingeschränkt verfügbare Ausgangsmaterialien



Dünnschicht-Solarmodule aus Silizium (a-Si / nc-Si)
Objekt: Siedlung Sihlweid, Zürich Leimbach



Dünnschicht-Solarmodule aus Cadmiumtellurid (CdTe)

Bildnachweis: Redaktion



CIGS (Kupfer-Indium-Gallium-Diselenid)-Solarmodule (Cu(In,Ga)Se₂)